

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

**ВЕСТНИК  
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

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

**Научный рецензируемый журнал**

**№ 3 (19), 2023**

Тверь 2023

Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». Тверь: Тверской государственный технический университет, 2023. № 3 (19). 100 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>Бабаев Д.Д., Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С., Завадько М.Ю.</i> Обзор: геополимерные вяжущие на основе золы ТЭС.....	5
<i>Белов В.В.</i> Биокomпозиты строительного назначения с использованием отходов деревообработки. Часть 3 (подбор составов биологически активированного опилкобетона).....	19
<i>Бурьянов А.Ф., Ткач Е.В., Стибунов Д.В.</i> Материал для реставрационных работ на основе высокопрочного гипса с полыми стеклянными микросферами.....	33
<i>Курятников Ю.Ю.</i> Противоречия в нормативной документации на железобетонные изделия.....	43
<i>Москвина Ю.Н.</i> К вопросу технического регулирования строительства зданий из CLT-панелей .....	49

### ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<i>Макаров А.Н.</i> Математические доказательства законов квантового теплового излучения газовых объемов. Часть II. Законы квантового теплового излучения сферических газовых объемов.....	54
<i>Павлова Ю.М., Торгованова О.Н., Павлов А.В.</i> Электромобили: проблемы, тенденции и проектирование зарядных станций.....	63
<i>Шум Ал.А., Ветошкин А.М.</i> Теорема о центре $n$ -симметрии плоской выпуклой пластины .....	75

### ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Левиков А.В., Гавриленко А.В.</i> К вопросу использования полиуретановой однокомпонентной клей-пены при изготовлении газобетонных перемычек.....	83
<i>Филиппова О.П., Калаева С.З., Цховребов Э.С., Сергеев Е.С.</i> Утилизация промышленных отходов как фактор предупреждения возникновения экологической опасности.....	90

# CONTENTS

## CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

<i>Babaev D.D., Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Petropavlovskii K.S., Zavadko M.Yu.</i> Overview: geopolimer binders based on TPP ash.....	5
<i>Belov V.V.</i> Construction biocomposites using woodworking waste. Part 3 (selection of biologically activated sawdust concrete compositions).....	19
<i>Buryanov A.F., Tkach E.V., Stibunov D.V.</i> Gypsum material for restoration works based on high-strength gypsum with hollow glass microspheres .....	33
<i>Kuryatnikov Yu.Yu.</i> Contradictions in the normative documentation for reinforced concrete products.....	43
<i>Moskvina Yu.N.</i> On the issue of technical regulation of the construction of buildings from CLT-panels.....	49

## ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Makarov A.N.</i> Mathematical evidence of the laws of quantum thermal radiation of gas volumes. Part II. Laws of quantum thermal radiation of spherical gas volumes.....	54
<i>Pavlova Yu.M., Torgovanova O.N., Pavlov A.V.</i> Electric vehicles: problems, trends and design of charging stations.....	63
<i>Shum Al.A., Vetoshkin A.M.</i> Theorem on the center of $n$ -symmetry of a flat convex plate .....	75

## CHEMICAL TECHNOLOGY

<i>Levikov A.V., Gavrilenko A.V.</i> On the use of polyurethane single-component adhesive foam in the manufacture of aerated concrete jumpers.....	83
<i>Filippova O.P., Kalaeva S.Z., Tskhovrebov E.S., Sergeev E.S.</i> Utilization of industrial waste as a factor in preventing the occurrence of environmental hazards.....	90

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



УДК 691.533

### ОБЗОР: ГЕОПОЛИМЕРНЫЕ ВЯЖУЩИЕ НА ОСНОВЕ ЗОЛЫ ТЭС

*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.** В статье рассмотрена возможность применения бесцементных вяжущих в качестве замены портландцемента. Установлено, что перспективным направлением создания бесцементного вяжущего является синтез геополимерных систем. Показано, что наиболее распространенным сырьем для геополимеров на сегодняшний день являются отходы топливно-энергетической (золы ТЭС) и металлургической (шлак) промышленности. В качестве активатора процесса геополимеризации использованы два вида щелочных соединений: щелочи – NaOH и KOH; натриевое, калиевое или смешанное жидкое стекло. Отмечено, что введение высокодисперсной алюмосиликатной стеклофазы золы гидроудаления способствует повышению плотности материала, а также улучшению реологических характеристик сырьевых смесей.

**Ключевые слова:** геополимеры, бесцементные вяжущие, зола гидроудаления, шлак, прочность, водостойкость, экологичность.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-3-5-19**

Основной тенденцией рынка строительных материалов за последние годы является непрерывный рост практически по всем направлениям. Одно из основных направлений развития мировой строительной индустрии – производство строительных материалов, изделий и конструкций с минимальным негативным воздействием на окружающую среду.

Производство композиционных вяжущих материалов имеет большое значение в обеспечении строительной отрасли государства материально-сырьевой базой и выступает индикатором его развития. Масштабы капитального строительства задают основные темпы роста производства композиционных вяжущих, от которых напрямую зависят его экономичность и технический уровень конечной строительной продукции. В то же время экологическая безопасность при создании и реализации строительных материалов становится определяющим фактором при выборе сырья и технологий для их производства.

На данный момент разработано и используется достаточно большое количество высокоэффективных составов вяжущих, в том числе и композиционных, прошедших апробацию в заводских условиях с экологической и экономической точек зрения.

Существование в современной промышленности широкого спектра композиционных вяжущих обуславливает необходимость их точной и общепринятой классификации,

согласно которой материалы подразделяются на основе минерального и химического состава, а также способности набирать прочность (твердеть) при определенных условиях и механизмах структурообразования.

Современная строительная индустрия предъявляет к вяжущим материалам высокие требования в области качества. Одновременно с совершенствованием технологии производства расширяется и ассортимент выпускаемых вяжущих материалов.

Сегодня строительство базируется на производстве и применении портландцемента. За счет технологических и эксплуатационных преимуществ он является практически безальтернативным вяжущим при производстве бетона и железобетона – основных конструктивных материалов при возведении зданий и сооружений. В настоящее время ежегодное производство портландцемента намного превышает объемы производства любого другого промышленного продукта. При таком росте производства цемента проявились его недостатки – высокая энергоемкость производства и значительные выбросы углекислого газа, связанные с декарбонизацией сырья и сжиганием топлива.

Одним из перспективных направлений является синтез геополимерных систем. При этом наиболее распространенное сырье для геополимеров на сегодняшний день – отходы топливно-энергетической (золы и шлаки ТЭС) и металлургической (шлак) промышленности. Однако неоднородность физико-химических и структурных особенностей техногенного сырья создает ряд технологических проблем при производстве качественных композитов.

Решая проблему создания полимерного материала без органических горючих соединений, французский химик Дж. Давидович в 1978 году предложил новый материал, который назвал «геополимер». Технологические преимущества геополимеров в сравнении с портландцементами – отсутствие высокотемпературного обжига и выделения в процессе получения углекислого газа (при диссоциации карбонатного сырья). Немаловажным преимуществом также является возможность использования техногенного сырья или отходов различных отраслей промышленности. К ним относят доменные шлаки, золы-уноса, полученные в результате сжигания углей или сельскохозяйственных отходов, и другое техногенное сырье.

Геополимерная технология основана на идее использования неорганических минеральных веществ, твердение которых активируется щелочами или силикатами щелочных металлов [1, 2]. В трехмерной цепочке геополимеров атомы углерода заменены неорганическими атомами кремния и алюминия.

Авторами работы [3] был рассмотрен вопрос частичной замены цемента в составе бетона вторичными материальными ресурсами. Геополимерный бетон получается в результате реакции натуральных компонентов со щелочными растворами (раствор гидроксида калия и растворимых силикатов) в помещении или при высокой температуре окружающей среды. В качестве компонентов могут выступать производственные отходы, что значительно снижает экологическую нагрузку. Более длительный период эксплуатации полученных материалов и устойчивости к различного вида воздействиям делает геополимеры достойной альтернативой портландцементу.

Влияние новых синтезированных добавок на свойства геополимера изучено в статье [4]. Исследователи установили, что в процессе перемешивания компонентов большое влияние оказывает их дисперсность, поскольку обеспечивается отличная сцепка всех ингредиентов. Однако в силикатном растворе это приводит к уменьшению растворимости поливинилового спирта. В качестве решения данной проблемы было

предложено использовать реакцию поливинилового спирта с карбамидом. В результате повышается растворимость, что положительно влияет на диспергирующие свойства геополимерных композиций.

Авторами статьи [5] были проведены исследования жаростойких композиций на основе гипсового вяжущего. При воздействии высоких (до 1 000 °С) температур обеспечивается протекание кристаллизационных процессов с участием кремнеземной составляющей (при применении наноструктурированного вяжущего в качестве активного минерального компонента). Отличительной чертой гипсокремнеземистого вяжущего является трансформация при температуре 1 000 °С исходного минерального состава в композицию, включающую β-кварц (19), известь (26), периклаз (2), нерастворимый (ромбический) ангидрит (7), элестадит (6), α'-L-Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> (30) и ольдгамит CaS (10). Сумма молярных объемов всех кристаллических фаз при увеличении термического воздействия от комнатной температуры до 1 000 °С проходит через три стадии трансформационных преобразований структуры: ослабление → стабилизацию → восстановление, возвращаясь в первоначальное состояние объема. При этом отношение изменения объемов кристаллических фаз в гипсокремнеземистой системе до и после температурной обработки близко к единице. Одновременно с этим композиционное наноструктурированное гипсовое вяжущее с 70 % наноструктурированного кремнеземистого компонента после термообработки при 800 °С представляет собой комплекс, состоящий из кристаллических образований пластинчатой формы, а также изометричных кристаллов, которые обеспечивают более высокие значения прочности получаемого жаростойкого материала.

Анализируя приведенные определения геополимерных вяжущих, следует отметить, что во всех случаях основными компонентами, необходимыми для синтеза геополимерных вяжущих, выступают активирующие агенты, обеспечивающие щелочную среду, и вещества алюмосиликатного состава различного происхождения.

Подходя к вопросу выбора сырьевых материалов, использование которых лежит в основе производства геополимерных вяжущих, нужно руководствоваться несколькими основными параметрами, такими как объемы запасов, доступность добычи и использования; активность сырьевых компонентов по отношению к веществу затворения и постоянство состава, способного обеспечить стабильность физико-химических характеристик конечного продукта без изменения технологии производства.

Как было отмечено, для синтеза геополимеров (как разновидности щелочных вяжущих) используются такие основные составляющие, как алюмосиликатный компонент преимущественно кислого состава и щелочной активатор.

Важнейшими особенностями новых бесцементных материалов являются низкая пористость и высокие физико-механические характеристики [6]. Авторами отмечается, что при комплексной модификации микроструктуры пластифицированной высококонцентрированной вяжущей системы (ВКВС) кварцевого песка происходит снижение поверхностного натяжения на границе раздела фаз, что ведет к пептизации до первичных агрегатов поверхности частиц твердой фазы пластифицированной ВКВС. На практике доказано, что механизм комплексной модификации позволил улучшить реотехнологические качества ВКВС и снизить более чем в 2 раза формовочную влажность систем (с 9–8 до 4 %). Благодаря этому понижается пористость готовых изделий и существенно повышаются их физико-механические характеристики.

В статье [7] исследовались составы кислотоупорного вяжущего щелочной активации на основе высокоактивного метаксаолина, образующегося в результате

термообработки кремнистого мергеля и вулканического туфа. В предложенном кислотоупорном материале метакаолин выступал в качестве вяжущего в комплексе со щелочным активатором. В результате проведенных испытаний образцы показали высокую водостойкость вяжущего ( $K_p = 0,99$ ) при использовании гидрофобизирующей жидкости ГКЖ-11, у образцов без метилсиликоната натрия  $K_p = 0,92$ ; показатели кислотостойкости довольно высокие и превышают значения традиционных кислотостойких цементов.

Геополимерный экологически чистый бетон, обладающий хорошими конструктивными качествами, в течение последних пятидесяти лет известен как конструкционный. Тем не менее до сих пор обычный портландцементный бетон занимает первое место во всех строительных работах.

Геополимерный бетон на основе летучей золы-уноса с низким содержанием кальция нуждается в термическом или паровом отверждении, что делает его непригодным для литья. Стоимость отверждения является дополнительным фактором, который на долгое время сделал геополимерный бетон непопулярным в большинстве строительных работ, особенно в железобетонных конструктивных элементах. Отверждение в окружающей среде – наиболее эффективное средство для решения этой проблемы. Промышленные отходы, такие как шлак (молотый гранулированный доменный шлак), при смешивании с летучей золой могут набирать прочность при температуре окружающей среды без отверждения теплом или паром, сохраняя конечную прочность неизменной [8], что дает толчок современному развитию геополимерных технологий.

Жидкое стекло широко используется в геополимерах в качестве основы матрицы. Функциями жидкого стекла в геополимерной композиции являются связывание дисперсных материалов; влияние на реологические свойства формовочных смесей; активация участия наполнителей в процессах структурообразования; термическое набухание с образованием тонкостенных ячеек. В качестве наполнителей для смесей на основе жидкого стекла (помимо других природных наполнителей) традиционно используются и отходы тепловой промышленности: летучая зола и алюмосиликатная микросфера. Летучая зола (зола-уноса тепловых электростанций) представляет собой мелкодисперсный порошок, образующийся при сжигании пылевидного угля. Структура частиц летучей золы обусловлена кратковременным пребыванием топлива в зоне высоких температур. Частицы летучей золы – это округлые сплавленные зерна, многие из которых имеют мельчайшие (в основном закрытые) поры. Размер сферических частиц летучей золы – 0,5–100 мкм. Летучая зола состоит из алюмосиликатного непрозрачного стекла, содержит частицы из кварца, муллита, несгоревшего угля. Удельная поверхность золы-уноса – 280–300 м<sup>2</sup>/кг. Использование ее в составе жидкостекольных композиций способствует снижению теплопроводности и повышению огнестойкости материала.

Алюмосиликатная микросфера представляет собой легкую фракцию золы, которая образуется при высокотемпературном сжигании угля на факелах. Это сыпучий материал, состоящий из стеклокерамических полых частиц сферической формы диаметром 50–200 мкм. Плотность составляет 380–400 кг/м<sup>3</sup>. Использование микросфер в качестве наполнителя обусловлено рядом преимуществ: высокая дисперсность способствует созданию однородных структур; в наличии такие важные характеристики, как низкая плотность, повышенная термостабильность и стойкость в агрессивных средах [9, 10].

Экономическая эффективность производства и применения гипсового вяжущего прослеживается на всех жизненных циклах в связи с повсеместной распространенностью сырья, возможностью использования отходов различных отраслей промышленности,



низкой топливо- и энергоемкостью при добыче сырья и производстве, снижением массы конструкций, повышением тепло- и звукоизоляции при применении и эксплуатации, возможностью переработки после применения.

Низкокальциевые золоотходы, образующиеся при сжигании угля, являются востребованным сырьем для синтеза геополимеров, поскольку имеют преимущественно алюмосиликатный состав, обладают высокой дисперсностью, а их запасы многократно превышают количество других отходов, используемых в технологиях геополимерных материалов. Реакционная способность зол в процессах геополимеризации существенно колеблется в зависимости от вида исходного угля и зависит от содержания и состава стеклофазы в составе золы. Кристаллические фазы золы – обычно муллит, кварц, магнетит – относительно инертны в геополимерном синтезе. Для повышения реакционной способности зол, особенно низкокальциевых, и, соответственно, прочностных характеристик геополимеров эффективным инструментом является механическая активация. Другой подход, который в последнее время практикуется в этих же целях, – применение для алюмосиликатного сырья различных добавок (в частности, карбонатных) [11].

В статье [12] исследовались композиции с использованием кремнеземистой добавки – золы-уноса. Важной особенностью золы является ее высокая интенсивная способность размалывания. В данном исследовании она использовалась как наполнитель в геополимерной композиции с применением гипсового вяжущего. Авторами была установлена область рецептур гипсозольных вяжущих, характеризующихся повышенным объемом золы (сверх традиционно используемого) и достаточно высокой для подобных композиций прочностью – 10–14 МПа. Содержание золы в подобранной композиции варьировалось в диапазоне 20–25 %; извести – 0–2 %; портландцемента – до 1,5 % с добавкой сернокислого калия в количестве 1,5 %.

Для повышения степени гидратации цемента в рассматриваемой системе вводимый портландцемент (10 %) был подвержен активации (тонкому измельчению). Присутствие гидроксида кальция способствует понижению растворимости гипса и замедлению гидратации дигидрата кальция. Однако наличие гидрата окиси в системе способствует более полному прохождению гидратации клинкерных минералов и связыванию гидроксида кальция с составляющими золы (кварцем, глиноземом, кремнеземом) с образованием дополнительного количества гидросиликатов, гидроалюминатов кальция.

Гипсоизвестково-шлаковые вяжущие (ГИШВ) – одна из разновидностей водостойких смешанных гипсов. В качестве гидравлической добавки в таких смесях применяют тонкоизмельченную смесь доменного шлака и извести вместо портландцемента. Бесцементный ГИШВ можно рассматривать как перспективный материал для зеленого строительства.

Авторы статьи [13] в качестве щелочного компонента вместо извести использовали высококальциевую золу-унос (ВКЗ), полученную в результате сжигания бурых углей на Березовской ГРЭС (Красноярский край). Эта зола содержала 15 % свободного оксида кальция. В качестве исходного сырья использовали также строительный гипс, кальциевую строительную известь, доменный гранулированный шлак. Соотношение гипсового вяжущего и гидравлической добавки (шлак + известковый компонент) оставалось неизменным и составляло 70 : 30. При достижении одинаковых значений pH гипсоизвестково-шлаковых и гипсоизвестково-зольных суспензий прочность соответствующих затвердевших вяжущих оказалась практически одинаковой: в присутствии

золы она была меньше на 3 % по сравнению с аналогичным составом, содержащим строительную известь.

Активные минеральные добавки разделяют на два вида: состоящие из аморфного кремнезема, богатые продуктами обжига глинистых веществ и представляющие собой охлажденную магму и продукты обжига глин, реакционная способность которых обусловлена переходом инертного каолинита в активный метакаолинит, аморфизованный в результате удаления гидратной влаги; топливные золы, обычно содержащие до 80 % частичек из кремнеземисто-алюминатного стекла округлой формы. В рамках статьи [14] был проведен двухфакторный эксперимент для исследования влияния добавки золы гидроудаления на свойства модифицированного безобжигового гипсового камня в возрасте 14 сут. Результаты исследований показали, что наибольшей прочностью и плотностью характеризуется модифицированный гипсовый камень с водосодержанием 0,055. Максимальная плотность ( $2\,252,1 \text{ кг/м}^3$ ) достигается при содержании алюмосиликатного компонента золы 1,5 % от массы гипса. Коэффициент водостойкости существенно ниже, чем при использовании метакаолина. Он не превышает значения 0,8 (рис. 1, 2).

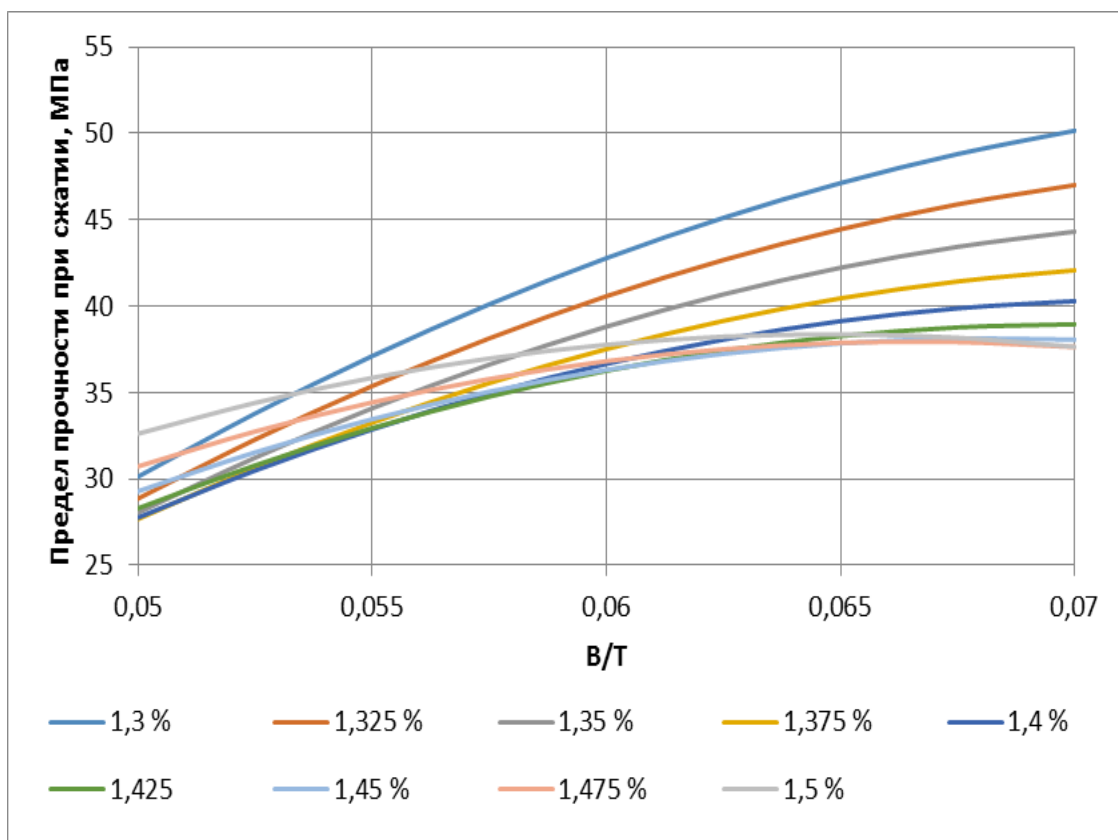


Рис. 1. Влияние водосодержания на прочность безобжигового композита, модифицированного добавкой топливной золы гидроудаления [14]

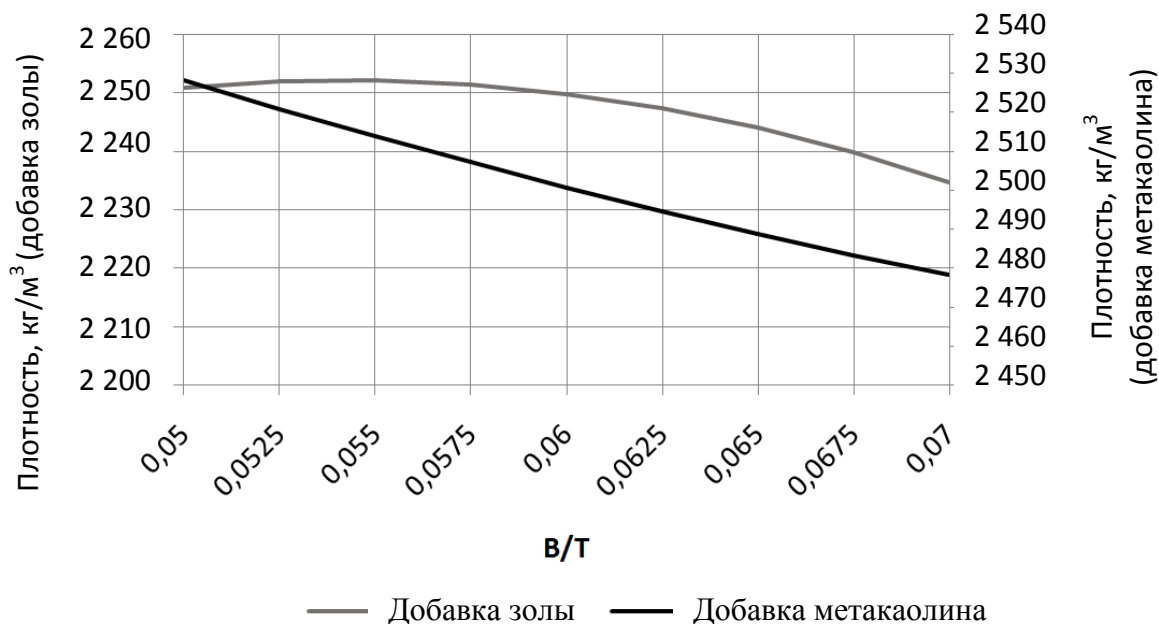


Рис. 2. Сравнительный анализ влияния водосодержания на среднюю плотность безобжигового композита, модифицированного добавками метаксаолина и топливной золы гидроудаления [14]

Наибольший эффект по прочности обеспечивает зольный модификатор, тогда как метаксаолин обеспечивает композициям высокую водостойкость и минимальное водопоглощение (1,81 %). Максимальная прочность гипсового камня с топливной золой гидроудаления (50 МПа) достигается при содержании добавки 1,4 %. Применение метаксаолина и обогащенной золы гидроудаления в качестве активных минеральных добавок в гипсовых композициях позволяет направленно формировать свойства получаемого материала и обеспечивать повышенные физико-механические и эксплуатационные свойства.

В статье [15] изучено влияние промышленных отходов, таких как зола-унос и измельченный гранулированный доменный шлак в составе автоклавных газобетонных блоков. Летучая зола, наряду с различными дозировками гранулированного доменного шлака, использовалась в качестве частичной замены цемента при производстве газобетона. Летучая зола действует как связующее и наполнитель в газобетоне, а также способствует процессу вторичной гидратации. Исследуемое процентное содержание летучей золы варьировалось в диапазоне 65–70 % по массе. Для улучшения вяжущих свойств газобетона применялся известковый порошок в количестве 5,5 % по массе. В работе молотый гранулированный доменный шлак также использовался как частичная замена цемента. Дозировка заменителя была установлена от 5 до 20 % (5 % шлака + 95 % цемента, 10 % шлака + 90 % цемента, 15 % шлака + 85 % цемента и 20 % шлака + 80 % цемента). Результаты экспериментальных исследований механических свойств образцов газобетона показали, что использование золы-уноса и добавки 15 % шлака + 85 % цемента увеличивает прочность на сжатие до 68,6 %. При этом водопоглощение автоклавного ячеистого бетона на основе летучей золы составляло от 18 до 20 %.

Роль пластификаторов при получении композиционных минеральных вяжущих с использованием высокодисперсных наполнителей (порошков золы, микрокремнезема, кремнеземсодержащих отходов) изучалась многими исследователями. Так, авторами статьи [16] рассматривался способ получения высокопрочного (КГВ) на основе портландцемента и функционально значимых активных минеральных добавок, роль которых заключалась в обеспечении долговечности композиционного гипсового камня. Проведенный сравнительный анализ влияния химических добавок (гиперпластификатора Melflux 2651F, суперпластификатора С-3, дозировка которых составила 0,5 % от массы вяжущего) на реологические свойства композиционного гипсового вяжущего (КГВ) показал, что снижение водопотребности модифицированных водно-дисперсных систем достигается в кремнеземсодержащих активных минеральных добавках при введении суперпластификатора С-3, и этот эффект составляет 54 % для микрокремнезема (МК), тогда как для золошлаковых отходов – 23,2 %. Высокая реологическая активность суперпластификатора С-3 в водной суспензии проявляется в МК, а гиперпластификатора Melflux 2651F – в золошлаковых отходах. Выявление роли микрокремнезема и суперпластификаторов при формировании структуры, свойств и стойкости цементного камня рассмотрено в статье [17]. В ходе работы был проведен двухфакторный эксперимент, в котором дозировка поликарбоксилатного суперпластификатора (АСЕ) варьировалась в количестве от 0 до 1 %, микрокремнезема – в количестве от 0 до 12 %. Высокие показатели прочности были у состава с 1 % АСЕ и 10 % МК (с наименьшим изменением количества адсорбционной воды и портландита). Использование поликарбоксилатных пластификаторов способствует формированию структуры искусственного камня из аморфизованных высокоосновных гидросиликатов кальция, отличающихся повышенной стойкостью и, как следствие, долговечностью. Оптимальное содержание пластифицирующей добавки варьируется от 0 до 1 % [16, 17]. Введение комплексного модификатора усиливает водоредуцирующий эффект и способствует получению высокопрочного КГВ на рядовых гипсовых и цементных вяжущих, а также увеличению его коэффициента размягчения.

С учетом особенностей новой технологии 3D-печати для повышения пластической прочности, адгезии и ускорения раннего структурообразования такие бетоны должны быть модифицированы специальными добавками [18]. В работе приведена классификация высокодисперсных минеральных компонентов, согласно которой они делятся на три группы. В первую входят реологически-активные (реакционно-латентные) добавки. Вторую группу составляют реакционно-активные добавки. Они не твердеют самостоятельно при затворении водой, но взаимодействуют с продуктами гидратации цемента с образованием дополнительных цементирующих соединений. Наконец, третья группа – это реологически- и реакционно-активные, самостоятельно твердеющие с водой минеральные компоненты. К этому классу относятся некоторые техногенные отходы металлургии и теплоэнергетики (золы и шлаки). При выборе сырья для производства бетонов нового поколения следует отдавать предпочтение минеральным компонентам третьей группы. Такое решение позволяет снизить себестоимость бетона, что обусловлено значительно меньшей стоимостью этих компонентов (так как они являются отходами других производств и зачастую дисперсными) и уменьшением номенклатуры применяемого сырья (снижаются затраты на хранение сырья, его переработку и дозирование).

В статье [19] были рассмотрены вопросы разработки композиционных вяжущих для 3D-печати, применяемой в строительной индустрии. В качестве одного из составляющих композиционных вяжущих была использована зола-уноса Апатитской ТЭЦ. Разработали ряд составов композиционных вяжущих, включающих суперпластификатор «Полипласт ПФМ-НЛК» в количестве 0,7 %, а также золу-уноса и отсев дробления кварцито-песчаника (последний применяется в качестве кремнеземсодержащего компонента). Был осуществлен их совместный помол до удельной поверхности  $500 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Результаты испытаний композиционных вяжущих на основе техногенного сырья, содержащих 60–70 % портландцемента, свидетельствуют о существенном снижении расхода клинкерной составляющей в составе этих вяжущих при обеспечении заданных характеристик. Отмечается позитивная динамика композиционного вяжущего при совместном влиянии тонкодисперсных составляющих золы, отсева дробления кварцито-песчаника и суперпластификатора.

Содержание в геополимерных композициях высокодисперсной алюмосиликатной стеклофазы способствует повышению плотности материала, а также улучшению реологических характеристик сырьевых смесей. За счет сферической формы частиц алюмосиликатных фаз золы снижается трение при формовании, следовательно, снижается водопотребность смесей, улучшаются физико-механические характеристики затвердевшего камня [13, 14]. На свойства геополимера на основе золы-уноса с большим содержанием аморфной стеклофазы может благоприятно влиять введение сернокислого калия. Введение соли  $\text{K}_2\text{SO}_4$  в пределах до 5 % способствует активации эффузивного алюмосиликатного сырья кислого состава со скрытокристаллической структурой [11].

Проблема расширения ассортимента материалов для 3D-печати рассматривается авторами статьи [20] в связи с ограниченным выбором сырья. Решением данной проблемы может служить применение щелочеактивированных, в частности геополимерных, систем для 3D-принтинга строительных объектов. Основными критериями пригодности щелочеактивированных систем и геополимеров для использования в аддитивном производстве следует выделить требуемую подвижность в процессе принтинга, быстрые сроки схватывания/твердения, сохраняемость получаемой трехмерной структуры во времени в процессе твердения и дальнейшей эксплуатации в натуральных условиях.

Композиционное гипсовое вяжущее, применяемое в 3D-принтинге, – это вяжущее нового поколения, свойства которого определяются комплексом неорганических и органических добавок, вводимых в состав композиции. В качестве минеральных добавок могут использоваться кварцсодержащие компоненты различных генетических типов, в том числе нано- и микродисперсные минеральные добавки из отходов горно-обогатительного производства, полученных путем мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов, а также добавки из гидротермальных источников вулканогенных областей, полученные выделением из гидротермальных растворов нано- и микрочастиц кремнезема. Такие минеральные добавки способствуют эффективному управлению процессами структурообразования, обеспечивая высокое качество быстротвердеющих композиционных гипсовых вяжущих и изделий на их основе.

Одним из наиболее эффективных модификаторов в композиционных вяжущих на основе гипса является высокодисперсный попутный продукт производства ферросилиция. Введение микрокремнезема в гипсовые и гипсоцементно-пуццолановые вяжущие, в силу специфической морфологии новообразований, приводит к существенному приросту прочности (до 30 МПа) и повышению водостойкости композитов (до 0,8). Применение

таких композиций для 3D-строительных технологий, возможно, повысит точность возведения зданий и многократно сократит сроки их строительства. Автоматизация ручного труда даст возможность сократить число строительных рабочих и минимизировать риск производственных травм. 3D-печать гипсобетоном будет также полезна для строительства домов в местностях, пострадавших от стихийных бедствий, в бедных развивающихся странах, а также в случаях, когда требуется за короткое время обеспечить жильем большое количество людей [21].

Таким образом, анализ литературных источников показал, что использование золошлаковых отходов в качестве компонентов геополимерных композитов, с одной стороны, экономически выгодно и целесообразно, поскольку экономятся природные ресурсы и энергия на их обработку, с другой – эффективно для получения новых видов строительных материалов и их модификаций, удовлетворяющих всем современным требованиям.

На основе проведенного обзора и анализа многочисленных отечественных и зарубежных исследований было установлено, что применение высококальциевой топливной золы-уноса в качестве компонента геополимерных вяжущих является одним из универсальных способов получения эффективных и экономичных строительных материалов, хотя известны и результаты успешного применения низкокальциевых зол в геополимерах.

Литературные источники практически не содержат сведений об исследованиях процесса применения отдельных компонентов, выделенных из состава золошлаковых отходов в ходе переработки. Отсутствует информация об утилизации в геополимерных композициях алюмосиликатных компонентов золошлаковых смесей гидроудаления, выделенных методом флотации. В основу таких исследований должны быть положены данные физико-химического и структурного анализа.

### БЛАГОДАРНОСТИ

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бебина Г.А. Геополимерные вяжущие и бетоны на их основе // *Вузовская наука в современных условиях: Сборник материалов 56-й научно-технической конференции*. Ульяновск: УлГТУ. 2022. С. 110–113.
2. Ерошкина Н.А., Коровкин М.О., Лавров И.Ю. Влияние минерального сырья на прочность геополимерных строительных материалов // *E-Scio*. 2019. № 12 (39). С. 549–556.
3. Батуев Н.И., Калинина Е.В. Использование вторичных материальных ресурсов в производстве геополимерных бетонов // *Химия. Экология. Урбанистика*. 2021. Т. 1. С. 226–229.
4. Изучение влияния новых синтезированных органических добавок на свойства полученного геополимера / Э.С. Соттикулов, А.Т. Джалилов, М.У.У. Каримов, А.Т. Тиллаев // *Universum: технические науки*. 2020. № 7-3 (76). С. 36–38.

5. Теоретические аспекты создания композиционного наноструктурированного гипсового вяжущего повышенной жаростойкости / А.В. Череватова, И.В. Жерновская, Д.А. Алехин, М.И. Кожухова, Н.И. Кожухова, Е.А. Яковлев // *Строительные материалы и изделия*. 2019. Т. 2. № 4. С. 5–13.
6. Нагорный М.В., Теличенко А.И., Теличенко Н.А. Бесцементные строительные материалы на основе ВКВС (вяжущего компонента высококонцентрированных вяжущих систем) // *International Scientific and Practical Conference World science*. 2018. Т. 1. № 1 (29). С. 70–77.
7. Муртазаев С.А.Ю., Саламанова М.Ш., Аласханов А.Х. Вяжущие щелочной активации как альтернатива портландцементу // *Инновации в строительстве – 2017: Материалы Международной научно-практической конференции*. Брянск: БГИТУ. 2017. С. 92–96.
8. Mahantesh N.B., Amarnath. K., Raghuprasad B.K. Ductility of Fly Ash – Slag Based Reinforced Geopolymer Concrete Elements Cured at Room Temperature // *MATEC Web of Conferences*. 2017. № 138 (9): 01003.
9. Miryuk O., Fediuk R., Amran M. Porous Fly Ash / Aluminosilicate Microspheres-Based Composites Containing Lightweight Granules Using Liquid Glass as Binder // *Polymers*. 2022. № 14. P. 3461.
10. Салиева М.Г. Некоторые аспекты использования золы гидроудаления в строительной индустрии // *Материаловедение*. 2019. № 2 (30). С. 101–103.
11. Получение геополимеров с использованием механоактивированной смеси золы уноса с кальцитом и жидкого стекла / А.М. Калинин, Б.И. Гуревич, Е.В. Калининна, О.А. Залкин, А.Г. Иванова, Е.А. Кругляк // *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. 2021. № 18. С. 193–197.
12. Байменова Г.Р. Гипсозольные композиции // *Евразийское Научное Объединение*. 2019. № 6-2 (52). С. 70–73.
13. Хворостухин А.О., Доманская И.К. Повышение экологической эффективности водостойких гипсовых вяжущих веществ // *Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: Материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти профессора Данилова Н.И. (1945–2015) – Даниловских чтений (Екатеринбург, 10–14 декабря 2018 г.)*. Екатеринбург: УрФУ. 2018. С. 603–606.
14. Применение метакаолина и золы гидроудаления в безобжиговых гипсовых композитах / В.Б. Петропавловская, М.Ю. Завадько, Т.Б. Новиченкова, К.С. Петропавловский // *Строительные материалы*. 2021. № 8. С. 11–17.
15. Performance Investigation of the Incorporation of Ground Granulated Blast Furnace Slag with Fly Ash in Autoclaved Aerated Concrete / V.A.R. Bernard, S.M. Renuka, S. Avudaiappan, C. Umarani, M. Amran, P. Guindos, R. Fediuk, N.I. Vatin // *Crystals*. 2022. № 12 (8). P. 1024.
16. Структура и свойства цементного камня с модификаторами / К.В. Шулдяков, Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, А.М. Махмудов // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2020. Т. 20. № 2. С. 54–64.

17. Сагдатуллин Д.Г., Морозова Н.Н., Хозин В.Г. Реологические характеристики водных суспензий композиционного гипсового вяжущего и его компонентов // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2009. № 2 (12). С. 263–268.
18. Шведова М.А., Артамонова О.В., Славчева Г.С. Вопросы регулирования составов цементных смесей для строительной 3D-печати // *Химия, физика и механика материалов*. 2020. № 1 (24). С. 95–120.
19. Ключев С.В., Ключев А.В., Шорстова Е.С. Композиционные вяжущие для фибробетонов, применяемых для 3-D печати // *Системные технологии*. 2019. № 1 (30). С. 47–51.
20. Кожухова Н.И., Кожухова М.И., Шураков И.М. К вопросу о применении щелочеактивированных вяжущих систем в технологии 3D-печати // *Международная научно-техническая конференция молодых ученых*. Белгород: БГТУ. 2020. С. 1415–1420.
21. Дребезгова М.Ю., Лесовик В.С. Применение композиционного гипсового вяжущего в 3D-технологиях стройиндустрии // *Эффективные строительные композиты: научно-практическая конференция к 85-летию Баженова Ю.М.* Белгород: БГТУ. 2015. С. 151–157.

#### 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

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

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

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

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Бабаев Д.Д., Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С., Завадько М.Ю. Обзор: геополимерные вяжущие на основе золы ТЭС // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 3 (19). С. 5–19.



**OVERVIEW: GEOPOLYMER BINDERS BASED ON TPP ASH**

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

**Abstract.** The article considers the possibility of using cement-free binders as a replacement for Portland cement. It is established that the synthesis of geopolymer systems is a promising direction for the creation of a cement-free binder. It is shown that the most common raw materials for geopolymers today are waste from the fuel and energy (TPP ash) and metallurgical (slag) industries. Two types of alkaline compounds are used as an activator of the geopolymerization process: alkali – NaOH and KOH; sodium, potassium or mixed liquid glass. It is noted that the introduction of a highly dispersed aluminosilicate glass phase of hydraulic removal ash contributes to increasing the density of the material, as well as improving the rheological characteristics of raw mixtures.

**Keywords:** geopolymers, cement-free binders, hydraulic removal ash, slag, strength, water resistance, environmental friendliness.

**REFERENCES**

1. Bebina G.A. Geopolymer binders and concretes based on them. *University science in modern conditions. Collection of materials of the 56th Scientific and Technical Conference. In 2 parts.* Ulyanovsk: UISTU. 2022, pp. 110–113. (In Russian).
2. Eroshkina N.A., Korovkin M.O., Lavrov I.Yu. The influence of mineral raw materials on the strength of geopolymer building materials. *E-Scio.* 2019. No. 12 (39), pp. 549–556. (In Russian).
3. Batuev N.I., Kalinina E.V. The use of secondary material resources in the production of geopolymer concrete. *Himiya. Ekologiya. Urbanistika.* 2021. Vol. 1, pp. 226–229. (In Russian).
4. Study of the effect of new synthesized organic additives on the properties of the resulting geopolymer / E.S. Sottikulov, A.T. Jalilov, M.U.U. Karimov, A.T. Tillaev *Universum: tekhnicheskie nauki.* 2020. No. 7-3 (76), pp. 36–38. (In Russian).
5. Theoretical aspects of creating a composite nanostructured gypsum binder of increased heat resistance / A.V. Cherevatova, I.V. Zhernovskaya, D.A. Alekhin, M.I. Kozhukhova, N.I. Kozhukhova, E.A. Yakovlev. *Stroitel'nye materialy i izdeliya.* 2019. Vol. 2. No. 4, pp. 5–13. (In Russian).
6. Nagorny M.V., Telichenko A.I., Telichenko N.A. Cement-free building materials based on VKVS (binder component of highly concentrated binder systems). *International Scientific and Practical Conference World science.* 2018. Vol. 1. No. 1 (29), pp. 70–77. (In Russian).
7. Murtazaev S.A.Yu., Salamanova M.Sh., Alaskhanov A.H. Alkaline activation binders as an alternative to Portland cement. *Innovations in construction – 2017: Materials of the International scientific and practical conference.* Bryansk: BGITU. 2017, pp. 92–96. (In Russian).
8. Mahantesh N.B., Amarnath. K., Raghuprasad B.K. Ductility of Fly Ash – Slag Based Reinforced Geopolymer Concrete Elements Cured at Room Temperature. *MATEC Web of Conferences.* 2017. № 138 (9), pp. 01003.
9. Miryuk O., Fediuk R., Amran M. Porous Fly Ash / Aluminosilicate Microspheres-Based Composites Containing Lightweight Granules Using Liquid Glass as Binder. *Polymers.* 2022. No. 14, pp. 3461.

10. Salieva M.G. Some aspects of the use of hydraulic ash in the construction industry. *Materialovedenie*. 2019. No. 2 (30), pp. 101–103. (In Russian).
11. Production of geopolymers using a mechanically activated mixture of fly ash with calcite and liquid glass / A.M. Kalinkin, B.I. Gurevich, E.V. Kalinkina, O.A. Zalkind, A.G. Ivanova, E.A. Kruglyak. *Proceedings of the Fersman scientific session of the GI KNC RAS*. 2021. No. 18, pp. 193–197. (In Russian).
12. Baymenova G.R. Gypsum compositions. *Evrazijskoe Nauchnoe Ob"edinenie*. 2019. No. 6–2 (52), pp. 70–73. (In Russian).
13. Khvorostukhin A.O., Domanskaya I.K. Improving the environmental efficiency of waterproof gypsum binders. *Energy and resource conservation. Energy supply. Non-traditional and renewable energy sources. Nuclear power engineering*. Yekaterinburg: UrFU. 2018, pp. 603–606. (In Russian).
14. The use of metakaolin and hydraulic removal ash in non-burnt gypsum composites / V.B. Petropavlovskaya, M.Yu. Zavadko, T.B. Novichenkova, K.S. Petropavlovskii. *Stroitel'nye materialy*. 2021. No. 8, pp. 11–17. (In Russian).
15. Performance investigation of the incorporation of ground granulated blast furnace slag with fly ash in autoclaved aerated concrete / V.A.R. Bernard, S.M. Renuka, S. Avudaiappan, C. Umarani, M. Amran, P. Guindos, R. Fediuk, N.I. Vatin. *Crystals*. 2022. No. 12 (8). P. 1024.
16. Structure and properties of cement stone with modifiers / K.V. Shuldyakov, L.Ya. Kramar, B.Ya. Trofimov, A.M. Makhmudov. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*. 2020. Vol. 20. No. 2, pp. 54–64. (In Russian).
17. Sagdatullin D.G., Morozova N.N., Khozin V.G. Rheological characteristics of aqueous suspensions of composite gypsum binder and its components. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2009. No. 2 (12), pp. 263–268. (In Russian).
18. Shvedova M.A., Artamonova O.V., Slavcheva G.S. Issues of regulation of compositions of cement mixtures for construction 3-D printing. *Himiya, fizika i mekhanika materialov*. 2020. No. 1 (24), pp. 95–120. (In Russian).
19. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Shorstova E.S. Composite binders for fiber-reinforced concrete used for 3-D printing. *Sistemnye tekhnologii*. 2019. No. 1 (30), pp. 47–51. (In Russian).
20. Kozhukhova N.I., Kozhukhova M.I., Shurakov I.M. On the use of alkali-activated binding systems in 3-D printing technology. *International Scientific and Technical Conference of Young Scientists*. Belgorod: BSTU. 2020, pp. 1415–1420. (In Russian).
21. Drebezgova M.Yu., Lesovik V.S. Application of composite gypsum binder in 3d technologies of the construction industry. *Effective building composites: Scientific and practical conference dedicated to the 85th anniversary of Honored Scientist of the Russian Federation, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences Bazhenov Yuri Mikhailovich. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. Belgorod: BSTU. 2015, pp. 151–157. (In Russian).

#### 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.

#### CITATION FOR AN ARTICLE

Babaev D.D., Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Petropavlovskii K.S., Zavadko M.Yu. Overview: geopolymer binders based on TPP ash // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 3 (19), pp. 5–19.

**УДК 691.11**

### **БИОКОМПОЗИТЫ СТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ ДЕРЕВООБРАБОТКИ. ЧАСТЬ 3 (ПОДБОР СОСТАВОВ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННОГО ОПИЛКОБЕТОНА)**

***В.В. Белов***

*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Белов В.В., 2023

**Аннотация.** Изучены способы применения отходов деревообработки, перспективы их использования в качестве заполнителя для легких бетонов и других строительных материалов. С использованием математических моделей разработаны малоэнергоемкие составы опилкобетона. Отмечено, что при этом достигается сокращение расхода цемента до 30 %, снижение материалоемкости строительных конструкций, энергозатрат на их производство и снижение себестоимости композитов на основе отходов деревообработки по сравнению с аналогичными материалами на 30–35 %. Указано, что в процессе использования в качестве основного сырья отходов деревообработки образуется дополнительный энергосберегающий и экологический эффект. Подчеркнуто, что благодаря эффективному использованию сырья ожидается снижение себестоимости продукции на 18–20 %.

**Ключевые слова:** отходы деревообработки, опилкобетон, древесный заполнитель, составы, свойства.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-3-19-33**

## ВВЕДЕНИЕ

Предварительные исследования по теме использования опилкобетона [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] после 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, дающих возможность экономить энергоноситель и исходное сырье, улучшать физико-механические и санитарно-гигиенические свойства материалов, избегать применения дефицитных и в некоторых случаях вредных химических веществ.

Показано, что с современных позиций наиболее перспективным методом предварительной обработки древесного сырья является обработка биологическая. 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. Такая обработка древесного сырья может привести к получению строительных материалов, удовлетворяющих требованиям стандарта, даже на основе широко распространенных отходов деревообработки – опилок. Биоремедиация опилок по разработанному способу значительно (в два раза и более) снижает содержание в них сахаров, что способствует получению образцов опилкобетона с плотностью, соответствующей плотности легких бетонов, и с достаточной прочностью на сжатие. Были получены опытные образцы биологически активированного древесного заполнителя и определены основные физико-химические свойства.

Целью данного исследования являлась разработка оптимальных составов биологически активированного опилкобетона с использованием математических моделей.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве древесного заполнителя древесно-цементной композиции применялись опилки древесины хвойных пород, которые были подвергнуты биологической обработке субстратом животного происхождения (отходом животноводства) для снижения водорастворимых редуцирующих веществ – полисахаридов.

В настоящей работе использовали портландцемент марки по прочности 500 без добавок (ПЦ 500-Д0) и с минеральными добавками (ПЦ 500-Д20) по ГОСТ 10178-85.

---

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

Для ускорения твердения цемента и уменьшения отрицательного влияния полисахаридов, оставшихся после биологической обработки древесного заполнителя, в состав древесно-цементной композиции вводили хлорид кальция (ХК) в количестве 2 % от массы цемента.

В сырьевую смесь с целью изготовления опытных образцов биологически активированного опилкобетона вводили также добавки антисептика «Боранс» и антипирена «Диафос» (50%-й концентрации) производства ООО «Гексагон» (г. Тверь). Добавку антисептика «Боранс» брали в количестве 0,25 % от массы сухих опилок, а добавку антипирена «Диафос» – в количестве 0,5 % от массы сухих опилок.

Базовые два состава теплоизоляционного и теплоизоляционно-конструкционного биокомпозита были определены в исследованиях [1–5] и составили соответственно 62,5 % опилок в пересчете на сухое вещество и 37,5 % субстрата животного происхождения (I состав), 50 % опилок и 50 % субстрата (II состав).

Согласно плану эксперимента, после дозирования компонентов сырьевой смеси в расчете на опытный замес смесь перемешивалась в лабораторном смесителе в течение 3 мин.

При изготовлении сырьевой смеси с добавками антисептика и антипирена тщательно перемешивали цемент с песком, а затем с опилками. Добавляли часть воды затворения ( $\approx 2/3$  от общего количества) с растворенным в ней хлористым кальцием и «Борансом» и перемешивали 3 мин. В оставшейся части воды ( $\approx 1/3$  от общего количества) растворяли «Диафос», эту воду добавляли в смесь, после чего ее перемешивали в течение 1 мин.

Из сырьевой смеси в соответствии с ГОСТ 19222 путем трамбования формовали образцы для испытаний в стальных формах-кубах размером 10×10×10 см. Для этого смесь укладывали в форму в два слоя и уплотняли 15–20 нажимами стальной болванкой по размеру формы с высоты 2–3 см.

Образцы твердели при комнатной температуре в течение 7 сут, после чего взвешивались, обмерялись и высушивались при температуре 80 °С до постоянной массы. В части экспериментов с целью ускорения твердения материала образцы обрабатывались 7 сут в сушильном шкафу при температуре 40–50 °С. Контрольные образцы опытных партий опилкобетона, выпущенных на действующем макете технологической установки, в соответствии с ГОСТ 19222-84 испытывали после 28 сут твердения в нормальных условиях.

Предел прочности на сжатие опилкобетона определяли в соответствии с ГОСТ 10180. Среднюю плотность образцов устанавливали по ГОСТ 12730.1. Влажность образцов определяли на кусках, оставшихся после их разрушения, по ГОСТ 12730.2. Морозостойкость устанавливали методом однократного замораживания по ГОСТ 10060.5-90 с помощью прибора «Бетон-Фрост» на образцах-кубах с размером ребра 100 мм в высушенном состоянии.

Теплопроводность опилкобетона определяли по ГОСТ 7076 с помощью прибора ИТП-МГ4 на образцах, высушенных до постоянной массы при температуре 105 °С. Перед испытаниями образцы выдерживались не менее 1 ч при температуре помещения, в котором проводились испытания (23 °С). Образцы для определения теплопроводности изготавливали в виде пластин размером 100×100 мм и толщиной около 30 мм.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Для построения математических моделей вида «состав – свойства» для биокомпозита на активированном заполнителе использовался трехфакторный нелинейный планированный эксперимент типа В-D<sub>13</sub>. На основе предварительных опытов были установлены границы изменения факторов: 1) отношения по массе опилок (по сухой навеске) и цемента (О/Ц) – от 0,65 до 0,85; 2) отношения массы воды затворения к суммарной массе сухого древесного заполнителя и цемента (В/М) – от 0,80 до 1,00; 3) содержание добавки ХК по отношению к суммарной массе сухого древесного заполнителя и цемента – от 1 до 3 %.

План эксперимента приведен в табл. 1.

Таблица 1

План эксперимента и результаты испытаний образцов опилкобетона

Номер серии	План			Уровни факторов			Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие, МПа
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	О/Ц	В/М	ХК		
1	-1	-1	-1	0,65	0,80	1	607	0,60
2	+1	-1	-1	0,85	0,80	1	585	0,60
3	-1	+1	-1	0,65	1,00	1	697	1,07
4	-1	-1	+1	0,65	0,80	3	710	2,05
5	-1	0,19	0,19	0,65	0,919	2,19	740	1,67
6	0,19	-1	0,19	0,769	0,80	2,19	710	1,47
7	0,19	0,19	-1	0,769	0,919	1	677	0,72
8	-0,29	+1	+1	0,721	1,00	3	770	1,47
9	+1	-0,29	+1	0,85	0,871	3	690	1,85
10	+1	+1	-0,29	0,85	1,00	1,71	645	1,25

После определения оптимального состава биокомпозита для сравнения и выявления эффекта биологического активирования древесного заполнителя в тех же условиях и с тем же составом были изготовлены образцы на исходных опилках. Испытания этих образцов производились параллельно с испытаниями опытных образцов.

По результатам планированного эксперимента (см. табл. 1) построены математические модели зависимостей плотности  $\rho_0$  (кг/м<sup>3</sup>) и прочности на сжатие  $R_{сж}$  (МПа) биокомпозита от его состава:

$$\rho_0 = 737,7 - 30,9x_1 + 18,1x_2 + 39,9x_3 - 42,4x_1^2 - 17,7x_1x_2 - 2,3x_1x_3 - 14,5x_2^2 - 9,2x_2x_3 - 18,0x_3^2;$$

$$R_{сж} = 1,37 - 0,06x_1 - 0,02x_2 + 0,5x_3 + 0,15x_1^2 - 0,05x_1x_2 - 0,02x_1x_3 - 0,05x_2^2 - 0,2x_2x_3 - 0,18x_3^2,$$

где  $x_1 = \frac{О/Ц - 0,75}{0,1}$ ;  $x_2 = \frac{В/М - 0,9}{0,1}$ ;  $x_3 = \frac{ХК - 2}{1}$ .

Число значимых коэффициентов в первой модели составило 5, а во второй – 7. Критерий Фишера для первой модели равен 0,92, для второй – 3,27. Таким образом,

модели зависимостей плотности и прочности от состава адекватны (табличное значение критерия Фишера  $F_{\text{табл}} = 4,53$ ).

На рис. 1–3 приведены графики зависимостей прочности на сжатие и средней плотности опилкобетона на биологически активированном заполнителе соответственно от опилкоцементного отношения О/Ц, водотвердого отношения В/М и содержания ХК. Графики построены по математическим моделям соответствующих зависимостей.

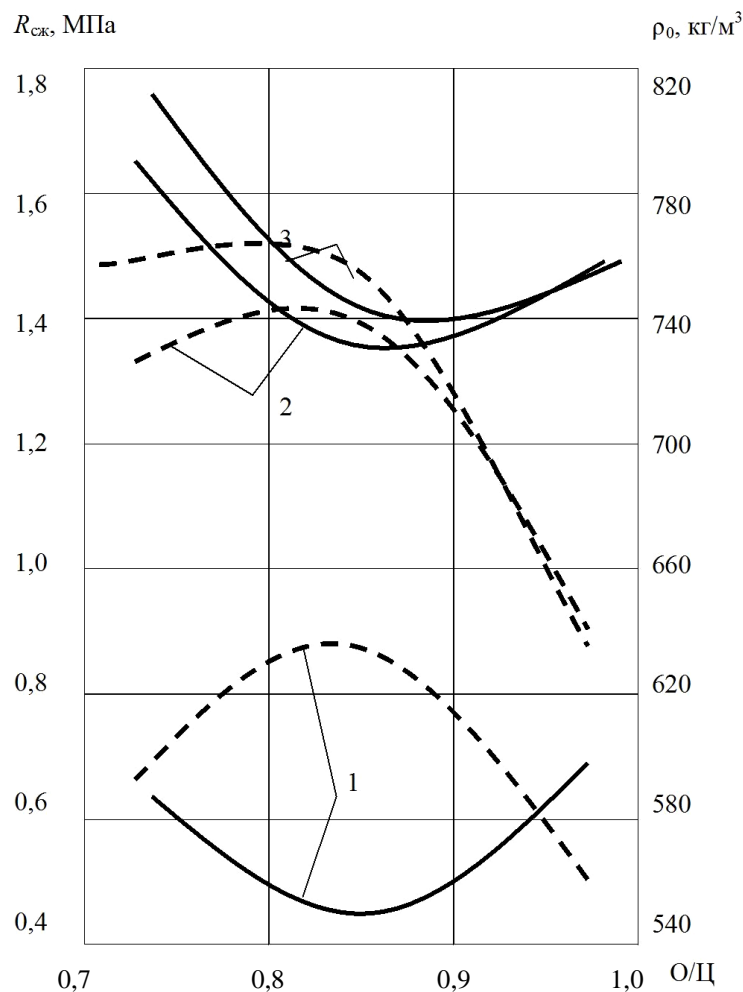


Рис. 1. Влияние О/Ц на прочность при сжатии  $R_{сж}$  (сплошная линия) и среднюю плотность  $\rho_0$  (пунктир) опилкобетона на биологически активированном заполнителе:  
1 – В/М = 0,8; ХК = 1; 2 – В/М = 0,9; ХК = 2; 3 – В/М = 1,0; ХК = 3

Полученные зависимости позволяют выявить наиболее значимые факторы состава биокомпозита, характер их влияния на основные физико-механические свойства материала. Данные показывают, что наилучшее сочетание свойств (увеличение прочности и одновременное снижение средней плотности) достигается за счет увеличения добавки ХК в исследованных пределах при минимально допустимом (из технологических соображений) количестве воды затворения и максимально возможном содержании в смеси

опилок. В то же время максимальная прочность композита соответствует наибольшему в исследованном диапазоне количеству цемента в сырьевой смеси.

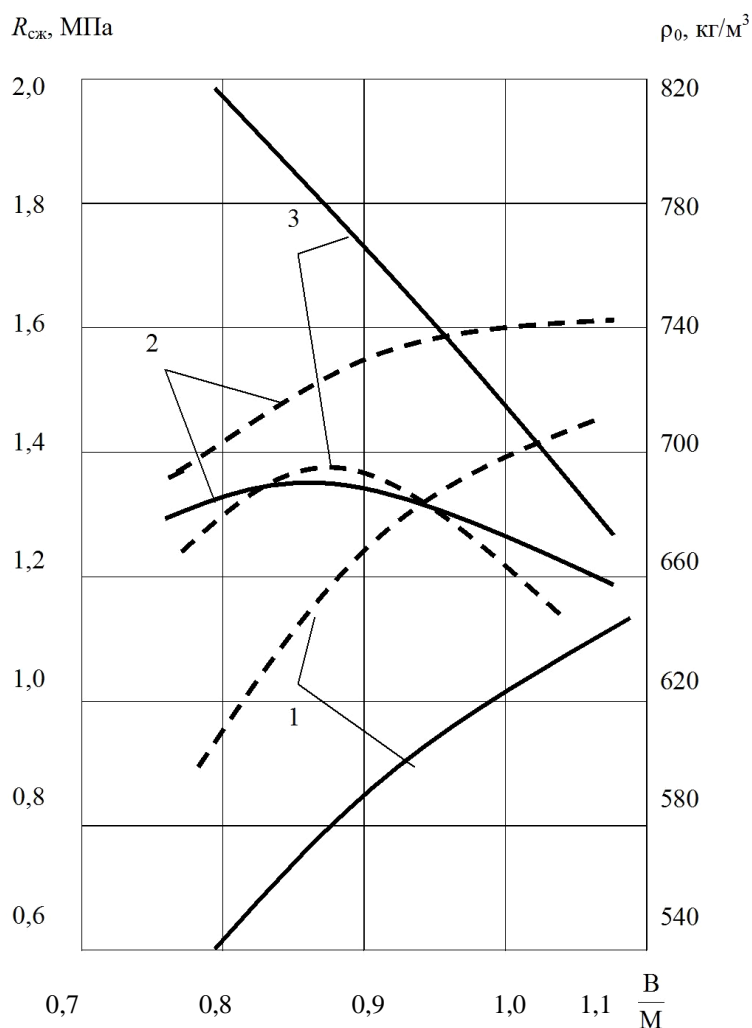


Рис. 2. Влияние В/М на прочность при сжатии  $R_{сж}$  (сплошная линия) и среднюю плотность  $\rho_0$  (пунктир) опилкобетона на биологически активированном заполнителе:  
1 – О/Ц = 0,75; ХК = 1; 2 – О/Ц = 0,85; ХК = 2; 3 – О/Ц = 0,95; ХК = 3

Оптимальные составы опилкобетона различного назначения наиболее целесообразно определять путем оптимизации математических моделей по критериям значимых свойств. Оптимизация полученных квадратичных математических моделей производилась по минимуму средней плотности (первая модель) и максимуму прочности на сжатие (вторая модель) с помощью диссоциативно-шагового метода оптимизации [8]. Результаты оптимизации математических моделей приведены в табл. 2.



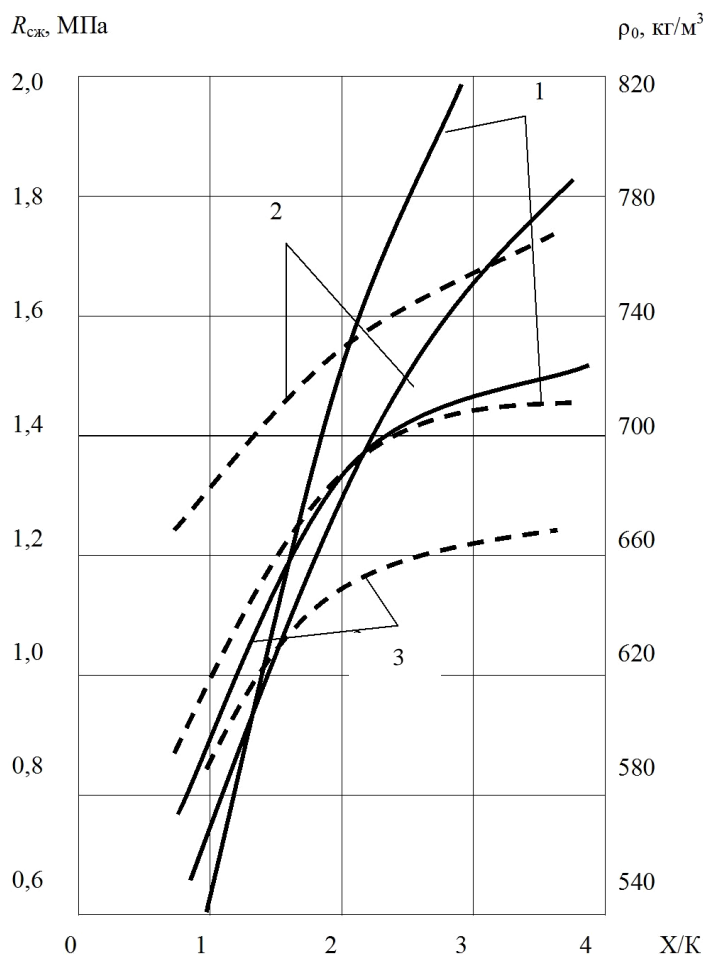


Рис. 3. Влияние содержания ХК на прочность при сжатии  $R_{сж}$  (сплошная линия) и среднюю плотность  $\rho_0$  (пунктир) опилкобетона на биологически активированном заполнителе:  
1 – О/Ц = 0,75; В/М = 0,8; 2 – О/Ц = 0,85; В/М = 0,9; 3 – О/Ц = 0,95; В/М = 1,0

Таблица 2

Оптимальные значения факторов состава биокомпозита по различным критериям оптимальности

Критерий оптимальности	Расчетные значения		О/Ц	В/М	$\frac{XK - 2}{1}$
	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие, МПа			
Минимум плотности	584,7	0,62	1	-1	-1
Максимум прочности на сжатие	709	2,04	-1	-1	1

Сравнение расчетных показателей свойств биокompозита (см. табл. 2) с требованиями ГОСТ 19222 для арболита показывает, что состав, определенный по критерию минимальной плотности, соответствует требованиям к теплоизоляционному арболиту. Если учесть, что прочность арболита после 7-суточного твердения составляет 60–70 % от марочной прочности, то марка по прочности этого состава – М10, а класс по прочности на сжатие – В0,75.

Состав, определенный по критерию максимальной прочности на сжатие, соответствует требованиям ГОСТ 19222 по данному показателю к теплоизоляционно-конструкционному арболиту. Марка по прочности этого состава – М25, а класс по прочности на сжатие – В2.

Значительное влияние на содержание редуцирующих веществ в обработанных опилках и прочность опилкобетона оказывает соотношение субстрата животного происхождения и опилок в исходной смеси, а также содержание в ней воды. С целью выявления оптимальных значений этих параметров был поставлен планированный двухфакторный эксперимент типа В-D<sub>23</sub>. Границы изменения факторов установили в следующих пределах:  $X_1$  – отношение по массе субстрата животного происхождения и опилок (по сухой навеске) (Н/О) – от 0,60 до 1,0;  $X_2$  – отношение массы воды затворения к суммарной массе сухого древесного заполнителя и субстрата животного происхождения (В/М) – от 0,50 до 0,70. Составы обрабатывались параллельно в одном биореакторе при температуре 42 °С в течение 5 сут.

План и результаты эксперимента приведены в табл. 3.

Таблица 3

План эксперимента и результаты испытаний образцов опилкобетона

Номер серии	План		Уровни факторов		Содержание редуцирующих веществ, %	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности на сжатие, МПа
	$X_1$	$X_2$	Н/О	В/М			
1	–1	–1	0,6	0,5	0,436	490	0,49
2	+1	–1	1,0	0,5	0,362	510	0,58
3	–1	+1	0,6	0,7	0,412	500	0,53
4	+1	+1	1,0	0,7	0,364	520	0,58
5	–1	0	0,6	0,6	0,336	530	0,60
6	+1	0	1,0	0,6	0,315	550	0,65
7	0	–1	0,8	0,5	0,418	500	0,55
8	0	+1	0,8	0,7	0,350	540	0,67
9	0	0	0,8	0,6	0,313	560	0,69

С уменьшением содержания редуцирующих веществ в обработанных опилках прочность опилкобетона закономерно увеличивается (рис. 4). При этом оптимальные значения отношения по массе субстрата животного происхождения и опилок (по сухой навеске) и отношения массы воды затворения к суммарной массе сухого древесного заполнителя и субстрата животного происхождения составляют соответственно Н/О = 0,8

и  $V/M = 0,7$ , а это оптимальные параметры данного процесса твердофазной биоферментации.

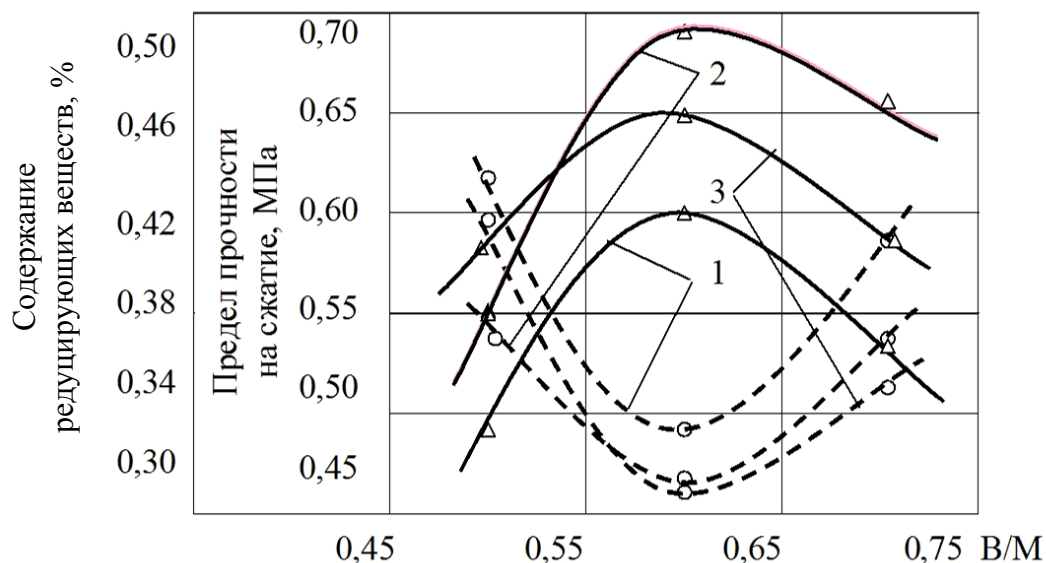


Рис. 4. Содержание редуцирующих веществ в обработанных опилках (пунктир) и предел прочности на сжатие (сплошная линия)

в зависимости от отношения массы воды затворения к суммарной массе сухого древесного заполнителя и субстрата животного происхождения  $V/M$  при разном отношении по массе навоза и опилок: 1 –  $H/O = 0,6$ ; 2 –  $H/O = 0,8$ ; 3 –  $H/O = 1,0$

Подобранный состав теплоизоляционно-конструкционного опилкобетона характеризуется высокими физико-механическими свойствами, соответствующими требованиям ГОСТ 19222 к теплоизоляционно-конструкционному арболиту. Марка по прочности этого состава – М25, а класс по прочности на сжатие – В2. В то же время сравнительно высокий расход цемента на  $1 \text{ м}^3$  бетона (394 кг) обуславливает недостаточную экономическую эффективность такого материала. В связи с этим в данной работе была проведена оптимизация состава теплоизоляционно-конструкционного опилкобетона путем введения в него мелкого заполнителя – песка, который способен заменить часть цемента и создать жесткий каркас, повышающий упругие свойства материала, необходимые для осуществления конструкционной функции.

Исследователи поставили планированный двухфакторный эксперимент и получили зависимости насыпной плотности сухой опилкобетонной смеси от относительного содержания в смеси цемента, песка и опилок, с помощью которых по критерию максимальной плотности упаковки составляющих определили области возможных оптимальных составов. План и основные результаты эксперимента приведены в табл. 4 ( $X_1$  – относительное содержание цемента в сухой смеси цемента, песка и опилок в кодированном виде;  $X_2$  – относительное содержание песка в сухой смеси цемента, песка и опилок в кодированном виде). Диаграмма линий равного уровня насыпной плотности, построенная по полученной математической модели зависимости насыпной плотности сухой смеси от ее состава и представленная на рис. 5, позволяет обосновать оптимальное

соотношение между цементом и песком в сырьевой смеси (1 : 1), соответствующее ее максимальной насыпной плотности в сухом состоянии.

Таблица 4

План эксперимента и данные о зависимости насыпной плотности сухой опилкобетонной смеси от ее состава

№ п/п	План		Относительное содержание в смеси, %			Насыпная плотность сухой смеси, кг/м <sup>3</sup>
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	цемента	песка	сухих опилок	
1	-1	-1	35	35	30	423
2	+1	-1	45	35	20	565
3	-1	+1	35	45	20	570
4	+1	+1	45	45	10	868
5	-1	0	35	40	25	483
6	+1	0	45	40	15	695
7	0	-1	40	35	25	493
8	0	+1	40	45	15	703
9	0	0	40	40	20	580

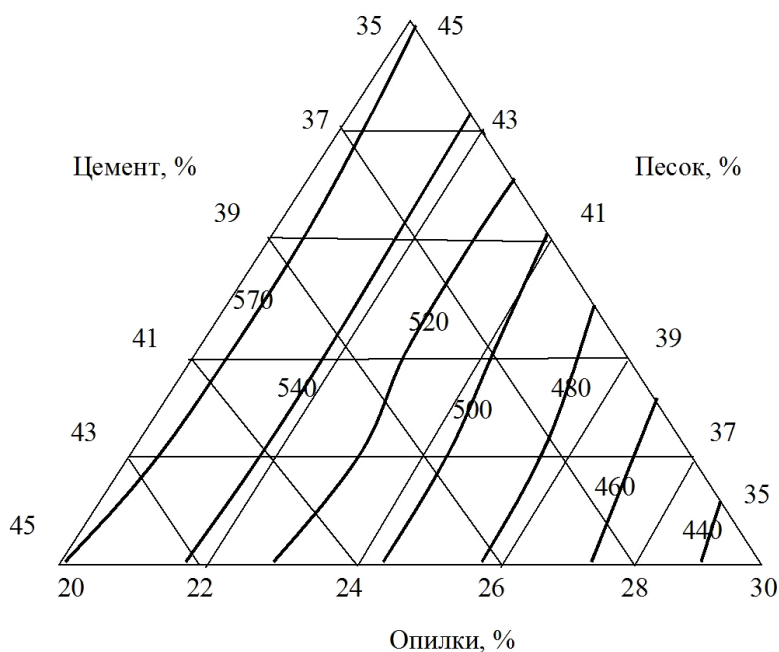


Рис. 5. Диаграмма линий равного уровня насыпной плотности смесей в сухом состоянии в зависимости от их состава

На следующем этапе оптимизации был поставлен планированный двухфакторный эксперимент по подбору состава теплоизоляционно-конструкционного опилкобетона. План эксперимента и результаты определения физико-механических свойств опилкобетона приведены в табл. 5 (X<sub>1</sub> – соотношение по массе биологически

обработанных опилок в пересчете на сухое вещество и смеси песка и цемента ( $O/(П + Ц)$ ) в кодированном виде;  $X_2$  – то же, песка и цемента ( $П/Ц$ )).

Были получены зависимости средней плотности, предела прочности на сжатие в возрасте 7 сут, коэффициента конструктивного качества и морозостойкости опилкобетона от отношения по массе биологически обработанных опилок к смеси песка и цемента при разных значениях отношения расходов песка и цемента (рис. 6), которые позволили обосновать оптимальный состав теплоизоляционно-конструкционного опилкобетона.

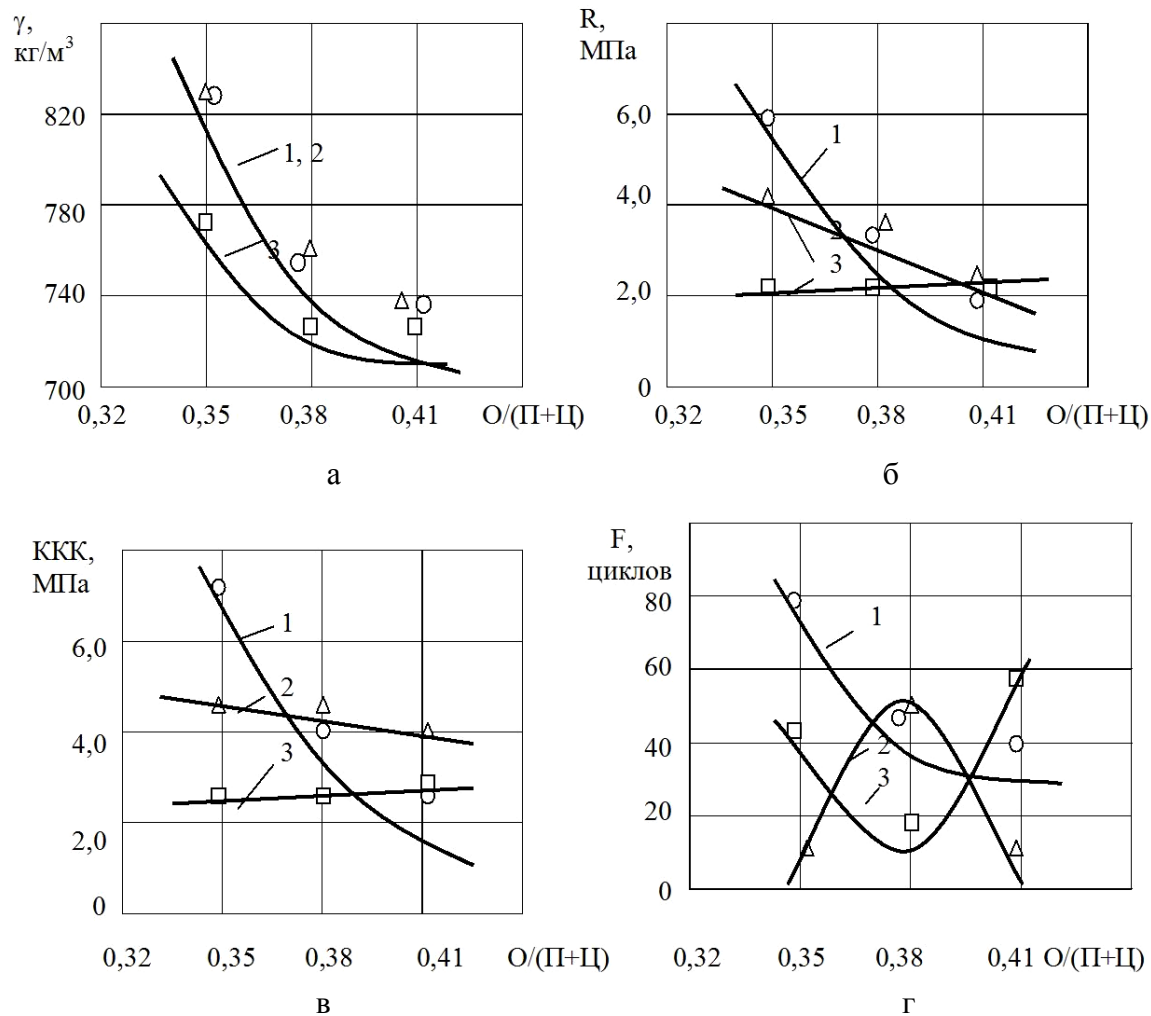


Рис. 6. Зависимости средней плотности  $\gamma$  (а); предела прочности на сжатие  $R$  (б); коэффициента конструктивного качества ККК (в) и морозостойкости  $F$  (г) опилкобетона от отношения по массе биологически обработанных опилок в пересчете на сухое вещество к смеси песка и цемента  $O/(П + Ц)$  при разных значениях отношения расходов песка и цемента  $П/Ц$ : 1 –  $П/Ц = 0,8$ ; 2 –  $П/Ц = 1,0$ ; 3 –  $П/Ц = 1,2$

Таблица 5

План эксперимента и данные о зависимости свойств  
теплоизоляционно-конструкционного опилкобетона смеси от его состава

№ п/п	План		Значения факторов состава		Плотность в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности на сжатие, МПа	Водо- погло- щение, %	Моро- зостой- кость, циклов
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	O/(П + Ц)	П/Ц				
1	-1	-1	0,35	0,8	765	6,0	47,7	77
2	+1	-1	0,41	0,8	676	2,2	48,6	90,5
3	-1	+1	0,35	1,2	714	2,2	65,3	56,5
4	+1	+1	0,41	1,2	690	2,6	53,8	77
5	-1	0	0,35	1,0	741	4,1	51,8	13,8
6	+1	0	0,41	1,0	666	3,0	52,3	13
7	0	-1	0,38	0,8	685	3,4	59,2	49,4
8	0	+1	0,38	1,2	676	2,2	65,0	13
9	0	0	0,38	1,0	704	3,6	49,2	51,8

Оптимальный состав теплоизоляционно-конструкционного опилкобетона характеризуется факторами состава  $O/(П + Ц) = 0,37$ ,  $П/Ц = 1,0$ , а также показателями основных физико-механических свойств: плотностью в сухом состоянии около  $770 \text{ кг/м}^3$ ; пределом прочности на сжатие около  $3,6 \text{ МПа}$ ; морозостойкостью более 50 циклов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе исследований по данной теме была установлена возможность улучшения древесного заполнителя путем его биоферментации с помощью микроорганизмов, содержащихся в субстрате животного происхождения – отходе животноводства. Биоферментация древесного сырья микроорганизмами, обладающими высокой целлюлозолитической активностью, дает возможность получать продукты со сниженным (по сравнению с исходным сырьем) содержанием углеводов. Данная обработка древесного сырья позволила получить строительные материалы, удовлетворяющие требованиям стандарта, даже на основе таких распространенных отходов деревообработки, как опилки. Биоремедиация опилок по разработанному способу в два раза и более снижает содержание в них сахаров, а это способствует получению образцов опилкобетона с плотностью, соответствующей плотности легких бетонов, и с достаточной прочностью на сжатие.

Уточненные математические модели зависимостей типа «состав – свойства» биокомпозита позволили оптимизировать его состав и получить требуемые строительные-технические показатели.

### 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. Биокomпозиты строительного назначения с использованием отходов деревообработки. Часть 1 (обзор) // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 1 (17). С. 14–26.
7. Белов В.В. Биокomпозиты 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. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительного-технологических задач на ЭВМ. Киев: Выща школа. 1989. 324 с.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В. Биокomпозиты 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.

---

### CONSTRUCTION BIOCOMPOSITES USING WOODWORKING WASTE. PART 3 (SELECTION OF BIOLOGICALLY ACTIVATED SAWDUST CONCRETE COMPOSITIONS)

*V.V. Belov*

*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** Ways of woodworking waste application, prospects of their use as aggregate for lightweight concrete and other building materials have been studied. Using mathematical models low-energy-intensive compositions of sawdust concrete have been developed. It is noted that it is achieved the reduction of cement consumption up to 30 %, reduction of material

intensity of building constructions, energy costs for their production and reduction of production cost of composites on the basis of woodworking waste in comparison with similar materials by 30–35 %. It is indicated that in the process of using woodworking waste as the main raw material an additional energy-saving and ecological effect is formed. It is emphasised that due to the effective use of raw materials it is expected to reduce the cost of production by 18–20 %.

**Keywords:** woodworking wastes, sawdust concrete, wood aggregate, compositions, properties.

#### REFERENCES

1. Belov V.V., Mironov V.A., Sukharev Yu.V. Biologically active sawdust concrete for agricultural construction. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika*. 2011. No. 9, pp. 76–82. (In Russian).
2. Belov V.V., Sukharev Yu.V. The use of biologically activated sawdust concrete for the insulation of an effective metal-wood panel. *Izvestiya OryolGTU. Mashinostroenie. Priborostroenie*. 2006. No. 3, pp. 102–106. (In Russian).
3. Mironov V.A., Belov V.V., Sukharev Yu.V. Biologically activated sawdust concrete for insulating an efficient metal-wood panel. *Vestnik central'nogo regional'nogo otdeleniya Rossijskoj akademii arhitektury i stroitel'nyh nauk*. 2007. No. 6, pp. 112–120. (In Russian).
4. Patent RF 2230049 C2. *Sposob polucheniya drevesno-cementnoj kompozicii* [Method for producing wood-cement composition]. Mironov V.A., Belov V.V., Sukharev Yu.V. Declared 05.08.2002. Published 10.06.2004. (In Russian).
5. Mironov V.A., Belov V.V., Sukharev Yu.V. Topical issues of biotechnology in construction. *Construction and architecture: Collection of scientific works of the Faculty of Civil Engineering*. Tver: TSTU. 2001, pp. 173–175. (In Russian).
6. Belov V.V. Biocomposites for construction purposes using waste wood processing. Part 1 (overview). *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii»*. 2023. No. 1 (17), pp. 14–26. (In Russian).
7. Belov V.V. Construction biocomposites using woodworking waste. Part 2 (experimental studies biofermentation of wood aggregate). *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii»*. 2023. No. 2 (18), pp. 5–12. (In Russian).
8. Voznesensky V.A., Lyashenko T.V., Ogarkov B.L. *Chislennye metody resheniya stroitel'no-tekhnologicheskikh zadach na EVM* [Numerical methods for solving construction and technological problems on a computer]. Kiev: Vyshcha shkola. 1989. 324 p.

#### 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 3 (selection of biologically activated sawdust concrete compositions) // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 3 (19), pp. 19–33.

**УДК 691.32****МАТЕРИАЛ ДЛЯ РЕСТАВРАЦИОННЫХ РАБОТ  
НА ОСНОВЕ ВЫСОКОПРОЧНОГО ГИПСА  
С ПОЛЫМИ СТЕКЛЯННЫМИ МИКРОСФЕРАМИ***А.Ф. Бурьянов, Е.В. Ткач, Д.В. Стибунов**Московский государственный строительный университет (г. Москва)*

© Бурьянов А.Ф., Ткач Е.В.,  
Стибунов Д.В., 2023

**Аннотация.** В результате проведенных научных исследований установлено, что совместное введение в высокопрочный гипс полых стеклянных микросфер (ПСМС), гидрофобно-пластифицирующей добавки (суперпластификатора (СП) Peramin SMF-10 + гидрофобизатора (ГФ) Vinnapas 8031 Н) и метаксаолина приводит к возникновению синергетического эффекта. Полученный эффект проявляется в интенсивности процесса образования кристаллогидратов более крупных размеров, обеспечивающих уплотнение и упрочнение структуры матрицы гипсового камня пониженной средней плотности с улучшенными эксплуатационными свойствами композиционного материала по прочности при сжатии и изгибе, водостойкости, сорбционной влажности и водопоглощению. С помощью методов электронной микроскопии, рентгенофазового анализа и химического анализа выявлено совместное влияние ПСМС, гидрофобно-пластифицирующей добавки (СП + ГФ) и метаксаолина на процесс формирования в стесненных условиях плотной дендритоподобной структуры гипсового камня, образующейся из перекрещивающихся в разных плоскостях закономерных сростков кристаллов гипса, которые формируют более прочную контактную зону между микросферой и гипсовым камнем.

**Ключевые слова:** высокопрочный гипс, полые стеклянные микросферы, суперпластификатор, гидрофобизатор, синергетический эффект.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-3-33-43****ВВЕДЕНИЕ**

Создание архитектурных элементов внутри исторических зданий производится с применением гипсовых материалов. В настоящее время многим памятникам архитектуры требуются реставрационные работы, при которых возникают проблемы, связанные с восстановлением деталей, штукатурки и лепнины [1–3]. Таким образом, гипс должен обеспечить высокое качество работ, долговечность при эксплуатации, экологическую безопасность для человека и окружающей среды, снижение средней плотности и

материалоемкости реставрационных работ, негорючесть и белизну материала, эстетический вид. Наполнитель в гипсовых системах должен также соответствовать этим нормам. К реставрационным гипсовым материалам предъявляется комплекс требований по белизне, средней плотности, срокам схватывания, прочности [3–5]. Минимальная средняя плотность при требуемой прочности необходима потолочной лепнине, находящейся чаще всего на несущих деревянных конструкциях (балках, перекрытиях), у которых со временем снижается несущая способность. Традиционные гипсовые реставрационные составы для лепнины имеют высокую среднюю плотность камня во влажном состоянии. Следовательно, на ослабленных деревянных конструкциях применение традиционных гипсовых составов приведет к увеличению прогибов, разрушению исторической лепнины и самих конструкций.

Были проанализированы известные гипсоцементно-пуццолановые вяжущие вещества с наполнителями для повышения прочности и водостойкости в виде цемента, диатомита, трепела, опоки, золы, аморфного кремнезема, кварца и техногенных отходов. С целью улучшения свойств гипсового камня вводили суперпластификатор, углеродные нанотрубки и силикатные наночастицы [6–10]. Для облегчения смеси применяли древесные опилки, гранулы из пеностекла, пенообразователи, керамзит и др. Кроме того, было проанализировано использование полых стеклянных микросфер (ПСМС) в цементных кладочных, штукатурных и тампонажных растворах [10–15]. Установлено, что ПСМС в цементных системах являются лучшим облегчающим наполнителем белого цвета по сравнению с алюмосиликатными (керамическими, серого цвета) полыми микросферами, а также традиционными наполнителями (древесными опилками, вспученным перлитом и вермикулитом).

Цель данных исследований – научное обоснование технологического решения, обеспечивающего получение эффективного гипсового материала на основе высокопрочного гипса с ПСМС для реставрационных работ.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовались высокопрочный гипс для художественной лепнины марки Г16 БШ Самарского завода, ПСМС Новгородского завода «Стекловолокно» со средней плотностью  $0,3 \text{ г/см}^3$  и прочностью при объемном сжатии 11,3 МПа. Применялся суперпластификатор Peramin SMF-10 (СП), представляющий собой порошок белого цвета (первая группа суперпластификаторов) и имеющий меламиноформальдегидную основу с активным радикалом  $-\text{SO}_3\text{Na}$ . Порошок гидрофобизатора Vinnapas 8031 Н (ГФ) также имеет белый цвет, состоит из тройного сополимера этилена, виниллаурата, винилхлорида и содержит до 15 % ультрадисперсного наполнителя в виде мела и метакаолина. Использовался, помимо названного, и высокоактивный метакаолин ВМК-45 (ВМК) с удельной поверхностью  $16\,215 \text{ см}^2/\text{г}$  и химической формулой  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1,26 \text{ SiO}_2$ . В работе применялось современное оборудование Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, а также стандартные методики определения свойств.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения эффективного гипсового материала была разработана методика исследований, которая имеет следующую схему: проверка паспортных данных всех компонентов состава; проведение микроструктурного (МСА), элементного (ЭА),

рентгенофазового (РФА) анализов гипса для лепнины; выявление основных закономерностей изменения структуры и свойств гипсового камня с ПСМС и определение путей повышения прочности; модификация структуры и свойств гипсового камня с ПСМС путем введения в смесь СП и ГФ и оптимизация расхода добавок с помощью математического планирования эксперимента и получения моделей свойств; установление основных закономерностей изменения структуры и свойств модифицированного гипсового камня (СП + ГФ) с ПСМС с целью определения пути существенного повышения прочности за счет введения в его состав метакаолина; разработка теоретических положений гипсового камня, упрочненного ПСМС совместно с (СП + ГФ + ВМК), и выявление основных закономерностей изменения структуры и свойств гипсового камня.

Все гипсовые смеси, использованные в работе, имели стандартную консистенцию (расплав гипсового теста 180 + 5 мм по вискозиметру Суттарда). Смеси из высокопрочного чистого гипса (бездобавочного) и с добавлением к нему гидрофобно-пластифицирующей добавки (СП + ГФ) имели следующие показатели: В/Г = 0,4 и 0,34; рН = 7,5 и 7,7 соответственно; начало схватывания (н. с.) – 12 и 21 мин; конец схватывания (к. с.): 15,5 и 23 мин; марка по прочности – Г16 и Г19. Для гипсовых смесей и камней с 10 % ПСМС (без добавки, с добавкой (СП + ГФ) и (СП + ГФ) + ВМК соответственно) были определены свойства: В/Г = 0,6; 0,5 и 0,48; рН = 8,0; 8,2 и 7,7; н. с. – 13,5; 15 и 16,5 мин; к. с. – 18; 17 и 20 мин; марка по прочности Г3; Г5 и Г10. Аналогичные свойства – для гипсового камня с 30 % ПСМС: В/Г = 1; 0,84 и 0,79; рН = 8,4; 8,6 и 7,5; н. с. – 11,5; 13 и 14,5 мин; к. с. – 15,5; 16 и 17,5 мин; марка по прочности Г2; Г4 и Г5.

Для разработки облегченных гипсовых составов, необходимых в процессе реставрации памятников архитектуры, требуется существенное повышение прочности при сохранении низких значений средней плотности. В этих целях предлагается в смесь гипса, ПСМС (СП + ГФ) вводить высокоактивный метакаолин ВМК-45, количество которого было установлено предварительными исследованиями. Определили, что эквивалентная замена 10 мас.% гипса на 10 мас.% метакаолина позволит значительно повысить пределы прочности при сжатии и на изгиб. В дальнейшем исследования проводились на оптимизированных расходах СП и ГФ в соответствии с указанной методикой. Были установлены свойства гипсового камня с 10 и 30 % ПСМС. Последовательность снижения средней плотности и повышения прочности камня представлена в табл. 1.

Таблица 1

Свойства гипсового камня и камня с 10 и 30 % ПСМС

Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>		Прочность, МПа		Влажность, %,
влажного	сухого	на изгиб	на сжатие	
1	2	3	4	5
<b>Гипсовый камень (без добавок), В/Г = 0,4</b>				
1 850	1 445	6,46	18,62	28,3
<b>Гипсовый камень с 10 % ПСМС, В/Г = 0,6</b>				
1 301	867	1,77	3,12	57,1
<b>Модифицированный гипсовый камень с 10 % ПСМС, СП + ГФ, В/Г = 0,5</b>				
1 350	1 102	2,78	5,17	46,1

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
<b>Упрочненный гипсовый камень с 10 % ПСМС, СП + ГФ, ВМК, В/Г = 0,48</b>				
1 270	805	3,53	10,32	40,1
<b>Гипсовый камень с 30 % ПСМС, В/Г = 1</b>				
963	544	0,76	1,3	77,0
<b>Модифицированный гипсовый камень с 30 % ПСМС, СП + ГФ, В/Г = 0,84</b>				
911	531	1,83	4,11	58,2
<b>Упрочненный гипсовый камень с 30 % ПСМС, СП + ГФ, ВМК, В/Г = 0,79</b>				
870	502	2,85	5,33	50,1

Анализ данных, приведенных в табл. 1, показал, что у упрочненных гипсовых смесей и камня с 10 % ПСМС В/Г снизилось на 20 и 4 %, влажность уменьшилась на 10 % за счет фактического уменьшения отношения количества воды к сумме гипса и метаксаолина. При этом средняя плотность снизилась на 14 %, а прочность при сжатии за счет уплотнения структуры матрицы между микросферами увеличилась (по сравнению с модифицированным составом) в 2 раза, с 10 % ПСМС – в 3 раза, марка по прочности – на 5 ступеней (с Г3 до Г10).

Были определены основные свойства упрочненного гипсового камня с 30 % ПСМС в возрасте 2 ч (по сравнению с модифицированным и без добавок соответственно): В/Г (или В/(Г + ВМК)) уменьшилось на 6 и 21 %. При этом средняя плотность уменьшилась на 6,5 и 8 %, прочность при сжатии увеличилась на 29 % и в 4 раза, а марка стала выше на 3 ступени (от Г2, Г4 до Г5).

Установлено, что у гипсовых смесей с 10 % ПСМС изменение рН: без добавок – 8; с СП + ГФ – 8,2, с СП + ГФ, ВМК – 7,7. Аналогично для 30 % ПСМС рН = 8,4; 8,6 и 7,4. Сроки схватывания по мере введения компонентов СП + ГФ и СП + ГФ, ВМК постепенно увеличиваются, что способствует улучшению качества проводимых работ по реставрации (удлиняется время работы с гипсовым тестом). Далее в соответствии с предложенной методикой были проведены исследования МСА, РФА и ЭА чистого гипсового камня, модифицированного и упрочненного камней с 10 и 30 % ПСМС. На рис. 1 и 2 приведены данные РФА, а на рис. 3 – фотографии микроструктуры камней с зонами проведения элементных анализов ПСМС и гипсовой матрицы.

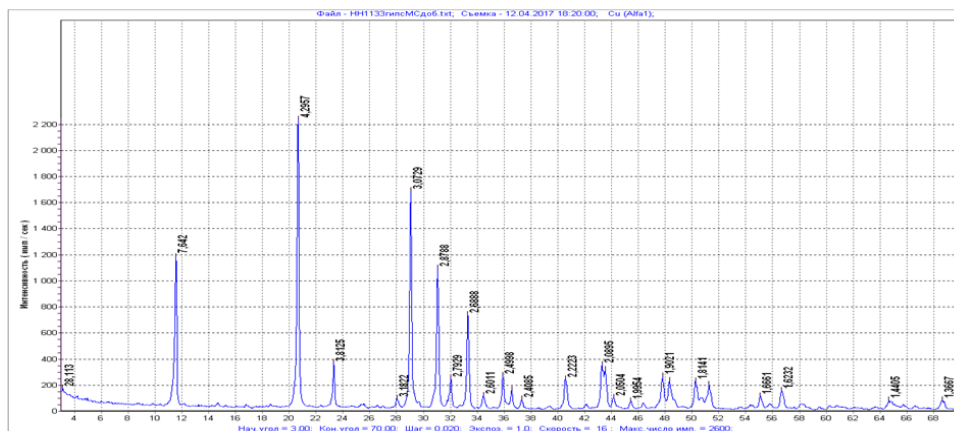


Рис. 1. Рентгенограмма гипсового камня с 10 % ПСМС, СП + ГФ

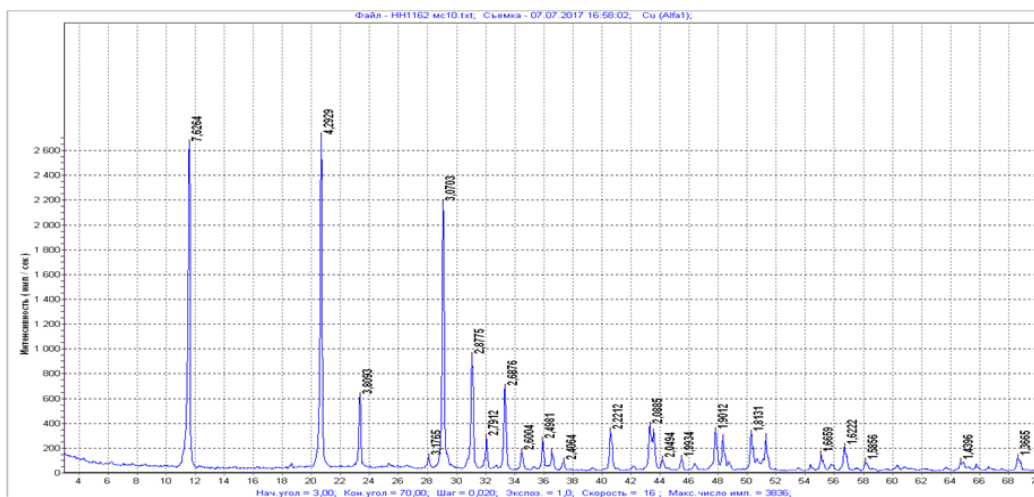
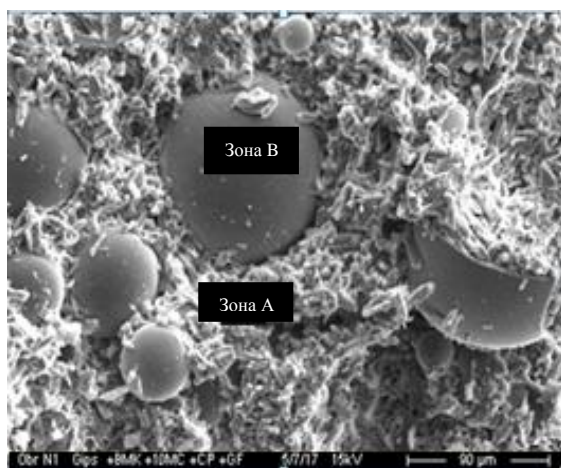
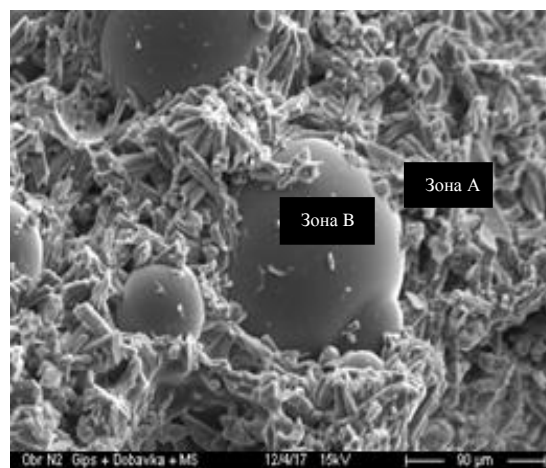


Рис. 2. Рентгенограмма гипсового камня с 10 % ПСМС, СП + ГФ, ВМК



а



б

Рис. 3. Микроструктура гипсового камня  
с 10 % ПСМС, СП + ГФ (а); 10 % ПСМС, СП + ГФ, ВМК (б);  
зона А – гипсовый камень; зона В – ПСМС

Микроструктура упрочненного гипсового камня с 10 и 30 % ПСМС отличается высокой однородностью их распределения в гипсовой матрице. При этом формируется дендритоподобная структура из перекрещивающихся в разных плоскостях кристаллов гипса, которые формируют более прочную контактную зону между микросферой и гипсовым камнем. Однако у камня с 30 % ПСМС формируется более пористая структура, чем у камня с 10 % ПСМС.

Были проанализированы рентгенограммы упрочненного гипсового камня с 10 и 30 % ПСМС и получены данные о межплоскостных расстояниях кристаллов гипса. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Межплоскостные расстояния гипсового камня,  $d = n \cdot 10^{-10}$  м

Угол, °	Гипсо- вый камень	Гипсовый камень с 10 % ПСМС			Гипсовый камень с 30 % ПСМС		
		без добавок	СП + ГФ	СП + ГФ ВМК	без добавок	СП + ГФ	СП + ГФ ВМК
11,6	7,622	7,598 9	7,642	7,626 4	7,622	6,038 4	7,661 5
20,7	4,287	4,281 9	4,295 7	4,292 9	4,289 7	4,379 5	4,301 6
29,2	3,068 6	3,065 7	3,072 9	3,070 3	3,069 6	3,011 5	3,075 1
31	2,875	2,875 4	2,878 8	2,877 5	2,876 6	2,810 4	2,881 4
33,5	2,686	2,684 1	2,688 8	2,687 6	2,686 8	2,719 3	2,691 4

Анализ данных табл. 2 показал, что установлены изменения у модифицированных составов с 10 % ПСМС, СП + ГФ и упрочненного гипсового камня 10 % ПСМС, СП + ГФ, ВМК по межплоскостным расстояниям в кристаллах по пяти пикам в сравнении с контрольным составом.

Было определено, что для гипсового камня с 10 % ПСМС без добавок при всех углах исследования межплоскостные расстояния в кристаллах гипса уменьшаются; для камня с 10 % ПСМС, СП + ГФ при всех углах исследования межплоскостные расстояния в кристаллах гипса увеличиваются; для упрочненного камня с 10 % ПСМС, СП + ГФ, ВМК при всех углах межплоскостные расстояния тоже увеличиваются, но несколько меньше, чем у модифицированного камня. Эти изменения связаны с изменениями элементного состава микросфер и гипсовой матрицы, а также размеров кристаллов гипса. Были установлены изменения в кристаллах гипсовых камней с 30 % ПСМС, в том числе модифицированного и упрочненного, по межплоскостным расстояниям (см. табл. 2). Установлено увеличение межплоскостных расстояний в кристаллах гипсового камня с 30 % ПСМС и особенно у упрочненного материала с 30 % ПСМС, СП + ГФ, ВМК. Эти изменения произошли за счет химической и поверхностной активности микросфер и элементного состава ПСМС, гипсовой матрицы, в том числе и благодаря СП и ГФ.

Таким образом, доказано влияние ПСМС и гидрофобно-пластифицирующей добавки, состоящей из ПСМС, метакаолина, СП Peramin SMF-10 и ГФ Vinnapas 8031 Н, на структуру (изменение в кристаллической решетке) упрочненного гипсового камня с ПСМС. Установлены межплоскостные расстояния в упрочненном гипсовом камне:  $d = (7,626 4; 4,292 9; 3,070 3; 2,877 5; 2,687 6) \cdot 10^{-10}$  м и  $d = (7,661 5; 4,301 6; 3,075 1; 2,881 4; 2,691 4) \cdot 10^{-10}$  м с 10 и 30 % ПСМС, СП + ГФ, ВМК соответственно.

При анализе данных табл. 2 установлено, что у упрочненного гипсового камня с 30 % ПСМС определены бóльшие межплоскостные расстояния в кристаллах гипса по сравнению с чистым гипсовым камнем. Рост составил  $\approx 0,04 \cdot 10^{-10}$  м при угле исследований  $11,6^\circ$  и  $\approx 0,02 \cdot 10^{-10}$  м при угле исследований  $20,7^\circ$ . Имеются также некоторые изменения фиксации пиков и соответствующего угла исследований (отражения рентгеновских лучей) для камня с 30 % ПСМС, СП + ГФ. Увеличение интенсивности основных пиков кристаллогидратов свидетельствует об их повышенном содержании.

Для сохранения лепного декора старинных дворцов, не имеющих системы отопления, требуется повышать эксплуатационные свойства. В табл. 3 приведены эксплуатационные свойства эффективных гипсовых смесей и камней с 10 и 30 % ПСМС, СП + ГФ, ВМК для реставрационных работ.

Таблица 3

Эксплуатационные свойства  
гипсовой смеси и камня с 10 и 30 % ПСМС

Наименование показателей	Контрольный (чистый гипсовый камень)	10 % ПСМС, СП + ГФ, ВМК	30 % ПСМС, СП + ГФ, ВМК
В/Г (расплыв гипсового теста $180 \pm 5$ мм)	0,4	0,48	0,79
рН смеси	7,5	7,7	7,4
Начало схватывания смеси, мин	12,0	16,5	14,5
Конец схватывания смеси, мин	15,5	20	17,5
Средняя плотность камня в возрасте 2 ч, кг/м <sup>3</sup>	1 850	1 270	870
Средняя плотность сухого камня, кг/м <sup>3</sup>	1 445	805	502
Удельная прочность при изгибе, МПа	4,40	4,41	5,7
Удельная прочность при сжатии, МПа	12,7	12,9	10,66
Прочность сцепления с основанием (из чистого гипса для художественной лепнины), МПа	1,8	1,85	0,9
Коэффициент размягчения	0,5	0,7	0,65
Сорбционная влажность, %	4,9	3,1	4,2

Как видно из табл. 3, по сравнению с чистым гипсовым камнем упрочненный камень с ПСМС обладает технической эффективностью по показателям средней плотности, удельной прочности, прочности сцепления, коэффициенту размягчения, сорбционной влажности. На основании разработанных ТУ 2352-201-10-29888514 «Эффективный гипсовый материал для реставрационных работ», утвержденных ООО «Инновационный ресурс», было осуществлено опытное апробирование эффективного гипсового материала объемом 5,1 м<sup>3</sup> при проведении ремонтно-восстановительных работ в помещениях ООО «МаСТ». Таким образом, выполненные работы по апробированию предлагаемых технических решений и полученные при этом результаты испытаний показали состоятельность и техническую эффективность предлагаемого гипсового материала для реставрационных работ.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Обосновано и экспериментально доказано, что совместное введение в высокопрочный гипс ПСМС гидрофобно-пластифицирующей добавки (СП PeraminSMF-10 + ГФ Vinnapas 8031 Н) и метакаолина способствует снижению В/Г, средней плотности и

улучшает эксплуатационные свойства композиционного материала за счет синергетического эффекта. Последний проявляется в интенсивности процесса образования кристаллогидратов более крупных размеров, образующих плотную дендритоподобную структуру модифицированного гипсового камня, который имеет следующие показатели в возрасте 2 ч (при расходе ПСМС 10 и 30 % соответственно): средняя плотность в сухом состоянии – 805 и 502 кг/м<sup>3</sup>; предел прочности при сжатии – 10,32 и 5,33 МПа; удельная прочность – 12,9 и 10,66 МПа; прочность сцепления с основанием – 1,85 и 0,9 МПа; водопоглощение по массе – 7,1 и 14,3 %; коэффициент размягчения – 0,7 и 0,65; сорбционная влажность – 3,1 и 4,2 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орешкин Д.В. Проблемы строительного материаловедения и производства строительных материалов // *Строительные материалы*. 2010. № 11. С. 6–8.
2. Semenov V.S., Rozovskaya T.A., Oreshkin D.V. Properties of the dry masonry mixtures with hollow ceramics microspheres // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 860–863. P. 1244–1247.
3. Хаев Т.Э., Ткач Е.В., Орешкин Д.В. Модифицированный облегченный гипсовый материал с полыми стеклянными микросферами для реставрационных работ // *Строительные материалы*. 2017. № 10. С. 45–51.
4. Бурьянов А.Ф. Гипс, его исследование и применение от П.П. Будникова до наших дней // *Строительные материалы*. 2005. № 9. С. 46–48.
5. Петропавловская В.Б., Белов В.В., Бурьянов А.Ф. Твердеющие кристаллизационные системы на основе порошков двуводного гипса // *Строительные материалы*. 2007. № 12. С. 46–47.
6. Оптимизация внутренней структуры дисперсных систем негидратационного твердения / В.Б. Петропавловская, В.В. Белов, Т.Б. Новиченкова, А.Ф. Бурьянов, А.П. Пустовгар // *Строительные материалы*. 2010. № 7. С. 22–23.
7. Мещеряков Ю.Г., Федоров С.В. Проблемы промышленной переработки фосфогипса в РФ, состояние и перспективы // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 6. С. 273–276.
8. Модификация ангидритовых композиций многослойными углеродными нанотрубками / Г.И. Яковлев, Г.Н. Первушин, И.С. Маева, А. Корженко, А.Ф. Бурьянов, Р. Мачюлайтис // *Строительные материалы*. 2010. № 7. С. 25–27.
9. Гипсовые композиции с комплексными модификаторами структуры / А.Ф. Гордина, Г.И. Яковлев, И.С. Полянских, Я. Керене, Х.-Б. Фишер, Н.Р. Рахимова, А.Ф. Бурьянов // *Строительные материалы*. 2016. № 1-2. С. 90–95.
10. Эффективные сухие смеси для ремонтных и восстановительных работ / В.С. Лесовик, Л.Х. Загороднюк, Д.А. Беликов, А.Ю. Щекина, А.А. Куприна // *Строительные материалы*. 2014. № 7. С. 82–85.
11. Пашкевич А.А., Орешкин Д.В. Сухие смеси с полыми стеклянными микросферами для получения штукатурных растворов // *Сухие строительные смеси*. 2007. № 2. С. 21–23.
12. Королев Е.В., Иноземцев А.С. Экономические предпосылки применения высокопрочных легких бетонов // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2012. № 5. С. 198–206.
13. Бурьянов А.Ф., Фишер Х.Б. Исследование влияния многокомпонентных активаторов твердения на свойства природного ангидрита // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 63–68.



14. Облегченные гипсовые составы с пористыми наполнителями / В.Б. Петропавловская, М.Ю. Завадько, Т.Б. Новиченкова, К.С. Петропавловский // *Строительные материалы*. 2021. № 10. С. 37–43.

15. Influence of acid-activated micro-dispersed additive on the properties of cement sulphate-resistant compositions / V.B. Petropavlovskaya, T.B. Novichenkova, K.S. Petropavlovskii, M.Yu. Zavadko. *Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Materials Research Proceedings*. 2022. С. 285–292.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*БУРЬЯНОВ Александр Федорович* – доктор технических наук, доцент, профессор-консультант кафедры строительного материаловедения, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, Россия, г. Москва, Ярославское ш., д. 26. E-mail: rga-service@mail.ru

*ТКАЧ Евгения Владимировна* – доктор технических наук, профессор, 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

*СТИБУНОВ Даниил Васильевич* – студент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, Россия, г. Москва, Ярославское ш., д. 26. E-mail: danilastibunov@gmail.com

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Бурьянов А.Ф., Ткач Е.В., Стибунув Д.В. Материал для реставрационных работ на основе высокопрочного гипса с полыми стеклянными микросферами // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 3 (19). С. 33–43.

---

### GYPSUM MATERIAL FOR RESTORATION WORKS BASED ON HIGH-STRENGTH GYPSUM WITH HOLLOW GLASS MICROSPHERES

*A.F. Buryanov, E.V. Tkach, D.V. Stibunov*  
*Moscow State University of Civil Engineering (Moscow)*

**Abstract.** As a result of scientific research it has been established that the joint introduction of hollow glass microspheres (HGMS), hydrophobic-plasticising additive (superplasticiser (SP) Peramin SMF-10 + hydrophobiser (HF) Vinnapas 8031 H) and metakaolin into high-strength gypsum leads to a synergetic effect. The obtained effect is manifested in the intensity of the process of formation of crystalline hydrates of larger sizes, providing compaction and strengthening of the structure of the gypsum stone matrix of reduced average density with improved performance properties of the composite material in terms of compressive and bending strength, water resistance, sorption moisture and water absorption. By means of electron microscopy, X-ray phase analysis and chemical analysis methods the joint influence of PSMS, hydrophobic-plasticising additive (SP + GF) and metakaolin on the process of formation of dense dendrite-like structure of gypsum stone in confined conditions was revealed, which is formed

from crossed in different planes regular intergrowths of gypsum crystals, which form a stronger contact zone between microsphere and gypsum stone.

**Keywords:** high-strength gypsum, hollow glass microspheres, superplasticizer, water repellent, synergistic effect.

#### REFERENCES

1. Oreshkin D.V. Problems of building materials science and production of building materials. *Stroitel'nye Materialy*. 2010. No. 11, pp. 6–8. (In Russian).
2. Semenov V.S., Rozovskaya T.A., Oreshkin D.V. Properties of the dry masonry mixtures with hollow ceramics microspheres // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 860–863, pp. 1244–1247.
3. Khaev T.E., Tkach E.V., Oreshkin D.V. Modified lightweight gypsum material with hollow glass microspheres for restoration work. *Stroitel'nye Materialy*. 2017. No. 10, pp. 45–51. (In Russian).
4. Buryanov A.F. Gypsum, its research and application from P.P. Budnikov to the present day. *Stroitel'nye Materialy*. 2005. No. 9, pp. 46–48. (In Russian).
5. Petropavlovskaya V.B., Belov V.V., Buryanov A.F. Hardening crystallization systems based on powders of two-water gypsum. *Stroitel'nye materialy*. 2007. No. 12, pp. 46–47. (In Russian).
6. Optimization of the internal structure of dispersed systems of non-hydration hardening / V.B. Petropavlovskaya, V.V. Belov, T.B. Novichenkova, A.F. Buryanov, A.P. Pustovgar // *Stroitel'nye Materialy*. 2010. No. 7, pp. 22–23. (In Russian).
7. Meshcheryakov Yu.G., Fedorov S.V. Problems of industrial processing of phosphogypsum in the Russian Federation, state and prospects. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2015. No. 6, pp. 273–276. (In Russian).
8. Modification of anhydrite compositions with multilayer carbon nanotubes / G.I. Yakovlev, G.N. Pervushin, I.S. Maeva, A. Korzhenko, A.F. Buryanov, R. Machyulaitis // *Stroitel'nye Materialy*. 2010. No. 7, pp. 25–27. (In Russian).
9. Gypsum compositions with complex structure modifiers / A.F. Gordina, G.I. Yakovlev, I.S. Polyanskikh, Ya. Kerene, H.-B. Fisher, N.R. Rakhimova, A.F. Buryanov. *Stroitel'nye Materialy*. 2016. No. 1-2, pp. 90–95. (In Russian).
10. Effective dry mixes for repair and restoration works / V.S. Lesovik, L.Kh. Zagorodnyuk, D.A. Belikov, A.Yu. Shchekina, A.A. Kuprin. *Stroitel'nye Materialy*. 2014. No. 7, pp. 82–85. (In Russian).
11. Pashkevich A.A., Oreshkin D.V. Dry mixtures with hollow glass microspheres for the preparation of plaster mortars. *Suhie stroitel'nye smesi*. 2007. No. 2, pp. 21–23. (In Russian).
12. Korolev E.V., Inozemtsev A.S. Economic prerequisites for the use of high-strength lightweight concrete. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya*. 2012. No. 5, pp. 198–206. (In Russian).
13. Buryanov A.F., Fisher H.B. Study of the effect of multicomponent hardening activators on the properties of natural anhydrite. *Stroitel'nye materialy*. 2023. No. 1-2, pp. 63–68. (In Russian).
14. Lightweight gypsum compositions with porous fillers / V.B. Petropavlovskaya, M.Yu. Zavadko, T.B. Novichenkova, K.S. Petropavlovskii. *Stroitel'nye materialy*. 2021. No. 10, pp. 37–43. (In Russian).
15. Influence of acid-activated micro-dispersed additive on the properties of cement sulphate-resistant compositions / V.B. Petropavlovskaya, T.B. Novichenkova, K.S. Petropavlovskii, M.Yu. Zavadko. *Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Materials Research Proceedings*. 2022, pp. 285–292.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*BURYANOV Alexander Fedorovich* – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Consulting Professor of the Department of Building Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia. E-mail: rga-service@mail.ru

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

*STIBUNOV Daniil Vasilyevich* – Bachelor, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia. E-mail: danilastibunov@gmail.com

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Buryanov A.F., Tkach E.V., Stibunov D.V. Gypsum material for restoration works based on high-strength gypsum with hollow glass microspheres // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 3 (19), pp. 33–43.

УДК 691.328

**ПРОТИВОРЕЧИЯ В НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ  
НА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ ИЗДЕЛИЯ**

*Ю.Ю. Курятников*

*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Курятников Ю.Ю., 2023

**Аннотация.** В статье приведен анализ проблем, возникающих при изготовлении железобетонных изделий и связанных с несогласованностью положений нормативных документов. Отмечено, что при актуализации устаревшей нормативной документации, принятии новых документов разными институтами допускаются несогласованность, дублирование и нечеткость в требованиях. Предложены пути решения данных проблем.

**Ключевые слова:** железобетонные изделия, нормативная документация, схемы армирования, водопропускные трубы, кольца колодцев, дорожные плиты, арматурная сталь, композитная арматура.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-3-43-49**

**ВВЕДЕНИЕ**

Большое разнообразие нормативной документации в строительной отрасли обусловлено сложностью строительных объектов, которые должны соответствовать различным требованиям и ограничениям. Научно-технический прогресс в строительстве, изменение экономико-правовых форм хозяйствования требуют совершенствования и корректировки нормативной базы. Эффективность организации этого процесса во многом

определяется совершенством информационного обеспечения, которое должно постоянно обновляться, актуализироваться и пополняться всеми инновациями, происходящими в различных областях строительства, науки и техники [1].

На сегодняшний день в стране наблюдается ситуация, когда в принимаемых новых ГОСТах на железобетонные изделия (ЖБИ) либо полностью отсутствуют рабочие схемы армирования конструкций (как в ГОСТ 6482-2011, 33148-2014, 8020-2016), либо есть ссылки на серии или рабочие чертежи, разработанные много лет назад без учета современных требований к нагрузкам и долговечности конструкций (как в ГОСТ 19804-2012). В первом случае (при отсутствии рабочих чертежей) большинство предприятий продолжают использовать схемы армирования по отмененным нормативно-техническим документам. Некоторые разрабатывают свои технические решения, меняя характеристики используемого металла, шага и/или диаметра арматуры и т.п. Во втором случае (при наличии ссылок на ранее принятые рабочие чертежи) предприятия применяют схемы армирования из устаревших нормативных документов, обычно не замечая несоответствий с актуализированной редакцией ГОСТа.

Руководство заводов ЖБИ узнает о противоречиях в документации в тех редких случаях, когда заказчики-строители в техническом задании на производство ЖБИ указывают на необходимость соблюдения конкретных параметров, которые установлены в документах, прямо не регулирующих работу ЖБИ-производств (например, СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции»). В настоящее время существует проблема: при актуализации устаревшей нормативной документации и принятии новых документов разными институтами допускаются несогласованность, дублирование и нечеткость в требованиях. В результате производители вынуждены тратить ресурсы, чтобы установить истину, а также несут дополнительные затраты на ненужные процедуры подтверждения соответствия.

### **ПРИМЕРЫ НЕСООТВЕТСТВИЯ В СУЩЕСТВУЮЩЕЙ НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ**

Рассмотрим имеющиеся примеры несоответствий в документации.

1. Есть два нормативных документа: ГОСТ 32871-2014 «Трубы дорожные водопропускные» и ГОСТ 24547-2016 «Звенья железобетонные водопропускных труб под насыпи автомобильных и железных дорог». В обоих ГОСТах речь идет об одних и тех же железобетонных трубах и одной и той же области применения, только разработаны они и внесены разными организациями. ГОСТ 32871-2014 разработан ФГУП «РОСДОРНИИ», а ГОСТ 24547-2016 – АО «ЦНИИС». В результате на сегодняшний день производители обязаны дважды сертифицировать одни и те же трубы: первый раз – согласно приложению № 2 к Техническому регламенту Таможенного союза 014/2011 «Безопасность автомобильных дорог», во исполнение которого принят ГОСТ 32871-2014; второй – согласно Постановлению Правительства РФ № 2425 от 23.12.2021, утвердившему Единый перечень продукции, подлежащей обязательной сертификации. В п. 22.5 этого перечня названы железобетонные звенья водопропускных труб под насыпи автомобильных и железных дорог с указанием ГОСТ 24547-2016.

Органы по сертификации сходятся во мнении, что при существующем состоянии названных нормативных документов производитель обязан получать два сертификата, что ведет к двойным затратам на данный процесс.

В двух указанных ГОСТах есть разные требования к допустимым отклонениям толщины защитного слоя бетона:  $\pm 3$  и  $+3/-2$  мм. Это незначительная разница, но даже на этой почве возникают проблемы при приемке продукции на объектах. В процессе создания типовой рабочей документации важно учитывать имеющееся на заводах оборудование и оснастку. Изменение в опалубочных размерах или диаметрах арматуры может привести к тому, что заводы либо вообще не смогут выпускать изделия, либо резко сократят объемы производства, а стоимость железобетонных изделий значительно вырастет.

В ГОСТ 32871-2014 (п. 5.6.1.5) сказано, что для труб применяется расчетная и конструктивная арматура диаметром не менее 8 мм. При этом в существующих рабочих чертежах допускается арматура меньшего диаметра (например, в Серии 3.501.1-144 Выпуск 1 для ЗКП 6-200 диаметр распределительной (конструктивной) арматуры составляет 6 мм). Если в обновленных рабочих чертежах будет увеличен диаметр распределительной (конструктивной) арматуры, то однозначно придется модернизировать существующее сварочное оборудование (в данном случае каркасонавивочные машины), изменять технологический регламент производства, что в итоге приведет к значительному удорожанию конечного продукта.

Появляются новые, более технологичные и экономически выгодные материалы. При этом их затруднительно использовать производителям железобетона, так как в нормативных документах отсутствуют прямые указания на возможности их применения. Редкие компании внедряют данные материалы на основании собственных расчетов и испытаний продукции, используя положения п. 5.3.7 ГОСТ 13015-2012. В этом документе говорится, что не допускается изменение на предприятии-изготовителе вида бетона, классов и диаметров рабочей арматуры, толщины защитного слоя бетона до арматуры, материала небетонного слоя, которое может привести к изменению показателей свойств изделия, предусмотренных в соответствующем стандарте или рабочей документации, без согласования с проектной организацией – автором проекта.

2. Железобетонные кольца колодцев изготавливаются по обновленному ГОСТ 8020-2016, в котором прямо указано (п. 4.4), что для армирования конструкций применяют арматурную сталь определенных видов и классов. При этом кольца, эксплуатируемые для самотечной канализации, работают в очень агрессивной среде и малейшие сколы бетона и обнажение стального арматурного каркаса быстро ведут к коррозии и разрушению конструкции. Эта проблема легко решается при использовании в производстве колец композитной арматуры. Однако указанный ГОСТ не дает возможности изготовителю выпускать продукцию с лучшими свойствами, используя композитную арматуру. Кроме того, в данном ГОСТе есть схема испытания стеновых колец нагружением, а контрольные нагрузки не приводятся. Аналогичная потребность использования композитной арматуры имеется у заводов ЖБИ для изготовления плит дорожных железобетонных, но отсутствует ГОСТ на изделия [2, 3].

3. Уже много лет для гражданского строительства применяется холоднодеформированная арматурная сталь класса В500С. Она показывает высокую эффективность использования и преимущества перед горячекатаной сталью класса А-III (А400). Сталь В500С более технологична в работе, на ее поверхности меньше ржавчины, у нее большая ровность стержней, более высококачественная обработка на правильно-отрезном оборудовании, при размотке арматура не скручивается, существенно снижается изнашиваемость деталей оборудования. Улучшенная свариваемость арматурных изделий обеспечивает большую жесткость каркаса и качество конечного изделия. Более высокое

расчетное сопротивление на сжатие и растяжение позволяет сокращать расход металла на 10–15 % в сравнении с горячекатаным прокатом без ущерба для рабочих характеристик.

Все вышесказанное позволяет снизить стоимость производства изделий из стали класса В500С по сравнению с аналогичными класса А-III (А400). В железобетонных изделиях для транспортного строительства, согласно СП 35.13330.2011, запрещено применять арматурную сталь В500С, что, очевидно, сказывается на стоимости изделий. По имеющимся данным, АО «ЦНИИТС» по договору с ФАУ «ФЦС» проводит испытания стали В500С для применения в транспортном строительстве, но эта работа длится уже давно, а результата пока нет. При этом крупнейшие инфраструктурные строительства дорог ведутся в настоящее время и получают ЖБИ по завышенным ценам из-за применения менее технологичных материалов.

4. Взамен отмененного ГОСТ 10922-2012 приняли ГОСТ 57997-2017. Если в старом ГОСТе были приведены подробные и наглядные схемы стыковки вязаных соединений, то в обновленном этот раздел отсутствует. Вместо него в ГОСТ 57997-2017 есть п. 5.24, в котором сказано: «...взамен сварных стыковых соединений стержневой арматуры допускается применение стыковых механических соединений, а также вязаных нахлесточных соединений в соответствии с действующими нормативными документами». Никаких действующих нормативных документов по вязаным соединениям не появилось до настоящего времени.

5. Заводы выпускают железобетонные трубы по ГОСТ 6482-88 и ГОСТ 6482-2011, руководствуясь желаниями заказчика. Армирование труб 1–3-й групп осуществляется на основе рабочих чертежей из Приложения 2 ГОСТ 6482-88, армирование труб 4-й группы – на базе собственных технических условий, подтвержденных испытаниями изделий, так как в ГОСТ 6482-2011 отсутствуют рабочие чертежи. Трубы 5-й группы не изготавливаются, поскольку не хватает толщины стенки для размещения двойного каркаса с арматурой нужного диаметра и соблюдения толщины защитного слоя (таблица).

Трубы железобетонные безнапорные

ГОСТ 6482-88	ГОСТ 6482-2011
Группы по несущей способности в зависимости от расчетной высоты засыпки грунтом	
1-я – не более 2 м; 2-я – не более 4 м; 3-я – не более 6 м	1-я – не более 2 м; 2-я – не более 4 м; 3-я – не более 6 м; 4-я – не более 8 м; 5-я – не более 10 м
Класс по прочности на сжатие	
Не ниже В25	Не ниже В30
Армирование труб	
Форма и размеры арматурных изделий и их положение в трубах должны соответствовать указанным в Приложении 2 ГОСТ 6482-88	Для армирования труб используется ненапряженная стальная арматура. Расчет армирования проводится согласно СП 63.13330.2010. Армирование труб осуществляется в соответствии с рабочими чертежами труб, утвержденными в установленном порядке

Аналогичная ситуация с новым ГОСТ 13580-2021 «Плиты железобетонные ленточных фундаментов», в котором, в отличие от старого ГОСТ 13580-85, отсутствуют чертежи и спецификации армирования. В п. 6.9 есть указание, что схемы армирования следует брать из рабочих чертежей, которые разрабатываются для конкретного производителя. Производители, как правило, берут армирование из старого ГОСТ 13580-85.

Согласно опросу действующих предприятий в России, 92 % компаний ответили, что сталкивались при изготовлении ЖБИ с трудностями, связанными с несогласованностью положений нормативных документов, регламентирующих выпуск изделий; 62 % подтвердили, что у них выпускаются ЖБИ с армированием, отличным от установленного сериями, ГОСТами и другими нормативными документами. При этом большинство из них допускают замену арматуры по диаметрам и видам сталей (например, А-III (А400) на В500С). 100 % опрошенных поддерживают идею создания обновленной, унифицированной базы данных рабочих чертежей (схем армирования) на типовые (серийные) изделия с бесплатным доступом к ней проектантов и производителей ЖБИ.

На вопрос о том, какие типовые рабочие чертежи необходимо разрабатывать в первую очередь, ответы распределились следующим образом:

1. 62 % – дорожные плиты.
2. 46 % – пустотные плиты, стеновые панели, сваи.
3. 15 % – трубы, перемычки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предприятия – производители ЖБИ требуют от институциональных органов, отвечающих за нормативную документацию, выполнения следующих условий:

1. Согласования требований действующих ГОСТов и СП с требованиями рабочих чертежей на ЖБИ.

2. Разработки, утверждения и предоставления для свободного доступа производителям ЖБИ и проектантам рабочих чертежей (схем армирования) и схем испытания с контрольными нагрузками на типовые (стандартные) изделия с учетом:

современных требований к нагрузкам и долговечности конструкций;  
общепринятых опалубочных размеров изделий;  
доступного в РФ оборудования по обработке и сварке арматуры;  
экономичности использования конкретных видов сталей.

3. Ликвидации двойного подтверждения соответствия в форме сертификации для отдельных номенклатур.

4. Предоставления возможности применять композитную арматуру в изделиях при условии проведения испытаний готовых изделий на соответствие требованиям по нагрузкам.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ташибеков Т.Ч. К вопросу о необходимости формирования современной информационной системы технических нормативов в строительной отрасли // *Век качества*. 2017. № 2. С. 84–99. URL: <http://www.agequal.ru/pdf/2017/217006.pdf> (дата обращения: 29.05.2023).

2. Систематизация и анализ нормативно-технической документации по применению полимерных композиционных материалов в транспортном строительстве. Часть 1 / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Е.Д. Ильченко, Е.С. Михалдыкин // *Наукове-*

дение. 2017. Т. 9. № 1. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/32TVN117.pdf> (дата обращения: 29.05.2023).

3. Систематизация и анализ нормативно-технической документации по применению полимерных композиционных материалов в транспортном строительстве. Часть 2 / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Е.Д. Ильченко, Е.С. Михалдыкин // *Наукоедение*. 2017. Т. 9. № 1. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/45TVN117.pdf> (дата обращения: 29.07.2023).

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Курятников Ю.Ю. Противоречия в нормативной документации на железобетонные изделия // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 3 (19). С. 43–49.

---

## CONTRADICTIONS IN THE NORMATIVE DOCUMENTATION FOR REINFORCED CONCRETE PRODUCTS

*Yu.Yu. Kuryatnikov*

*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The article analyses the problems arising in the manufacture of reinforced concrete products and related to the inconsistency of provisions of normative documents. It is noted that when updating outdated normative documentation, adoption of new documents by different institutes inconsistency, duplication and vagueness in requirements are allowed. The ways of solving these problems are proposed.

**Keywords:** reinforced concrete products, regulatory documentation, reinforcement schemes, culverts, well rings, road slabs, reinforcing steel, composite reinforcement.

### REFERENCES

1. Tashibekov T.Ch. To the question of the need for the formation of a modern information system of technical standards in the construction industry. *Vek kachestva*. 2017. No. 2, pp. 84–99. URL: <http://www.agequal.ru/pdf/2017/217006.pdf> (date of access: 29.05.2023). (In Russian).
2. Systematization and analysis of normative and technical documentation on the use of polymer composite materials in transport construction. Part 1 / I.I. Ovchinnikov, I.G. Ovchinnikov, E.D. Ilchenko, E.S. Mikhaldykin. *Naukovedenie*. 2017. Vol. 9. No. 1. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/32TVN117.pdf> (date of access: 29.05.2023). (In Russian).
3. Systematization and analysis of normative and technical documentation on the use of polymer composite materials in transport construction. Part 2 / I.I. Ovchinnikov, I.G. Ovchinnikov,



E.D. Ilchenko, E.S. Mikhaldykin. *Naukovedenie*. 2017. Vol. 9. No. 1. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/45TVN117.pdf> (date of access: 29.07.2023). (In Russian).

### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

### CITATION FOR AN ARTICLE

Kuryatnikov Yu.Yu. Contradictions in the normative documentation for reinforced concrete products // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2021. No. 3 (19), pp. 43–49.

УДК 69.059.14:728:624.011.1

## К ВОПРОСУ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ЗДАНИЙ ИЗ CLT-ПАНЕЛЕЙ

*Ю.Н. Москвина*

*Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Москвина Ю.Н., 2023

**Аннотация.** В статье дан обзор мероприятий по продвижению применения CLT-панелей, а также законодательной и нормативной базы в области технического регулирования деревянного домостроения. Отмечены достоинства конструкционного материала.

**Ключевые слова:** строительство, деревянное домостроение, CLT-панели, техническое регулирование, научно-исследовательская деятельность.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-3-49-53**

Одним из современных направлений развития строительной отрасли является применение нового конструкционного материала из перекрестно-клееной древесины (CLT-панелей, Cross Laminated Timber). В европейских странах более 30 лет используются CLT-технологии, в том числе и в высотном строительстве. Для России строительство из CLT-панелей является новым продуктом, но решения на государственном уровне, научно-исследовательская и технологическая деятельность в области деревянного домостроения направлены на формирование нормативной базы и расширение применения конструкций из перекрестно-клееной древесины. В настоящее время одни из важных тенденций в данной отрасли – совершенствование технического регулирования и стандартизация продукции.

В отечественных нормативных документах для древесины перекрестно-клееной применяется аббревиатура ДПК. Этот материал используется в качестве несущих и ограждающих конструкций (плит перекрытий и покрытий, панелей стен и перегородок и др.) и элементов обеспечения пространственной жесткости зданий и сооружений [1].

CLT-панели являются высокотехнологичной продукцией, к основным достоинствам которой относятся:

высокие прочностные характеристики, теплоизоляционные свойства и характеристики пожарной безопасности;

экологичность;

высокая степень заводской готовности;

CLT-панели имеют небольшой вес по сравнению с железобетонными конструкциями, что позволяет снизить транспортные расходы и использовать строительную технику с меньшей грузоподъемностью. При этом стоимость монтажных работ в среднем снижается на 30 %. Сроки строительства домов из CLT-панелей в 2,5 раза короче сроков строительства объектов из монолитных конструкций [2].

По данным экспертов, в настоящее время годовой объем европейского рынка CLT-панелей составляет около 970 тыс. м<sup>3</sup>, из которых порядка 80 % продукции приходится на производителей из Австрии и Германии [3].

Деревянное домостроение до недавнего времени было востребовано в основном в индивидуальном жилищном строительстве. Сегодня строительство зданий с применением деревянных конструкций ориентировано на индустриальное производство и массовое внедрение, в том числе строительство высотных многоквартирных домов.

В России на строительство зданий из дерева приходится менее 1 % объема жилищного строительства. По мнению экспертов, к 2030 году доля деревянных многоквартирных домов вырастет до 7 % [4].

В Стратегии развития строительной отрасли до 2030 года в части продвижения домостроения из CLT-панелей запланированы следующие мероприятия:

повышение производства конструкций из ДПК;

проведение научных исследований, в том числе в части пожарной безопасности и энергоэффективности зданий из деревянных конструкций;

включение конструктивных систем деревянного домостроения в план мероприятий по реализации национальных проектов [5].

В рамках продвижения строительства объектов из CLT-панелей Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства утвердило План мероприятий по развитию деревянного домостроения на период до 2024 года (Дорожную карту), где одними из направлений являются совершенствование технического регулирования и стандартизация деревянного домостроения. Документом предусмотрен комплекс научно-исследовательских работ для обеспечения требований Федерального закона № 384-ФЗ, а также разработка мероприятий, связанных с более широким применением CLT-технологий [6].

За последнее время проведен ряд научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по оценке экономической целесообразности массового применения CLT-панелей, а также по определению требуемых параметров деревянных конструкций.

Создание нормативной базы для строительства деревянных многоэтажных домов планируется завершить к 2024 году. До конца 2023 года Минстрой запланировал решение

вопросов, связанных с пожарной безопасностью и сейсмической устойчивостью зданий из ДПК [7].

В настоящее время принято около 30 стандартов и 6 сводов правил (СП), регулирующих проектирование и строительство зданий из дерева, из которых основные документы – это СП 451.1325800.2019 «Здания общественные с применением деревянных конструкций. Правила проектирования» и СП 452.1325800.2019 «Здания жилые многоквартирные с применением деревянных конструкций. Правила проектирования». Кроме того, внесены изменения в СП 64 СНиП II-25-80 «Деревянные конструкции» в части требований по расчету ДПК. Сегодня допускается проектирование зданий с использованием деревянных конструкций высотой до 28 м вместо ранее разрешенных зданий высотой в 3 этажа. Решения по вопросам обеспечения пожарной безопасности приняты на основе методики расчета огнестойкости строительных конструкций с учетом внутренних и внешних пожаров объектов домостроения, а также с применением конструкций из древесины; методики оценки пожарной опасности объектов домостроения с применением конструкций из древесины, утвержденных МЧС России.

Принятые ГОСТ 33080-2014, 33081-2014 и ГОСТ Р 57786-2017 устанавливают классы прочности элементов, методы их определения для рационального использования пиломатериалов в качестве несущих элементов слоев многослойных элементов клееных конструкций.

Необходимые требования к разработке стандартов и технических условий устанавливает ГОСТ Р 56706-2022 «Плиты из перекрестноклееной древесины. Общие технические условия».

В 2022 году Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки инициировал разработку 5 новых стандартов в части технического регулирования деревянного домостроения. Новые проекты ГОСТов, в частности, включают технические требования к плитам перекрытий, стеновым и навесным панелям с перекрестным расположением слоев [8].

Кроме названного, подготовлены проекты ГОСТ Р «Конструкции деревянные клееные. Методы испытаний клеевых соединений при длительном нагружении в различных температурно-влажностных условиях», ГОСТ Р «Конструкции деревянные клееные. Общие требования к зубчатым клеевым соединениям» и ГОСТ Р «Плиты клееные из пиломатериалов с перекрестным расположением слоев. Методы оценки прочности и стойкости клеевых соединений».

Принятие решений на государственном уровне и активная научно-исследовательская деятельность в области деревянного домостроения свидетельствуют о признании строительства из CLT-панелей одним из перспективных направлений развития строительной отрасли. В настоящее время продолжается формирование технической базы применения конструкций из дерева, где главными направлениями являются поиск оптимальных решений конструктивной части, решений по обеспечению пожарной безопасности, повышению энергоэффективности зданий, устройству скрытой прокладки инженерных коммуникаций и электрических сетей. Актуальным также остается вопрос о расширении базы нормативно-методических документов в области проектирования и строительства зданий из ДПК.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. СП 64.13330.2017 Деревянные конструкции: утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 февраля 2017 г. № 129/пр. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456082589> (дата обращения: 20.08.2023).
2. Агентство экономической информации «Прайм». URL: <https://1prime.ru/energy/20230322/840150854.html> (дата обращения: 20.08.2023).
3. ЛеспромИнформ. URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=5195> (дата обращения: 20.08.2023).
4. Известия. URL: <https://iz.ru/1486488/2023-03-22/v-rossii-k-2030-godu-7-mnogokvartirnykh-domov-budut-derev-iannymi?ysclid=lm22itet5y787571000> (дата обращения: 20.08.2023).
5. Минстрой России. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/18723/> (дата обращения: 20.08.2023).
6. Минстрой России. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/press/v-rossii-budet-obespecheno-shirokoe-vnedrenie-mnogoetazhnogo-derevyannogo-domostroeniya/> (дата обращения: 20.08.2023).
7. Циан. URL: <https://zhk-obrazcovyy-kvartal-11-spb.cian.ru/novosti-v-2024-godu-iz-drevesiny-nachnut-stroit-doma-vysotoj-do-5-etazhej-329337/?ysclid=lm3519pdko283695731/> (дата обращения: 20.08.2023).
8. Главгосэкспертиза России. URL: <https://gge.ru/press-center/news/doma-iz-dereva-stanut-bolshimi/> (дата обращения: 20.08.2023).

**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. К вопросу технического регулирования строительства зданий из CLT-панелей // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 3 (19). С. 49–53.

---

**ON THE ISSUE OF TECHNICAL REGULATION  
OF THE CONSTRUCTION OF BUILDINGS FROM CLT-PANELS**

*Yu.N. Moskvinina*

*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The article gives an overview of measures to promote the use of CLT-panels, as well as the legislative and regulatory framework in the field of technical regulation of wooden house building. The advantages of the construction material are highlighted.

**Keywords:** construction, wooden house construction, CLT-panels, technical regulation, research activities.

**REFERENCES**

1. SP 64.13330.2017 Wooden structures: approved by the order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated February 27.2017. № 129/п. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456082589> (date of access: 20.08.2023). (In Russian).
2. Economic Information Agency «Prajm». URL: <https://1prime.ru/energy/20230322/840150854.html> (date of access: 20.08.2023). (In Russian).
3. LespromInform. URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=5195> (date of access: 20.08.2023). (In Russian).
4. Izvestiya. URL: <https://iz.ru/1486488/2023-03-22/v-rossii-k-2030-godu-7-mnogokvartirnykh-domov-budut-derev-iannymi?ysclid=lm22itet5y787571000> (date of access: 20.08.2023). (In Russian).
5. Ministry of Construction of Russia. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/18723/> (date of access: 20.08.2023). (In Russian).
6. Ministry of Construction of Russia. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/press/v-rossii-budet-obespecheno-shirokoe-vnedrenie-mnogoetazhnogo-derevyannogo-domostroeniya/> (date of access: 20.08.2023). (In Russian).
7. Cian. URL: <https://zhk-obrazcovyy-kvartal-11-spb.cian.ru/novosti-v-2024-godu-iz-drevesiny-nachnut-stroit-doma-vysotoj-do-5-etazhej-329337/?ysclid=lm3519pdko283695731/> (date of access: 20.08.2023). (In Russian).
8. Glavgosexpertiza of Russia. URL: <https://gge.ru/press-center/news/doma-iz-dereva-stanut-bolshimi/> (date of access: 20.08.2023). (In Russian).

**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. On the issue of technical regulation of the construction of buildings from CLT-panels // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 3 (19), pp. 49–53.

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

УДК 44.31.03:45.43.00:53.07.00

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА  
ЗАКОНОВ КВАНТОВОГО ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ.  
ЧАСТЬ II. ЗАКОНЫ КВАНТОВОГО ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
СФЕРИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ****А.Н. Макаров***Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Макаров А.Н., 2023

**Аннотация.** Дано математическое описание вывода второго–пятого законов теплового квантового излучения сферических газовых объемов. Отмечено, что сферическими газовыми объемами различных размеров (вплоть до сфер атомов) можно моделировать тепловое квантовое излучение газовых объемов любых размеров и форм, вписывая в газовые объемы сферы различного диаметра (до наносфер с размером атома).

**Ключевые слова:** квант, законы, тепловое излучение, газовые объемы, факел, электрическая дуга, печь, топка, камера сгорания.

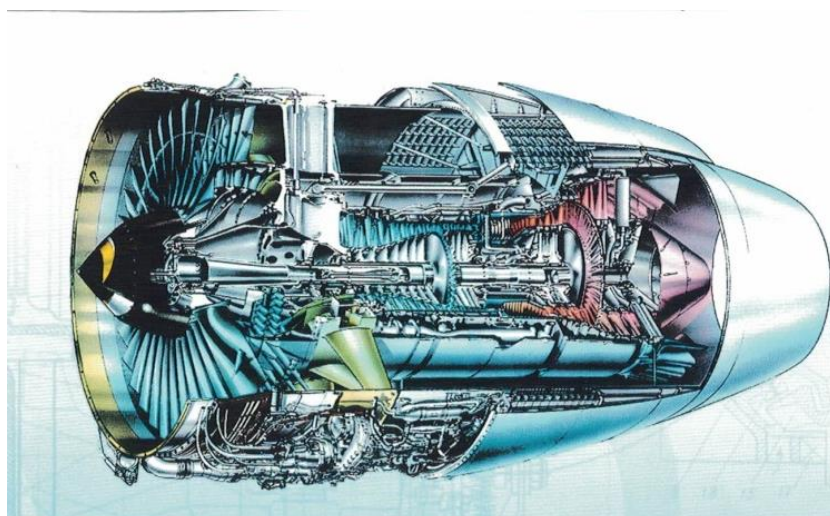
**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-3-54-62****ВВЕДЕНИЕ**

В XX веке в статьях, монографиях, учебниках российских и зарубежных ученых, конструкторов из-за отсутствия законов теплового квантового излучения газовых объемов и невозможности точного расчета теплообмена не существовало данных о причинах неравномерности износа и низкой стойкости футеровки стен, свода электродуговых сталеплавильных печей, неравномерности расплавления шихты, температуры металла по периметру. Отсутствовали результаты расчета распределения потоков теплового квантового излучения факела по высоте и периметру топков, по горелочному устройству, не было объяснений неравномерности парообразования и отложений в трубах. Кроме того, не имелось данных о распределении тепловых потоков по всем поверхностям, граням и высоте нагреваемых изделий в факельных печах, отсутствовали расчетные данные распределения потоков тепловых излучений факела по пламенной трубе и горелочному устройству камер сгорания газотурбинных установок (КС ГТУ) электростанций.

В XX веке, несмотря на приложенные для решения проблемы колоссальные интеллектуальные усилия, факелы, излучающие газовые объемы, оставались малоизученными. Не было формул для определения основных параметров теплового квантового излучения газовых объемов, факелов. Решение проблемы зашло в тупик.

Отсутствие точных данных расчетов теплообмена компенсировались результатами дорогостоящих многолетних экспериментальных исследований теплообмена. Например,

на разработку, экспериментальные исследования, создание газотурбинного двигателя (ГТД) АЛ-31Ф для самолета СУ-27 ушло 10 лет (рис. 1). Многолетние испытания ГТД, ГТУ связаны с высокими температурами, при которых работают камеры сгорания, газовые турбины (ГТ). Температура газов в современных КС и ГТ ГТУ составляет 1 500–1 600 °С, при этих температурах с использованием воздушного охлаждения КС и ГТ должны работать круглосуточно в течение нескольких лет до планового текущего ремонта. Обеспечение такого режима работы ГТД, ГТУ является сложной задачей. Большую часть времени, ввиду отсутствия точных расчетных методик, занимали испытания на опытно-экспериментальных стендах ГТД и отдельных его блоков: камеры сгорания, газовой турбины, компрессора. Испытания КС проводятся до полного ее разрушения с последующей коррекцией конструкции КС и охлаждения пламенной трубы, заменой отдельных деталей, узлов и материала для изготовления КС.



а



б

Рис. 1. Газотурбинный двигатель ПС-90А1 с тягой 17 400 кГс, производство – «Пермские моторы» (а); ПС-90А1 на самолете ТУ-204 (б)

После коррекции конструкции КС, охлаждающей пламенной трубы, замены отдельных деталей, узлов изготавливают новую КС и вновь осуществляют испытания до полного ее разрушения. Для создания, выхода на надежную и долговечную КС разрушают до 50 опытных экземпляров КС, внося в каждый из них конструктивные изменения, используя новые жаростойкие, жаропрочные сплавы для изготовления отдельных деталей, узлов КС. До 50 испытаний проходят ГТ до полного их разрушения, затем происходит замена деталей, узлов при использовании для изготовления новых жаростойких, жаропрочных, коррозионноустойчивых сплавов с последующим выходом на надежную, долговечную работу ГТ и ГТД в целом.

### **ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕПЛООВОГО КВАНТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ ЛЮБОЙ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ**

В 1978–1982 годах автором был открыт первый закон теплового квантового излучения ионизированных (электрических дуг электродуговых сталеплавильных печей) газовых объемов, который впоследствии был распространен на неионизированные газовые объемы любой формы и размеров. Согласно первому закону теплового квантового излучения газовых объемов, при расчетах теплового излучения газовых объемов на любую расчетную площадку необходимо учесть квант излучения на расчетную площадку каждого атома. Требуется учесть все кванты энергии излучения всех атомов, составляющих газовый излучающий объем. Впоследствии, в 1996–2001 годах, автором были открыты законы теплового излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов, позволяющие при расчетах теплообмена излучением в печах, топках, камерах сгорания учесть квант энергии излучения каждого атома и всех атомов, составляющих газовый излучающий объем. В конце XX века была решена сверхсложная задача расчета теплового квантового излучения газовых объемов на расчетные площадки в печах, топках, камерах сгорания. Это решение дало возможность учесть излучение кванта энергии каждого атома и всего гигантского количества квантов энергии всех атомов, составляющих излучающие газовые объемы печей, топок, камер сгорания и образующихся при факельном сжигании жидкого, газообразного, пылевидного топлива.

Согласно открытым законам теплового квантового излучения газовых объемов, новой концепции и методике расчета, в факелы печей, топок, камер сгорания вписываются излучающие цилиндрические газовые объемы, от которых осуществляется расчет тепловых потоков квантового излучения на поверхности нагрева. Однако факелы, газовые излучающие объемы могут иметь сложную объемную форму, которую цилиндрические газовые объемы не могут заполнить целиком. Остаются незаполненные части газового объема факела, квантовое излучение которых не учитывается в расчетах. Для повышения точности расчетов и более полного заполнения газовых излучающих объемов автор провел исследование теплового квантового излучения сферических газовых объемов. В ходе данной работы было сделано научное открытие. Суть его изложена ниже.

Сначала рассмотрим излучение изотермического сферического газового объема диаметром  $D_1 = 3$  м на расчетную площадку  $dF$  с размерами  $0,5 \times 0,5$  м, расположенную на вертикальной поверхности на расстоянии  $r = 3$  м от сферического газового объема (рис. 2). Перпендикуляр  $N$  к площадке  $dF$  проходит через центр сферического газового объема. Допустим, в сферическом газовом объеме одновременно излучают кванты  $15 \cdot 10^{15}$  атомов, равномерно заполняющих объем. Излучаемая газовым объемом мощность  $P = 45$  МВт, объем заключенного в сферу газа  $V = \pi D^3/6 = 14,13$  м<sup>3</sup>.



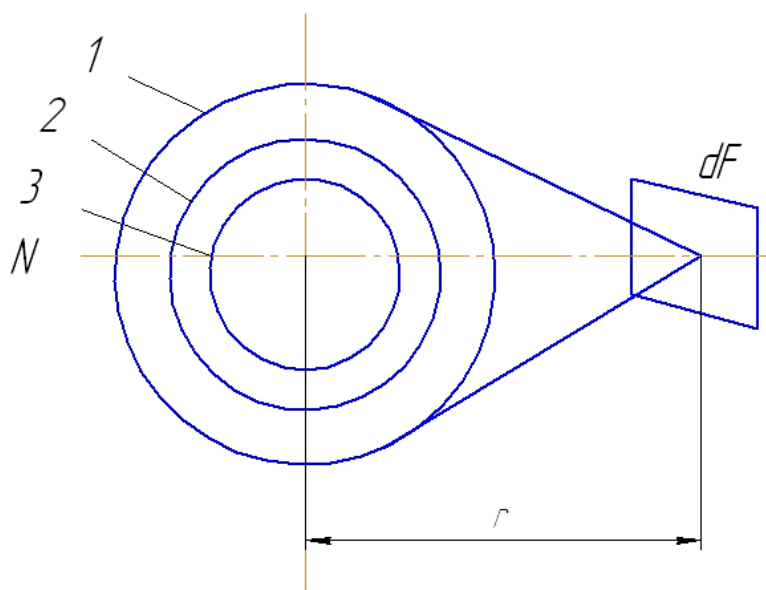


Рис. 2. Излучение сферического газового объема на расчетную площадку  $dF$

**Первый закон квантового излучения газовых объемов любой формы и размеров, в том числе сферических газовых объемов: плотность потока теплового квантового излучения, падающего от газового объема на расчетную площадку  $q_{FdF}$ , прямо пропорциональна его мощности  $P_\phi$ , угловому коэффициенту излучения  $\varphi_{FdF}$  и обратно пропорциональна коэффициенту поглощения  $k$ , средней длине пути квантов от всех атомов до площадки  $l$  и площади площадки  $F$ :**

$$q_{FdF} = \frac{\varphi_{FdF} P_\phi}{F e k l}. \quad (1)$$

Разделим изотермический сферический газовый объем на три равных сферических объема, имеющих общий центр. Диаметр первого сферического объема  $D_1 = 3$  м, второго  $D_2 = 2,62$  м, третьего  $D_3 = 2,08$  м. Объем излучающего изотермического газа в каждом объеме между сферами 1 и 2, 2 и 3, а также внутри сферы 3  $V_1 = V_2 = V_3 = V/3 = 4,71$  м<sup>3</sup>. Получили три изохорных изотермических концентрических сферических газовых объема, излучающих кванты на расчетную площадку  $dF$ .

Допустим, что излучение квантов энергии внутренних слоев концентрических сферических газовых объемов поглощается соседними слоями, а наружу выходит излучение квантов только наружного поверхностного слоя атомов газовых объемов. В этом случае излучение квантов трех изохорных изотермических концентрических сферических газовых объемов можно представить излучением трех сфер ( $F_1-F_3$ ). Формулы для расчета угловых коэффициентов излучения одной поверхности на другую были получены в XX столетии [1]. Угловой коэффициент излучения  $\varphi_{dFF}$  площадки  $dF$  на сферу  $F$  определяется по выражению [1]

$$\varphi_{dFF} = \frac{\cos \alpha}{H^2}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – угол между перпендикуляром  $N$  в центр площадки  $dF$  и лучом, соединяющим центры площадки и сферы;  $H = r/(D/2)$ .

Локальные угловые коэффициенты излучения концентричных сфер 1–3 на площадку  $dF$  рассчитываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \varphi_{F_1 dF} &= \frac{\varphi_{dFF_1} F_{dF}}{F_1} = \frac{0,25 \cdot 0,25}{3,14 \cdot 3^2} = 0,002 \text{ 2}; \\ \varphi_{F_2 dF} &= \frac{\varphi_{dFF_2} F_{dF}}{F_2} = \frac{0,189 \cdot 0,25}{3,14 \cdot 2,62^2} = 0,002 \text{ 2}; \\ \varphi_{F_3 dF} &= \frac{\varphi_{dFF_3} F_{dF}}{F_3} = \frac{0,121 \cdot 0,25}{3,14 \cdot 2,08^2} = 0,002 \text{ 2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\varphi_{dFF_1}$ ,  $\varphi_{dFF_2}$ ,  $\varphi_{dFF_3}$  – угловые коэффициенты излучения площадки  $dF$  на сферы 1–3 соответственно;  $F_{dF}$  – площадь площадки  $dF$ ;  $F_1$ – $F_3$  – площадь сфер 1–3.

Поскольку законы теплового квантового излучения цилиндрических и сферических газовых объемов близки по математическому описанию и формулировке, то обозначим имеющие сходство законы одинаковыми номерами. Следующие законы соответствуют действительному тепловому квантовому излучению изохорных изотермических сферических газовых объемов любых размеров (от диаметра астрономического тела (звезды, солнца) до диаметра атома).

**Из результатов расчета (3) следует второй закон теплового квантового излучения изохорных изотермических концентричных сферических газовых объемов: локальные угловые коэффициенты квантового излучения изохорных изотермических концентричных сферических газовых объемов, слоев равны.**

Угловые коэффициенты излучения являются основными расчетными величинами теплообмена излучением в печах, топках, камерах сгорания. При моделировании квантового излучения сотен и тысяч концентричных сфер, входящих в объем первой сферы, был бы получен аналогичный результат: элементарные угловые коэффициенты квантового излучения концентричных газовых слоев равны. Из второго закона следует, что при расчете угловых коэффициентов квантового излучения  $\varphi V dF$  изохорных изотермических концентричных газовых объемов нет необходимости решать тройной интеграл, аналогичный описанному в [2]:

$$\varphi_{VdF} = \iiint_V \frac{\cos \alpha_i \cos \beta_i}{2\pi^2 l_i^2} d\alpha d\beta dl. \quad (4)$$

Согласно второму закону, для расчета угловых коэффициентов квантового излучения изохорных изотермических концентричных газовых объемов достаточно определить угловой коэффициент квантового излучения концентричного сферического газового объема бесконечно малого диаметра, т.е. выполнить однократное интегрирование.

Рассчитаем плотность потока теплового квантового излучения на площадку  $dF$  изохорных изотермических концентричных сферических газовых слоев, в которых выделяются мощности излучения  $P_1 = P_2 = P_3 = 42/3 = 14$  МВт. Принимаем параметры газовой среды, характерные для топки парового котла, коэффициент поглощения газовой

среды  $k = 0,162$  [3–6]. Результаты расчета плотностей потоков квантовых излучений концентричных сферических газовых слоев на расчетную площадку  $dF$ :

$$\begin{aligned} q_{F_1 dF} &= q_{F_2 dF} = q_{F_3 dF} = \frac{\varphi_{F_1 dF} P_1}{F_{dF}} e^{-kl_1} = \frac{\varphi_{F_2 dF} P_2}{F_{dF}} e^{-kl_2} = \frac{\varphi_{F_3 dF} P_3}{F_{dF}} e^{-kl_3} = \\ &= \frac{0,002 \cdot 2 \cdot 14 \cdot 10^3}{0,25} e^{-0,162 \cdot 3} = \frac{0,002 \cdot 2 \cdot 14 \cdot 10^3}{0,25} e^{-0,162 \cdot 3} = \\ &= \frac{0,002 \cdot 2 \cdot 14 \cdot 10^3}{0,25} e^{-0,162 \cdot 3} = 76,1 \text{ кВт/м}^2, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $l_1 = l_2 = l_3 = l$  – средняя длина пути квантов от атомов 1–3-го сферических слоев до расчетной площадки.

Средняя длина пути квантов  $l$  определяется как среднеарифметическое расстояние от элементарных частиц, атомов, из которых состоят поверхности сфер, до расчетной площадки  $dF$ . Средняя длина пути квантов любого сферического газового слоя равна среднеарифметическому расстоянию от центра симметрии концентричных сфер до расчетной площадки. Из результатов расчетов следуют еще два закона квантового излучения изохорных изотермических концентричных сферических газовых слоев, объемов.

**Третий закон: средняя длина пути квантов от атомов изохорных изотермических концентричных сферических газовых объемов до расчетной площадки равна расстоянию от центра сфер до расчетной площадки:**

$$l = l_1 = l_2 = l_3 = r. \quad (6)$$

**Четвертый закон: плотности потоков квантового излучения, падающих от изохорных изотермических концентричных сферических газовых объемов на расчетную площадку, равны.**

Суммарная плотность потоков излучений, падающих от трех изохорных изотермических концентричных сферических газовых объемов на площадку  $dF$ , определяется согласно принципам наложения, суммирования потоков квантовых излучений, падающих на расчетную площадку от отдельных источников теплового квантового излучения [7–12]:

$$q_{F dF} = \sum_{i=1}^3 q_{F dF} = 288,3 \text{ Вт/м}^3. \quad (7)$$

Допустим, что мощность квантового излучения  $P = 42$  МВт выделяется в третьем сферическом газовом объеме. Найдем плотность потока теплового излучения третьего сферического газового объема на площадку  $dF$ :

$$\begin{aligned} q_{F_3 dF} &= \frac{\varphi_{F_3 dF} P}{F_{dF}} e^{-kl_3} = \frac{0,002 \cdot 2 \cdot 42 \cdot 10^3}{0,25} e^{-0,162 \cdot 3} = \\ &= 228,3 \text{ кВт/м}^2. \end{aligned} \quad (8)$$

**Пятый закон теплового квантового излучения изохорных изотермических концентричных сферических газовых объемов, слоев вытекает из результатов расчетов по выражениям (7) и (8): суммарная плотность потоков тепловых**

квантовых излучений, падающих на расчетную площадку от нескольких излучающих и поглощающих изохорных изотермических концентрических сферических газовых объемов, равна плотности потока квантового излучения на расчетную площадку концентрического сферического газового объема малого диаметра при выделяющейся в нем мощности квантового излучения, равной суммарной мощности квантовых излучений, выделяющихся во всех концентрических сферических газовых объемах, излучающих на расчетную площадку:

$$q_{F_3dF} = q_{FdF} = \sum_{i=1}^3 q_{F_i dF}. \quad (9)$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытые законы теплового квантового излучения изохорных изотермических концентрических сферических газовых объемов позволяют исследователям, конструкторам рассчитать тепловые потоки, среднюю длину пути квантов, угловые коэффициенты излучения газовых объемов любой сложной объемной формы, вписывая в них сферические объемы вплоть до сферических объемов атомов [13–16].

В зависимости от сложности формы в газовые объемы могут быть вписаны десятки, сотни, 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 квантовое излучение газовых объемов на поверхности нагрева с высокой точностью.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением. М.: Энергоатомиздат. 1991. 432 с.
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. Спероу 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., Швыдкой 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 установок. М. – Вологда: Инфра-Инженерия. 2022. 452 с.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макаров А.Н. Математические доказательства законов квантового теплового излучения газовых объемов. Часть II. Законы квантового теплового излучения сферических газовых объемов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 3 (19). С. 54–62.

---

### MATHEMATICAL EVIDENCE OF THE LAWS OF QUANTUM THERMAL RADIATION OF GAS VOLUMES. PART II. LAWS OF QUANTUM THERMAL RADIATION OF SPHERICAL GAS VOLUMES

*A.N. Makarov*

*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The mathematical description of the derivation of the second-fifth laws of thermal quantum radiation of spherical gas volumes is given. It is noted that by spherical gas volumes of different sizes (up to spheres of atoms) it is possible to model thermal quantum radiation of gas volumes of any sizes and shapes by inscribing spheres of different diameters (up to nanospheres with atom size) into gas volumes.

**Keywords:** quantum, laws, thermal radiation, gas volumes, torch, electric arc, furnace, furnace, combustion chamber.

#### REFERENCES

1. Bloch A.G., Zhuravlev Yu.A., Ryzhkov L.N. *Teploobmen izlucheniem [Heat transfer by radiation]: Handbook*. Moscow: Energoatomizdat. 1991. 432 p.
2. Makarov A.N. *Teploobmen v elektrodugovyh i fakel'nyh metallurgicheskikh pechah i energeticheskikh ustanovkakh [Heat transfer in electric arc and flare metallurgical furnaces and power plants]*. St. Petersburg: Lan. 2014. 384 p.

3. Bloch A.G. Teplovoe izluchenie v kotel'nyh ustanovkakh [Thermal radiation in boiler installations]. Leningrad: Energy. 1967. 326 p.
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. Mastryukov B.S. Teplotekhnicheskie raschety promyshlennykh pechej [Thermal engineering calculations of industrial furnaces: a textbook]. Moscow: Metallurgiya. 1972. 368 p.
8. Adrianov V.N. Osnovy radiacionnogo i slozhnogo teploobmena [Fundamentals of radiation and complex heat transfer]. Moscow: Energy. 1972. 463 p.
9. Siegel R., Howell J. Teploobmen izlucheniem [Heat transfer by radiation]. Moscow: Mir. 1975. 934 p.
10. Sperow E.M., Sess R.D. Teploobmen izlucheniem [Heat transfer by radiation]. Leningrad: Energy. 1971. 294 p.
11. Glinkov M.A., Glinkov G.M. Obshchaya teoriya pechej [General theory of furnaces]. Moscow: Metallurgy. 1978. 264 p.
12. Telegin A.S., Shvydkoi V.S., Yaroshenko Yu.G. Teplomassoperenos [Heat and mass transfer]. Moscow: Metallurgy. 1995. 400 p.
13. Makarov A.N. Laws of Heat Radiation from Sunrtees 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. Makarov A.N. Teploobmen v elektrodugovykh staleplavil'nykh i fakel'nykh nagrevatel'nykh pechah, topkakh parovykh kotlov, kamerah sgoraniya gazoturbinnnykh ustanovok [Heat transfer in electric arc steel-smelting and flare heating furnaces, furnaces of steam boilers, combustion chambers of gas turbine plants]. Moscow – Vologda: Infra-Engineering. 2022. 452 p.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

#### CITATION FOR AN ARTICLE

Makarov A.N. Mathematical evidence of the laws of quantum thermal radiation of gas volumes. Part II. Laws of quantum thermal radiation of spherical gas volumes // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2023. No. 3 (19), pp. 54–62.

УДК 629.331

**ЭЛЕКТРОМОБИЛИ: ПРОБЛЕМЫ, ТЕНДЕНЦИИ  
И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ***Ю.М. Павлова, О.Н. Торгованова, А.В. Павлов**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*© Павлова Ю.М., Торгованова О.Н.,  
Павлов А.В., 2023

**Аннотация.** В статье рассмотрены текущие тенденции и проблемы развития «умных электромобилей» на основе новых электрических и подключаемых гибридных электромобилей. Отмечено, что нынешняя электрическая сеть не способна выдержать повышение спроса на электроэнергию, необходимую для большого количества зарядных станций, особенно во время пиковых нагрузок. Кроме того, указано, что предполагаемая критическая инфраструктура для таких транспортных средств должна включать возможность обмена информацией, касающейся доступности энергии, расстояний, уровня загруженности и т.д. Изучены темы, связанные с контролем, реагированием на запросы, обеспечением инфраструктуры и коммуникационной инфраструктурой, требующейся для реализации вышеуказанных функций.

**Ключевые слова:** электромобиль, подключаемый гибридный электромобиль, умная сеть, Smart Grid, зарядная станция, быстрая зарядка, электрическая сеть, энергосистема, интеллектуальная сеть.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-3-63-74**

Разработка «умной сети» [1] дает возможность улучшить систему подключения, автоматизации и координации между поставщиками электроэнергии, потребителями и соответствующими транспортными и распределительными сетями с целью повышения эффективности использования электроэнергии. Традиционная парадигма электросетевого хозяйства быстро меняется в связи с более децентрализованным производством электроэнергии даже на уровне малых предприятий и жилых единиц, которые становятся способными покрывать часть своих энергетических потребностей. Кроме того, происходит переход к более энергозависимым источникам энергии, таким как ветер и солнечная энергия, что, в свою очередь, создает новые проблемы для управления потоками энергии в режиме реального времени, технологий учета и координации между различными задействованными агентами.

Что касается спроса, то автоконцерны активно продвигают электромобили (ЭМ) и подключаемые гибридные электромобили (ПГЭМ), чтобы снизить зависимость от ископаемого топлива вместе с выбросами. Однако, как показывают исследования [2], популярность ЭМ/ПГЭМ приведет к ограничению способности энергосистемы выдерживать пиковые нагрузки.

Считается, что внедрение распределенных и энергозависимых режимов выработки электроэнергии и наличие ЭМ требуют совершенствования коммуникационных технологий. В случае ЭМ и ПГЭМ уже принимаются меры по разработке технологий

обмена информацией и зарядом батарей «транспортное средство – транспортное средство» и «транспортное средство – инфраструктура», чтобы они могли взаимодействовать между собой и с существующей энергетической инфраструктурой для эффективного использования имеющейся мощности.

Реализация вышеуказанных концепций приведет к так называемому сценарию «транспортное средство – сеть», т.е. к системе, в которой электромобили взаимодействуют с энергосистемой для продажи услуг на спрос путем подачи электроэнергии в сеть либо путем регулирования скорости их зарядки. Общая концепция заключается в том, чтобы позволить транспортным средствам стать основными участниками сценария «умной сети», помочь им сбалансировать нагрузки, «заполняя провалы» (заряжаясь ночью, когда спрос низкий) и «сокращая пик» (отправляя энергию обратно в сеть, когда спрос высокий) [3]. Это могло бы дать энергосбытовым организациям новые способы предоставления услуг регулирования (путем поддержания стабильности напряжения и частоты) и создания резервных мощностей (путем удовлетворения внезапных потребностей в электроэнергии).

Указанный подход даст возможность наиболее эффективно эксплуатировать периодически используемые возобновляемые источники энергии, такие как энергия ветра. Будут применяться транспортные средства, способные накапливать избыточную энергию, вырабатываемую в ветреные периоды, и возвращать ее в сеть в периоды высокой нагрузки. Этот сценарий предлагает несколько сложных и интересных открытых задач алгоритмизации, пересекающихся в областях управления энергопотреблением и коммуникацией. Рассмотрим некоторые из этих вопросов и задач, а также роль зарядных станций и их емкости для хранения данных в удовлетворении возросших потребностей владельцев электромобилей в электроэнергии.

Быстрое реагирование на спрос позволяет генерирующим предприятиям и нагрузкам взаимодействовать автоматизированным образом в режиме реального времени, координируя спрос для сглаживания скачков напряжения. Основная цель заключается в том, чтобы избежать использования резервных генераторов путем сокращения доли спроса, вызывающего такие всплески, и дать возможность пользователям уменьшить свои расходы электроэнергии за счет ее использования в нерабочее время, когда тарифы на зарядку низкие. В настоящее время системы электросетей имеют разную степень связи с системами управления, включая генераторные установки, линии электропередач, подстанции и основных потребителей энергии. Как правило, информация передается в одном направлении – от пользователей и нагрузки обратно к коммунальным службам. Общий объем потребления электроэнергии пользователями может иметь очень широкое распределение вероятности, что требует наличия резервных генерирующих мощностей в режиме ожидания для реагирования на быстро меняющееся энергопотребление. «Этот односторонний поток информации обходится дорого; последние 10 % генерирующих мощностей могут потребоваться всего в 1 % случаев, а отключения электроэнергии могут дорого обойтись потребителям» [4]. Модель «транспортное средство – сеть» подходит для этой области, позволяя транспортным средствам стать активными участниками процесса на арене интеллектуальных сетей. С одной стороны, электрические или гибридные транспортные средства можно рассматривать как «движущиеся батареи», которые сеть может использовать при необходимости. Этот момент согласуется с наблюдением о том, что 90–95 % времени транспортные средства находятся на стоянке [5]. С другой стороны, для обеспечения эффективного проникновения ЭМ/ПГЭМ на рынок потребуются сменные зарядные станции, чтобы определить экологически чистое альтернативное решение.



Интегрированные и эффективные коммуникационные технологии необходимы для поддержки процессов более точного управления и сбора информации, лежащих в основе концепции интеллектуальной сети. Ключевая технология в этой структуре представлена связью по линиям электропередач (PLC – Power Line Communication), которая позволит использовать систему распределения энергии в качестве сигнальной инфраструктуры. Волоконно-оптические кабели также можно применять в качестве надежной высокоскоростной среды для связи в интеллектуальных сетях.

Тем не менее в случае ЭМ/ПГЭМ беспроводная связь необходима. Требуются дальнейшие исследования в данном направлении для решения связанных с интеллектуальными сетями проблем, таких как проблемы безопасности и надежности. Кроме того, беспроводная связь позволит стационарной инфраструктуре информировать клиентов или сами транспортные средства о колебаниях цен, чтобы контролировать модель реагирования на спрос и поддерживать стабильность запроса на электроэнергию с течением времени.

Ценообразование является ключевой регулируемой переменной, поскольку политика эффективного использования энергии может быть разработана на основе ценовых стимулов. В ряде стран пользование коммунальными услугами привело к установке во многих домах счетчиков электроэнергии с двойным тарифом, чтобы побудить людей потреблять электроэнергию в ночное время или в выходные дни, когда общий спрос со стороны крупных потребителей энергии (например, в промышленности) очень низок. В непиковое время спотовая цена значительно снижается по мере уменьшения спроса, что дает возможность использовать энергию для запаса в аккумулирующих радиаторах, а также для бытового потребления. В рамках «умной» сети вышеупомянутая идея может быть дополнительно изучена и детализирована в более точном временном масштабе, что приведет к изменениям цен в короткие сроки на основе оценки общего спроса в режиме реального времени. Личные предпочтения клиентов (например, использование только экологически чистой энергии) могут быть включены в эту новую парадигму энергосистемы.

Существуют две различные архитектуры подзарядки в дневное время: системы быстрой подзарядки и станции замены аккумуляторов, которые быстро заменяют разряженный аккумулятор полностью заряженным. Владельцы ПГЭМ/ЭМ могут счесть станции для замены аккумуляторов более привлекательными, поскольку общий процесс переключения занимает всего несколько минут. С другой стороны, первоначальные инвестиции в станции переключения аккумуляторов намного выше инвестиций в станции быстрой зарядки. Процесс переключения требует продвинутых автоматических роботов, для станций требуется больше пространства, а затраты на строительство в 2–3 раза выше, чем у станций быстрой зарядки [6]. Еще одним недостатком коммутационных станций является то, что они требуют совместимости и одинаковой производительности для всех аккумуляторов. Тем не менее данные станции представляют собой новую бизнес-модель, в которой клиенты могут платить за замененные батареи, а также оплачивать капитальные расходы на батарею на поэтапной основе.

В таблице показана типичная продолжительность зарядки электромобиля при использовании быстрой зарядки постоянным током.

Приблизительная скорость зарядки  
на станции быстрой зарядки постоянным током [7]

Мощность зарядки, кВт	Время для зарядки 80 % емкости, мин		
	Компактный электромобиль	Внедорожник/седан	Грузовик/большегруз
50	15	22	46
75	11	15	32
100	8	12	22
125	6,5	9	19
150	5	8	26

Быстрая и надежная связь между транспортными средствами и зарядными/коммуникационными станциями будет важна для того, чтобы водители могли найти ближайшую доступную станцию. С точки зрения оператора зарядной станции, жизненно важно иметь возможность прогнозировать и контролировать потребление энергии. С другой стороны, уже внедренные технологии, соответствующие стандартам (например, 4G и GPS), можно легко адаптировать. Тем не менее существует необходимость в разработке новых сетевых и коммуникационных стратегий в сочетании с ценообразованием и архитектурой интеллектуальных сетей, которые обеспечат быструю и надежную работу этой большой и сложной «киберфизической» системы.

Рассмотрим архитектуру станции быстрой зарядки электромобиля, целью которой является снижение непредсказуемости спроса на электроэнергию и в то же время предоставление владельцам транспортных средств качества обслуживания определенного уровня за счет использования локальной системы накопления энергии. Оценка производительности предлагаемой архитектуры зарядной станции проводится с учетом характеристик трафика, стохастического спроса на электроэнергию, размера локального хранилища энергии, параметров ценообразования и затрат.

Архитектура зарядной станции представлена на рис. 1. Основная идея заключается в том, что спрос на электроэнергию, исходящий от электромобилей, может быть покрыт либо за счет постоянной мощности, поставляемой коммунальным предприятием, либо за счет локального накопителя энергии. Избыточная мощность из сети используется для зарядки местного накопителя энергии, который, в свою очередь, используется для поддержания временных высоких нагрузок на зарядную станцию. Компонент локального хранения энергии в этой архитектуре играет важную роль в удовлетворении спроса клиентов.

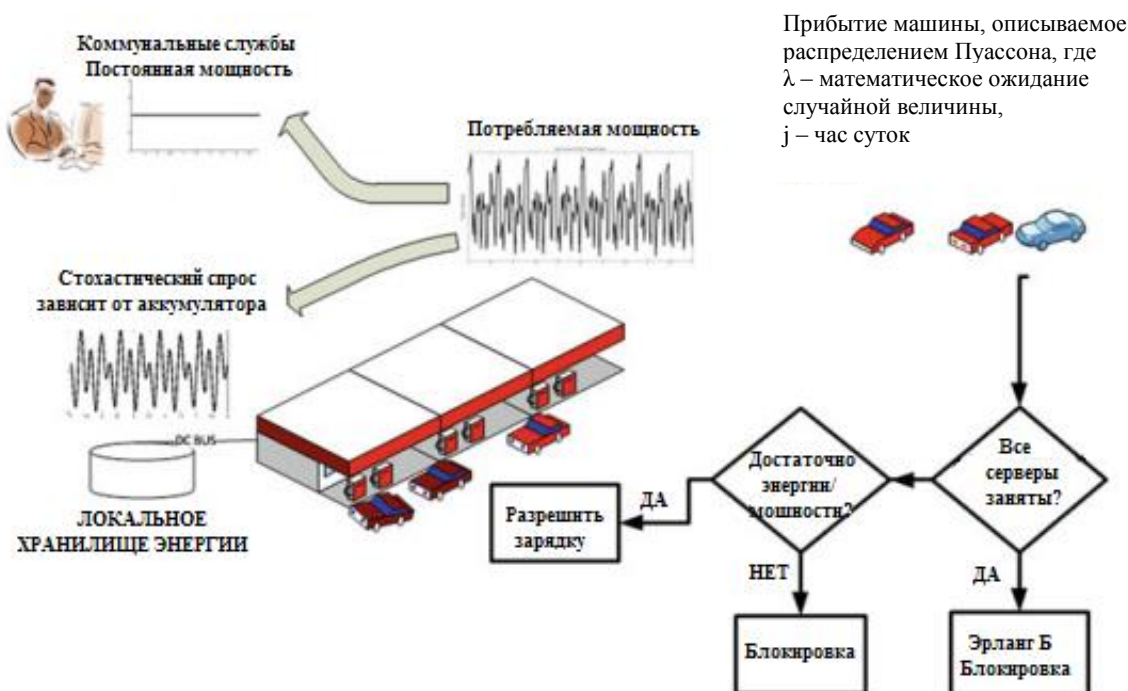


Рис. 1. Предлагаемая архитектура

Рассмотрим зарядную станцию как систему массового обслуживания  $M = M = 1$  [8]. Цель состоит в том, чтобы избежать перегрузки электросети, контролируя скорость прибытия транспортных средств посредством передачи информации о доступной мощности. Вероятность прибытия транспортных средств на зарядную станцию описывается распределением Пуассона. Станция может одновременно принимать до  $S$  автомобилей, обеспеченных электропитанием. Кроме того, станция оборудована накопительным блоком, который при полном заряде может вместить еще  $R$  транспортных средств. Количество времени для зарядки транспортного средства имеет экспоненциальное распределение скорости, при этом зарядка накопителя от сети также имеет данное распределение скорости. Наконец, предполагается, что транспортное средство заряжается от сети до тех пор, пока количество транспортных средств не превышает  $S$ , а дополнительные транспортные средства заряжаются от блока хранения электроэнергии; в противном случае они заблокированы [9].

Динамика указанной системы описывается непрерывной цепью Маркова в конечном двумерном пространстве состояний, одно измерение которого соответствует количеству транспортных средств, которые могут быть заряжены станцией, а второе – уровню заряда накопителя. «Переходы» представлены на рис. 2.

Отметим, что множество состояний  $(S + j, j)$ ,  $0 \leq j \leq R$  представляет собой блокирующие состояния, когда зарядная станция отклоняет въезд новых транспортных средств. Легко увидеть, что при заданной структуре цепь Маркова ориентирована и положительно рекуррентна, а поэтому эргодична. Его уникальное стационарное распределение может быть рассчитано путем решения уравнения  $\pi \times Q = 0$  с учетом ограничения  $\pi \times e = 1$ , где  $e$  обозначает вектор, состоящий из единиц, и с использованием стандартных численных методов [10].

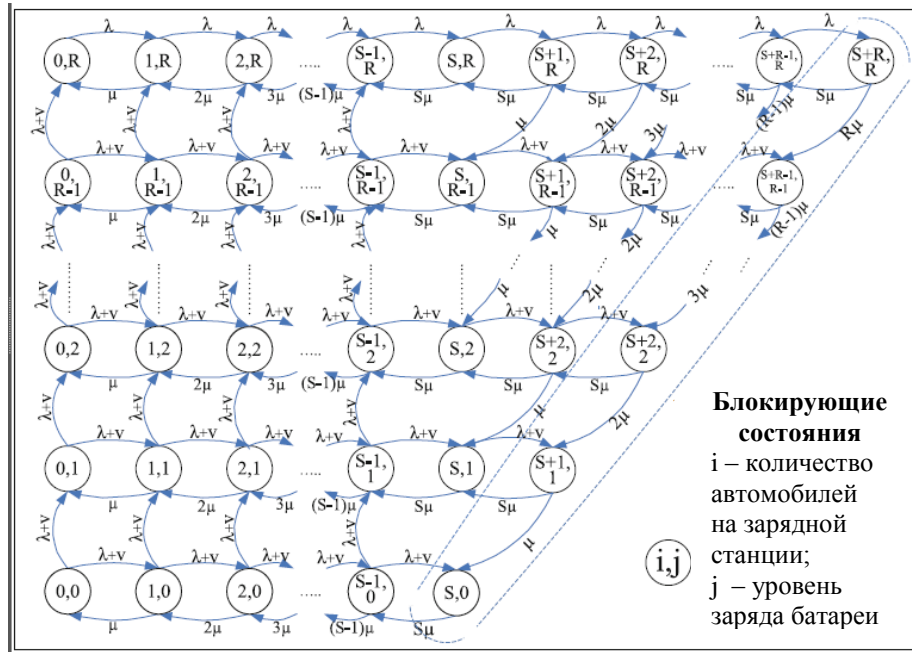


Рис. 2. Цепь Маркова с непрерывным временем

Рассмотрим некоторые рабочие характеристики предлагаемой системы; более подробная оценка приведена в источнике [11]. На рис. 3 вероятность блокировки как функция скорости поступления автомобилей при  $S = 6$  и при измененном значении  $R$  показана для системы  $\mu = \nu = 1$ . Видно, что чем больше  $R$ , тем меньше вероятность блокировки, как и ожидалось, но различия для  $R \geq 6$  имеют тенденцию быть довольно небольшими (рис. 4).

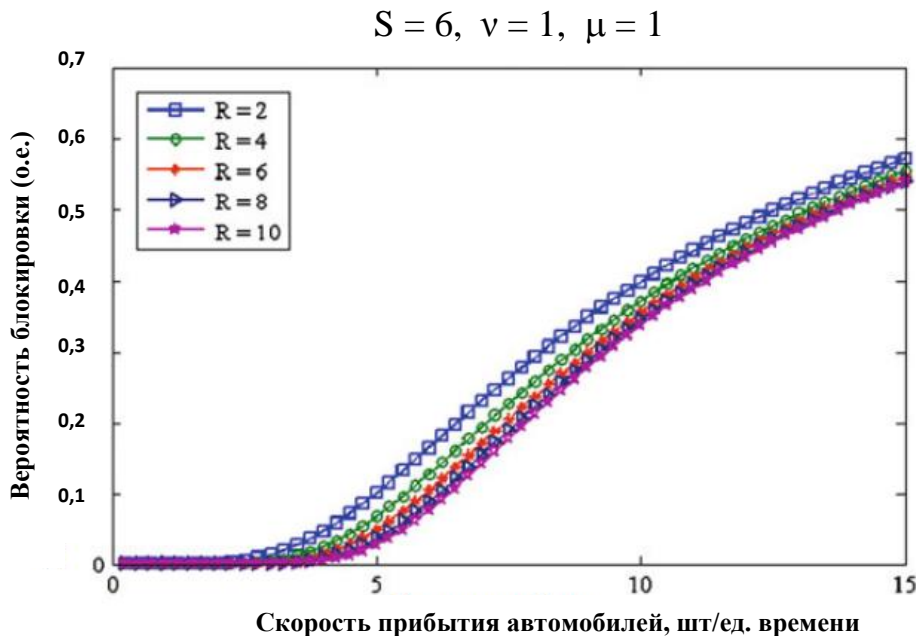


Рис. 3. Скорость поступления и вероятность блокировки  $S = 6$ ,  $R = 1-9$ 

$$\nu = 1, \mu = 1$$

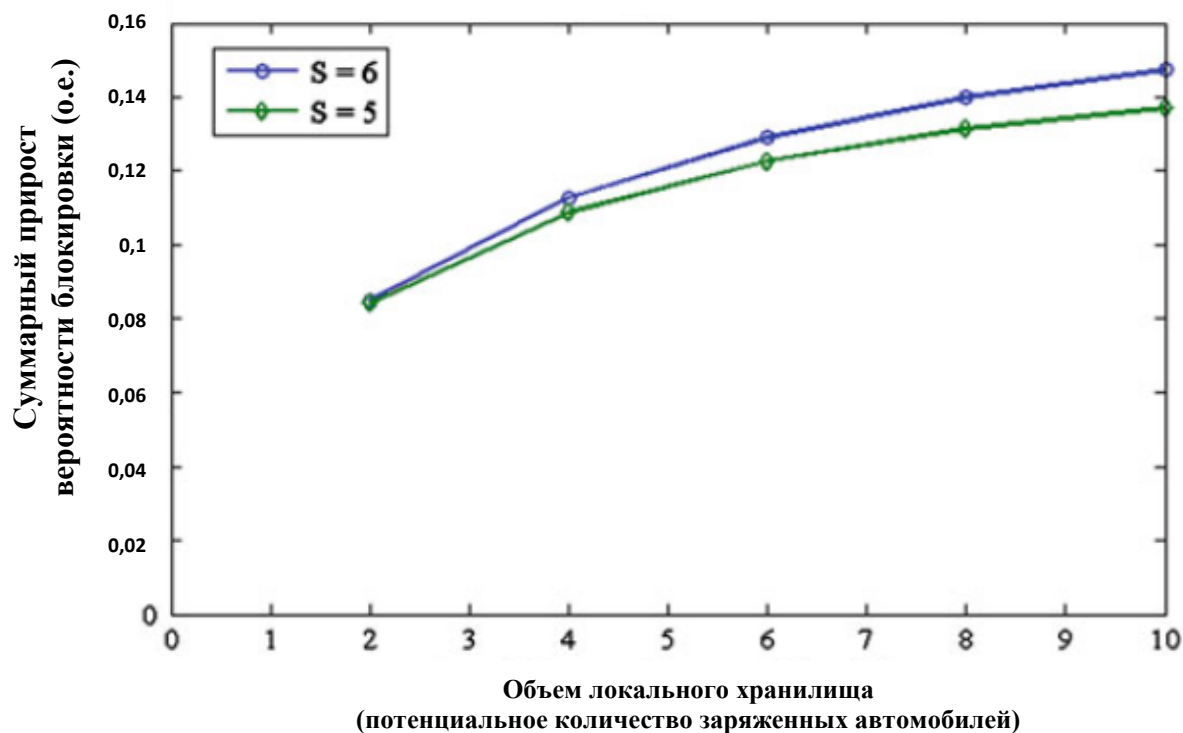


Рис. 4. Средний прирост вероятности блокировки в зависимости от размера батареи

Комбинации  $S$  и  $R$  обеспечивают заданную вероятность блокировки и результирующую максимально допустимую скорость поступления, снова фиксируя  $\nu = 1$  (рис. 5). Видно, что системы с большим  $S$  одинаково предпочтительны. Однако на практике такие конфигурации зарядных станций нежелательны, поскольку они создают большую нагрузку на сеть, как было указано ранее.

Вышеизложенная краткая оценка дает представление о компромиссах между размером накопителя энергии, вероятностью блокировки и скоростью прибытия транспортных средств. Далее возьмем простую модель, основанную на простых финансовых принципах, связывающую параметры ценообразования с параметрами модели массового обслуживания. Эта модель может служить руководством для выбора наилучшего рабочего диапазона зарядной станции, а также возможных стратегий управления (рис. 6).

$$\nu = 1, \mu = 1$$

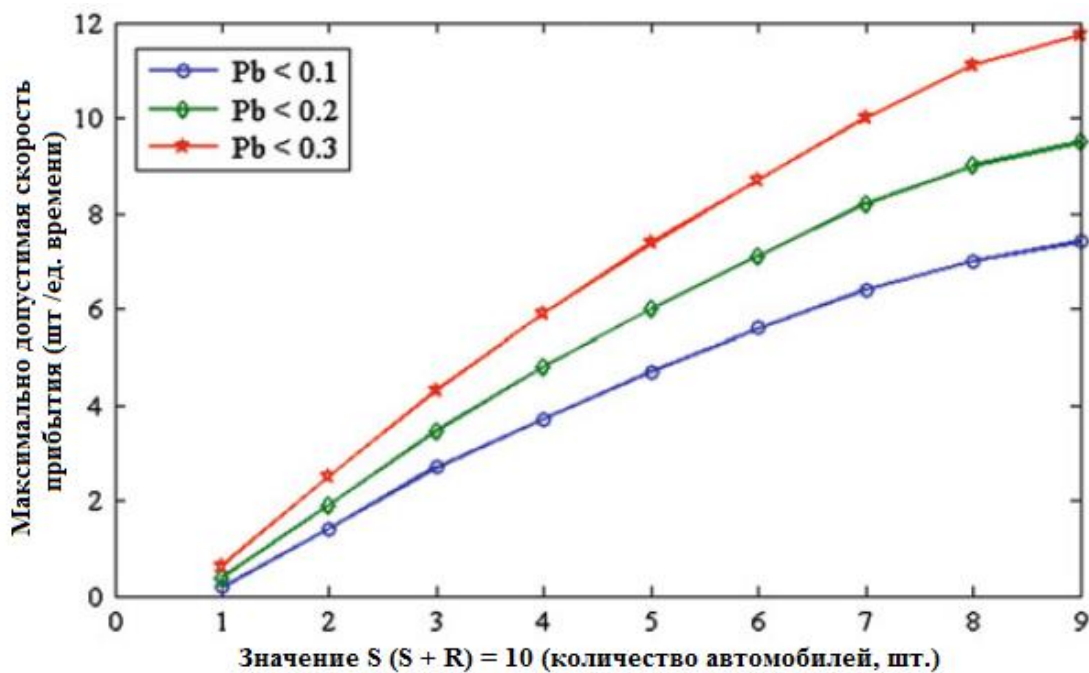


Рис. 5. Максимальная поддерживаемая скорость прибытия для заданной вероятности блокировки

$$S = 6, \nu = 1, \mu = 1$$

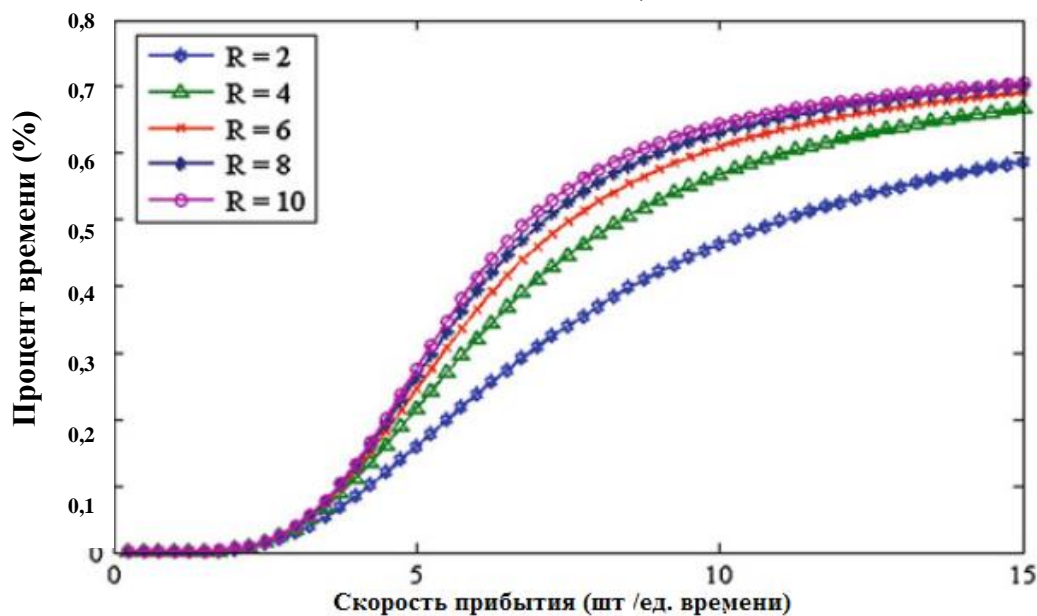


Рис. 6. Максимальная поддерживаемая скорость прибытия для заданной вероятности блокировки

Предполагается, что оператор зарядной станции получает доход от каждого успешно заряженного транспортного средства. Однако заблокированные транспортные средства – это недовольные клиенты-водители, которым необходимо возместить ущерб.

Пусть  $R_g$  и  $R_l$  будут доходом, полученным в расчете на одно транспортное средство при зарядке от сети и накопителя соответственно. Пусть  $C_b$  обозначает стоимость заблокированного транспортного средства,  $C_0$  – фиксированную стоимость установки хранилища, а  $C_a$  – стоимость приобретения, пропорциональную его вместимости  $R$ .

Пусть функция  $\rho^{(g)} = \{ (I, j) : 0 \leq i \leq S, 0 \leq j \leq R \}$  обозначает состояния зарядки сети,  $\rho^{(l)} = \{ (i, j) : S + j \leq i \leq S + R, 1 \leq j \leq R \}$  – заряд накопителя. Обозначим также через  $\rho^{(bl)}$  блокирующие состояния. Наконец,  $\pi(s)$  – стационарная вероятность общего состояния  $s \equiv (i, j)$  и  $i(s)$  – количество транспортных средств, получающих обслуживание в пределах  $s$ . Тогда предлагаемая функция прибыли может быть записана как

$$P = \sum_{s \in \rho^{(g)}} R_g i(s) \pi(s) + \sum_{s \in \rho^{(l)}} R_l i(s) \pi(s) - (C_0 + RC_a) - \sum_{s \in \rho^{(bl)}} C_b i(s) \pi(s).$$

В соответствии со спецификацией различных параметров модели ( $R_g = R_l = 1$ ,  $C_b = 1,25$ ,  $C_0 = 2$  и  $C_a = 0,001$ ) устанавливаем мощность зарядки от сети на  $S = 6$ , скорость зарядки – на  $\mu = \nu = 1$  и, варьируя размер накопителя, построим зависимость прибыли от скорости поступления (рис. 7), установив пропускную способность сети  $S = 6$ ,  $\mu = \nu = 1$  и изменяя как скорость поступления от 1 до 9, так и  $R$  от 5 до 9. Очевидно, что при очень малых скоростях прибытия станция невыгодна из-за малого количества обслуживаемых транспортных средств, в то время как при больших скоростях происходит то же самое из-за большого количества отклоненных транспортных средств. Стоит отметить, что для всех размеров  $R$  прибыль максимизируется при одной и той же скорости поступления, хотя для больших размеров  $R$  прибыль одинакова для большего диапазона скоростей поступления.

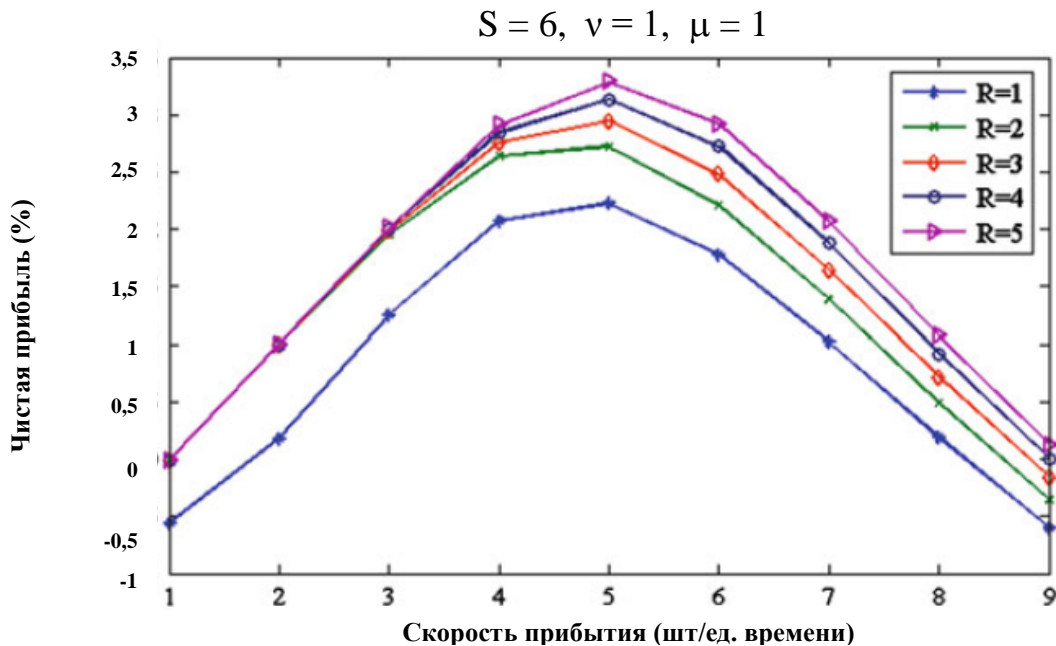


Рис. 7. Максимальная поддерживаемая скорость прибытия для заданной вероятности блокировки



Модель предполагает возможность выбора размера станции (R; S) на основе финансовых принципов. Это также позволит оценить различные схемы поощрения владельцев транспортных средств, чтобы они отказались от зарядки своей машины в определенное время, тем самым снизив скорость прибытия и, следовательно, вероятность блокировки за счет дополнительных затрат для оператора станции.

В настоящей статье мы рассмотрели ряд вопросов и проблем, связанных с интеллектуальными транспортными средствами в эпоху интеллектуальных сетей и в первую очередь с требованиями к управлению, связи и инфраструктуре. Как можно увидеть, существует потребность в зарядных станциях, включающих в себя блок хранения для того, чтобы справляться с пиковыми нагрузками и обеспечивать при этом приемлемое качество обслуживания транспортных средств. Была введена стохастическая модель, которая позволила оценить производительность зарядной станции с учетом характеристик трафика, размера накопителя энергии, ценовых и стоимостных параметров. Такие идеи важны при проектировании будущих зарядных станций.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколова Ю.М. «SMARTGRID» в России // *Теоретические, экспериментальные и прикладные исследования молодых ученых тверского государственного технического университета: Сборник научных трудов*. Тверь: ТвГТУ. 2017. С. 362–366.
2. Крылов К. Выдержит ли современная энергосистема, если все пересядут на электромобили? URL: <https://news.itmo.ru/ru/science/cyberphysics/news/10193/> (дата обращения: 18.03.2023).
3. Детинич Г. Ночные тарифы на электричество нужно отменить из-за распространения электромобилей, выяснили ученые. URL: <https://3dnews.ru/1074998/nochnie-tarifi-zlo-elektromobili-nado-zaryagat-dnyom-i-na-rabote-schitayut-amerikanskie-uchyonie> (дата обращения: 19.03.2023).
4. Smart grid. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/финансы> (дата обращения: 25.03.2023).
5. Barter P. "Cars are parked 95% of the time". Let's check!. URL: [turbopages.org/proxy\\_u/en-ru.ru.eb5112cf-64f59199-ac21c22b-74722d776562/https/www.reinventingparking.org/2013/02cars-are-parked-95-of-time-lets-check.html](https://turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.eb5112cf-64f59199-ac21c22b-74722d776562/https/www.reinventingparking.org/2013/02cars-are-parked-95-of-time-lets-check.html) (дата обращения: 25.03.2023).
6. Arora S., Abkenar A.T., Jayasinghe S.G., Tammi K. Chapter 5. EV Battery Pack Engineering—Electrical Design and Mechanical Design // *Heavy-Duty Electric Vehicles*. 2021, pp. 105–134.
7. Электромобиль: устройство, принцип работы, инфраструктура / Э. Джутон, К. Рейн, В. Совант-Мойно, Ф. Орсини, К. Сабер, С. Бача, О. Бету, Э. Лабуре; пер. с франц. В.И. Петровичева. М.: ДМК Пресс. 2022. 440 с.
8. M/M/1 queue. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/M/M/1\\_queue](https://en.wikipedia.org/wiki/M/M/1_queue) (дата обращения: 04.04.2023).
9. Turitsyn K., Sinitsyn N., Backhaus S., Chertkov M. Robust broadcast-communication control of electric vehicle charging // *2010 first IEEE international conference on smart grid communications (SmartGridComm)*. 2010, pp. 203–207.
10. Stewart W.J. Probability, Markov chains, queues, and simulation: the mathematical basis for performance modeling. Princeton University Press, New Jersey. 2010.
11. Local energy storage sizing in plug-in hybrid electric vehicle charging stations under blocking probability constraints / I.S. Bayram, G. Michailidis, M. Devetsikiotis, S. Bhattacharya, A. Chakraborty, F. Granelli // *Architectures and models for the smart grid (IEEE*



*SmartGridComm*) (*IEEE SmartGridComm 2011 track-architectures and models*). Brussels, Belgium. 2011.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*ПАВЛОВА Юлия Михайловна* – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение и электротехника», ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sokolhawk98@gmail.com

*ТОРГОВАНОВА Ольга Николаевна* – старший преподаватель кафедры иностранных языков, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: maerz25@mail.ru

*ПАВЛОВ Александр Вячеславович* – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: pavlovaleksandr636@gmail.com

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Павлова Ю.М., Торгованова О.Н., Павлов А.В. Электромобили: проблемы, тенденции и проектирование зарядных станций // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 3 (19). С. 63–74.

---

## ELECTRIC VEHICLES: PROBLEMS, TRENDS AND DESIGN OF CHARGING STATIONS

*Yu.M. Pavlova, O.N. Torgovanova, A.V. Pavlov*  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The paper discusses the current trends and challenges in the development of "smart electric vehicles" based on new electric and plug-in hybrid electric vehicles. It is noted that the current electrical grid is unable to handle the increased demand for electricity needed for the large number of charging stations, especially during peak times. It is also indicated that the envisioned critical infrastructure for such vehicles should include the ability to share information regarding energy availability, distances, congestion levels, etc. Topics related to control, demand response, infrastructure provisioning and communication infrastructure required to realise the above functions are explored.

**Keywords:** electric vehicle, plug-in hybrid electric vehicle, smart grid, smart grid, charging station, fast charging, electric grid, power grid, smart grid.

### REFERENCES

1. Sokolova Yu.M. «SMARTGRID» in Russia. *Theoretical, experimental and applied research of young scientists of Tver State Technical University: Collection of scientific papers*. Tver: TvSTU. 2017, pp. 362–366. (In Russian).
2. Krylov K. Will the modern power system survive if everyone switches to electric cars? URL: <https://news.itmo.ru/ru/science/cyberphysics/news/10193/> (date of access: 18.03.2023). (In Russian).

3. Detinich G. Night electricity tariffs should be canceled due to the spread of electric vehicles, scientists have found. URL: <https://3dnews.ru/1074998/nochnie-tarifi-zlo-elektromobili-nado-zaryagat-dnyom-i-na-rabote-schitayut-amerikanskie-uchyonie> (date of access: 19.03.2023). (In Russian).
4. Smart grid. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/финансы> (date of access: 25.03.2023).
5. Barter P. «Cars are parked 95% of the time». Let's check!. URL: [turbopages.org/proxy\\_u/en-ru.ru.eb5112cf-64f59199-ac21c22b-74722d776562/https/www.reinventingparking.org/2013/02cars-are-parked-95-of-time-lets-check.html](http://turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.eb5112cf-64f59199-ac21c22b-74722d776562/https/www.reinventingparking.org/2013/02cars-are-parked-95-of-time-lets-check.html) (date of access: 25.03.2023).
6. Arora S., Abkenar A.T., Jayasinghe S.G., Tammi K. Chapter 5. EV Battery Pack Engineering–Electrical Design and Mechanical Design. *Heavy-Duty Electric Vehicles*. 2021, pp. 105–134.
7. Elektromobil': ustrojstvo, princip raboty, infrastruktura [Electric vehicle: device, principle of operation, infrastructure] / E. Juton, K. Rein, V. Sovant-Moino, F. Orsini, K. Saber, S. Bacha, O. Betu, E. Labure; translated from French by V.I. Petrovichev. Moscow: DMK Press. 2022. 440 p.
8. M/M/1 queue. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/M/M/1\\_queue](https://en.wikipedia.org/wiki/M/M/1_queue) (date of access: 04.04.2023).
9. Turitsyn K., Sinitsyn N., Backhaus S., Chertkov M. Robust broadcast-communication control of electric vehicle charging. *2010 first IEEE international conference on smart grid communications (SmartGridComm)*. 2010, pp. 203–207.
10. Stewart W.J. Probability, Markov chains, queues, and simulation: the mathematical basis for performance modeling. Princeton University Press, New Jersey. 2010.
11. Local energy storage sizing in plug-in hybrid electric vehicle charging stations under blocking probability constraints / I.S. Bayram, G. Michailidis, M. Devetsikiotis, S. Bhattacharya, A. Chakraborty, F. Granelli. *Architectures and models for the smart grid (IEEE SmartGridComm) (IEEE SmartGridComm 2011 track-architectures and models)*. Brussels, Belgium. 2011.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*PAVLOVA Yulia Mikhailovna* – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: [sokolhawk98@gmail.com](mailto:sokolhawk98@gmail.com)

*TORGOVANOVA Olga Nikolaevna* – Senior Lecturer of the Department of Foreign Languages, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: [maerz25@mail.ru](mailto:maerz25@mail.ru)

*PAVLOV Alexander Vyacheslavovich* – Master's Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: [pavlovaleksandr636@gmail.com](mailto:pavlovaleksandr636@gmail.com)

#### CITATION FOR AN ARTICLE

Pavlova Yu.M., Torgovanova O.N., Pavlov A.V. Electric vehicles: problems, trends and design of charging stations // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 3 (19), pp. 63–74.

УДК 629.7.052

**ТЕОРЕМА О ЦЕНТРЕ  $n$ -СИММЕТРИИ  
ПЛОСКОЙ ВЫПУКЛОЙ ПЛАСТИНЫ***Ал.А. Шум<sup>1</sup>, А.М. Ветошкин<sup>2</sup>*<sup>1</sup>*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*<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 плоской пластины. Частными случаями  $n$ -симметрии являются  $s$ -симметрия и  $c$ -симметрия (соответственно 0-симметрия и 1-симметрия). Доказана следующая теорема: в любой выпуклой области плоскости можно определить функцию плотности так, что центр  $n$ -симметрии полученной пластины будет находиться в любой наперед заданной внутренней точке этой пластины. Отмечено, что 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, выпуклая пластина, функция плотности, масса, центр масс, электрическая машина.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-3-75-82****ВВЕДЕНИЕ**

О разнообразии современных методов и технологий механической и физико-технической обработки деталей машин можно судить, например, по их описаниям в работах [1–13]. Выбор технологий и методов обработки при изготовлении и балансировке деталей электрических машин требует учета самых разных факторов. Важнейшим фактором этого рода является распределение массы внутри обрабатываемой детали. Существенное значение при выборе методов обработки детали может иметь наличие в распределении массы внутри этой детали той или иной симметрии. Таким образом, практический интерес имеет изучение вопросов симметрии распределения массы внутри деталей машин. Рассматриваемые детали могут представлять собой объемные тела, а могут быть и плоскими пластинами. Работы [14–29] посвящены изучению разных видов симметрии как плоских, так и объемных деталей. При этом в работах [14–20, 25–27] изучались вопросы симметрии плоских деталей (пластин), а в статьях [21–24, 28, 29] рассматривались вопросы симметрии объемных деталей (пространственных тел). Настоящая статья продолжает исследования симметрии пластин.

В статье [16] рассматривались понятия центра  $s$ -симметрии (центра полумасс) и центра  $c$ -симметрии (центра масс) плоской пластины. В источнике [17] было установлено, что в любой выпуклой области плоскости можно так определить функцию плотности, что центр  $s$ -симметрии (центр  $c$ -симметрии) полученной плоской пластины будет находиться в любой наперед заданной внутренней точке этой области (при этом утверждение о центре

$s$ -симметрии составляет теорему 1, а утверждение о центре  $s$ -симметрии – теорему 2). Позже в статье [27] было введено понятие центра  $n$ -симметрии плоской пластины. Частными случаями  $n$ -симметрии оказались  $s$ -симметрия и  $c$ -симметрия:  $s$ -симметрия представляет собой 0-симметрию (частный случай  $n$ -симметрии при  $n = 0$ ), а  $c$ -симметрия – 1-симметрию (частный случай  $n$ -симметрии при  $n = 1$ ). В той же статье [27] был установлен достаточный критерий совпадения центра  $n$ -симметрии выпуклой пластины с началом координат, справедливый при любом значении  $n$ . В настоящей работе при помощи этого критерия утверждения теорем 1 и 2 из статьи [17] переносятся на общий случай  $n$ -симметрии.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБОСНОВАНИЯ

*Простой областью* называется область плоскости, ограниченная замкнутой линией без самопересечений. *Граница* простой области (линия, ограничивающая область) также считается частью области (таким образом, простая область является *замкнутой*). Точки простой области, не лежащие на ее границе, представляют собой *внутренние* точки этой области. Простая область является *выпуклой*, если всякая прямая, проведенная через любую ее внутреннюю точку, пересекает границу данной области ровно в двух точках. *Областью* называется простая область или объединение нескольких простых областей. Область  $S_1$  – *подобласть* области  $S$ , если  $S_1 \subseteq S$ . Простая область  $S$  вместе с определенной в этой области непрерывной неотрицательной функцией (*функцией плотности*) называется *пластиной*  $D$ . Подобласть области  $S$  вместе с необходимым ограничением функции плотности называется *подпластиной* пластины  $D$  (следует отметить, что область подпластины, в отличие от области пластины, не обязательно должна быть простой). Пластина  $D$  является *выпуклой*, если выпукла соответствующая ей область  $S$ .

Функцию плотности пластины  $D$  удобно записывать в виде  $f(\varphi, \rho)$ , считая заданной подходящую полярную систему координат (следует иметь в виду, что при переходе от одной системы координат к другой выражение функции  $f(\varphi, \rho)$  через координаты изменяется, хотя сама функция, как функция точки, остается неизменной).

Если на плоскости имеются прямая  $L$  и пластина  $D$  с областью  $S$  и функцией плотности  $f(\varphi, \rho)$ , то *момент  $n$ -го порядка пластины  $D$  относительно прямой  $L$*  определяется следующим образом:

$$M_n(D) = \iint_S (r(\varphi, \rho))^n f(\varphi, \rho) \rho d\rho d\varphi,$$

где  $r(\varphi, \rho)$  – расстояние от точки  $(\varphi, \rho)$  до прямой  $L$ . Следует отметить, что значение момента  $M_n(D)$  не зависит от выбора системы координат, поскольку функция  $f(\varphi, \rho)$  и функция  $r(\varphi, \rho)$  при заданной прямой  $L$  являются функциями точки пластины. Отдельно могут быть рассмотрены моменты нулевого, первого и второго порядков.

Момент нулевого порядка пластины  $D$  не зависит от прямой  $L$  и выражает собой *массу* пластины  $D$ :  $M_0(D) = \iint_S (r(\varphi, \rho))^0 f(\varphi, \rho) \rho d\rho d\varphi = \iint_S f(\varphi, \rho) \rho d\rho d\varphi = m(D)$ .

Момент первого порядка пластины  $D$  относительно прямой  $L$  – это *статический момент* пластины  $D$  относительно прямой  $L$ :  $M_1(D) = \iint_S r(\varphi, \rho) f(\varphi, \rho) \rho d\rho d\varphi$ .

Момент второго порядка пластины  $D$  относительно прямой  $L$  – это *момент инерции* пластины  $D$  относительно прямой  $L$ :  $M_2(D) = \iint_S (r(\varphi, \rho))^2 f(\varphi, \rho) \rho d\rho d\varphi$ .

В соответствии с определениями из статьи [27] точка плоскости называется *центром  $n$ -симметрии* пластины  $D$ , если всякая проведенная через эту точку прямая делит пластину  $D$  на две подпластины  $D_1$  и  $D_2$  так, что  $M_n(D_1) = M_n(D_2)$ .

Следующая лемма, доказанная в статье [27], представляет собой достаточный критерий совпадения центра  $n$ -симметрии выпуклой пластины с началом координат (напомним, что функция угла  $\varphi$  называется *полярно-симметричной*, если она имеет период  $\pi$ ; значения такой функции для углов  $\varphi$ , определяющих в рамках полярной системы координат противоположные направления, одинаковы).

**Лемма.** Пусть начало координат полярной системы является внутренней точкой некоторой выпуклой области  $S$  пластины  $D$  с функцией плотности  $f(\varphi, \rho)$ ,  $r(\varphi)$  – расстояние от начала координат до границы этой области вдоль луча, определяемого

углом  $\varphi$ , и функция  $F_n(\varphi) = \int_0^{r(\varphi)} f(\varphi, \rho) \rho^{n+1} d\rho$  является полярно-симметричной. Тогда пластина  $D$  имеет центр  $n$ -симметрии в начале координат.

При помощи этой леммы может быть доказана следующая теорема, составляющая главный результат настоящей работы.

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

### Доказательство

Выберем начало координат полярной системы в той внутренней точке области  $S$ , в которой должен находиться центр  $n$ -симметрии пластины  $D$ . Пусть  $r(\varphi)$  – расстояние от начала координат до границы области  $S$  вдоль луча, определяемого углом  $\varphi$ . Определим требуемую функцию так:  $f(\varphi, \rho) = \frac{\rho}{[r(\varphi)]^{n+3}}$ . Тогда

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

Таким образом, функция  $F_n(\varphi)$  постоянна (не зависит от угла  $\varphi$ ), а поэтому является периодической с периодом  $\pi$ , т.е. полярно-симметричной. Таким образом, в силу рассмотренной леммы, центр  $n$ -симметрии пластины  $D$  будет находиться в начале координат, т.е. именно в нужной точке.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Доказанная теорема обобщает теоремы 1 и 2 из статьи [17] о центрах  $s$ -симметрии и  $n$ -симметрии на общий случай центров  $n$ -симметрии. Простое доказательство данной общей теоремы обеспечивает достаточный критерий совпадения центра  $n$ -симметрии плоской выпуклой пластины с началом координат, установленный в статье [27] (который представляет собой обобщение на случай  $n$ -симметрии критерия, установленного в статье [17] для случая  $s$ -симметрии).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: учебное пособие: в 2 т. / Б.А. Артамонов, Ю.С. Волков, В.И. Дрожжалова, Ф.В. Седыхин, В.П. Смоленцев, В.М. Ямпольский. 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. Немилев Е.Ф. Электроэрозионная обработка материалов. Л.: Машиностроение. 1983. 160 с.
6. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. М.: Машиностроение. 1977. 303 с.
7. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение. 1979. 152 с.
8. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. М.: Машиностроение. 1989. 297 с.
9. Трент Е.М. Резание металлов. М.: Машиностроение. 1980. 263 с.
10. Участки для электроэрозионной обработки рабочих деталей вырубных штампов и пресс-форм: методические рекомендации по проектированию. М.: ОНТИ ЭНИМС. 1983. 47 с.
11. Этин А.О. Кинематический анализ и выбор эффективных методов обработки лезвийным инструментом. М.: Машгиз. 1953. 173 с.
12. Янюшкин А.С., Шоркин В.С. Контактные процессы при электроалмазном шлифовании. М.: Машиностроение-1. 2004. 230 с.
13. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания. Минск: Новое знание. 2006. 512 с.
14. Шум Ал.А. О симметрии функций, определенных в круге // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2014. Вып. 25. С. 3–8.
15. Шум Ал.А. Замечание об  $s$ -симметричных функциях // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2015. Вып. 27. С. 3–6.
16. Шум Ал.А. О центрах симметрии функции двух переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2016. Вып. 30. С. 19–23.

17. Шум Ал.А. О центрах симметрии функции, определенной в выпуклой области плоскости // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2017. Вып. 31. С. 19–22.
18. Шум Ал.А. Симметрическая линия функции двух переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2017. Вып. 32. С. 103–105.
19. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Симметрическая линия правильного однородного треугольника // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2018. Вып. 34. С. 47–53.
20. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Параметрические уравнения симметрической линии правильного однородного треугольника // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2018. Вып. 34. С. 44–47.
21. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Замечание о симметрии функций, определенных в шаре // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 3 (3). С. 38–46.
22. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Об одной 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.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

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.

---

### THEOREM ON THE CENTER OF $n$ -SYMMETRY OF A FLAT CONVEX PLATE

*Al.A. Shum<sup>1</sup>, A.M. Vetoshkin<sup>2</sup>*

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

*(Tver, Russia)*

*<sup>2</sup>Mytishchi filial of MSTU named after N. Uh. Bauman*

*(Mytishchi, Moscow region, Russia)*

**Abstract.** The concept of the center of  $n$ -symmetry of a flat plate is considered. Special cases of  $n$ -symmetry are  $s$ -symmetry and  $c$ -symmetry (respectively 0-symmetry and 1-symmetry). The following theorem is proved: in any convex area of the plane, it is possible to determine the density function so that the center of the  $n$ -symmetry of the resulting plate will be located at any predetermined internal point of this plate. It is noted that 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, convex plate, density function, mass, center of mass, electric machine.

#### REFERENCES

1. *Elektrofizicheskie i elektrohimicheskie metody obrabotki materialov: uchebnoye posobiye* [Electrophysical and electrochemical methods of processing materials: manual]: in 2 vol. / B.A. Artamonov, Yu.S. Volkov, V.I. Drozhzhhalova, F.V. Sedykhin, V.P. Smolentsev, V.M. Yampolsky. Moscow: Vysshaja shkola. 1983. Vol. 1. 247 p. Vol. 2. 208 p.
2. Vereschaka A.S. *Rabotosposobnost' rezhushchego instrumenta s iznosostojkimi pokrytiami* [The performance of the cutting tool with wear-resistant coatings]. Moscow: Mashinostroenie. 1993. 336 p.
3. Voronichev N.M., Tartakovsky J.E., Genin V.B. *Avtomaticheskie linii iz agregatnyh stankov* [Automatic lines of modular machines]. Moscow: Mashinostroenie. 1979. 487 p.
4. Dalskiy A.M., Gavrilyuk V.S. *Mekhanicheskaya obrabotka materialov* [Mechanical treatment of materials: college textbook]. Moscow: Mechanical Engineering. 1981. 266 p.
5. Nemilov E.F. *Elektroerozionnaya obrabotka materialov* [Electroerosion treatment of materials]. L.: Mashinostroenie. 1983. 160 p.



6. Poduraev V.N. Avtomaticheski reguliruemye i kombinirovannye processy rezaniya [Automatically adjustable and combined cutting processes]. Moscow: Mashinostroenie. 1977. 303 p.
7. Silin S.S. Metod podobiya pri rezanii materialov [Method of similarity when cutting materials]. Moscow: Mashinostroenie. 1979. 152 p.
8. Starkov V.K. Obrabotka rezaniem. Upravlenie stabil'nost'yu i kachestvom v avtomatizirovannom proizvodstve [Cutting processing. Stability and quality management in automated production]. Moscow: Mashinostroenie. 1989. 297 p.
9. Trent E.M. Rezanie metallov [Metal cutting]. Moscow: Mashinostroenie. 1980. 263 p.
10. Uchastki dlya elektroerozionnoj obrabotki rabochih detalej vyrubnyh shtampov i press-form: metodicheskiye rekomendatsii po proyektirovaniyu [Areas for electrical discharge machining of working parts of cutting dies and molds: design guidelines]. Moscow: ONTI ENIMS. 1983. 47 p.
11. Etin A.O. Kinematicheskij analiz i vybor effektivnyh metodov obrabotki lezviynym instrumentom [Kinematic analysis and selection of effective methods of processing with a climbing tool]. Moscow: Mashgiz. 1953. 173 p.
12. Yanushkin A.S., Shorkin V.S. Kontaktnye processy pri elektroalmaznom shlifovanii [Contact processes in electro-diamond grinding]. Moscow: Mashinostroenie-1. 2004. 230 p.
13. Yastcheritsyn P.I., Feldshtein E.E., Korniewicz M.A. Teoriya rezaniya [Theory of cutting]. Minsk: Novoe znanie. 2006. 512 p.
14. Shum Al.A. On the symmetry of the functions defined in the circle. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*. 2014. Vol. 25, pp. 3–8. (In Russian).
15. Shum Al.A. The comment about  $s$ -symmetric functions. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*. 2015. Vol. 27, pp. 3–6. (In Russian).
16. Shum Al.A. About the centers of symmetry of a function of two variables. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*. 2016. Vol. 30, pp. 19–23. (In Russian).
17. Shum Al.A. About the centers of symmetry of a function defined in a convex domain of the plane. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*. 2017. Vol. 31, pp. 19–22. (In Russian).
18. Shum Al.A. Symmetric line of a function of two variables. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*. 2017. Vol. 32, pp. 103–105. (In Russian).
19. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. The symmetric line of a regular homogeneous triangle. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*. 2018. Vol. 34, pp. 47–53. (In Russian).
20. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. Parametric equations of the symmetric line of a regular homogeneous triangle. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*. 2018. Vol. 34, pp. 44–47. (In Russian).
21. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. A note on the symmetry of functions defined in a ball. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Seriya «Tehnicieskie nauki»*. 2019. No. 3 (3), pp. 38–46. (In Russian).
22. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. On one criterion of  $s$ -symmetry of a function of three variables. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Seriya «Tehnicieskie nauki»*. 2019. No. 4 (4), pp. 30–35. (In Russian).
23. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. About the centers of symmetry of a function of three variables. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotehnika I himicheskie tehnologii»*. 2020. No. 1 (5), pp. 71–78. (In Russian).

24. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. About the centers of symmetry of the function, defined in a convex area of space. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotehnika i himicheskie tehnologii»*. 2020. No. 2 (6), pp. 57–65. (In Russian).
25. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. A note on the centers of  $s$ -symmetry and  $c$ -symmetry of a flat plate. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotehnika i himicheskie tehnologii»*. 2021. No. 1 (9), pp. 63–70. (In Russian).
26. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. Moments of a flat plate relative to a straight line and some questions of symmetry. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotehnika i himicheskie tehnologii»*. 2021. No. 2 (10), pp. 78–84. (In Russian).
27. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. On the centers of symmetry of a flat convex plate. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Series «Construction. Electrical engineering and chemical technologies»*. 2021. No. 3 (11), pp. 65–72. (In Russian).
28. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. On the concept of  $n$ -symmetry of a spatial body. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Series «Construction. Electrical engineering and chemical technologies»*. 2022. No. 3 (15), pp. 66–72. (In Russian).
29. Shum Al.A., Vetoshkin A.M. On the centers of symmetry of a convex spatial body. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Series «Construction. Electrical engineering and chemical technologies»*. 2023, No. 2 (18), pp. 64–72. (In Russian).

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*SHUM Alexander Anatolievich* – 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* – Associate Professor in the Department of Applied Mathematics, Informatics and Computer Engineering, MF Moscow State Technical University named after N.E. Bauman (MF MSTU), 1, 1st Institutskaya street, Mytishchi city, Moscow region, 141005, Russia. E-mail: vetkin@mgul.ac.ru

#### CITATION FOR AN ARTICLE

Shum Al.A., Vetoshkin A.M. Theorem on the center of  $n$ -symmetry of a flat convex plate // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2023. No. 3 (19). P. 75–82.

## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ



УДК 665.939.57

### К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛИУРЕТАНОВОЙ ОДНОКОМПОНЕНТНОЙ КЛЕЙ-ПЕНЫ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ГАЗОБЕТОННЫХ ПЕРЕМЫЧЕК

*А.В. Левиков, А.В. Гавриленко**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Левиков А.В., Гавриленко А.В., 2023

**Аннотация.** В статье представлены результаты экспериментального испытания перемычки на изгиб из газобетонных блоков, которая изготовлена с применением только пенополиуретановой клей-пены для кладки без использования арматуры, дополнительных металлических прокатных профилей и классических кладочных растворов. Исследование разрушенных образцов выявило достаточность адгезии клей-пены к газобетону под нагрузкой. Отмечено, что газобетонная клееная перемычка способна выдержать распределенную нагрузку до 100 кг/м, однако характер разрушения хрупкий, что не позволяет рекомендовать использование подобных перемычек на практике. Приведены комплексные предложения по совершенствованию конструкции соединяемых с помощью клей-пены заготовок, которые могут предотвратить хрупкий характер разрушения в процессе дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** полиуретановая клей-пена, газобетонные блоки, перемычка.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-3-83-89**

### ВВЕДЕНИЕ

Стеновая кладка из блоков ячеистого бетона (газобетонных блоков) занимает лидирующие позиции в домостроении на территории России, начиная с современных высотных жилых и общественных зданий и заканчивая средним и малоэтажным частным домостроением [5]. Такую широкую востребованность на строительном рынке кладка из газобетона получила благодаря своим теплоизолирующим (в сравнении с другими разновидностями конструкционных изделий) свойствам. Относительно невысокая теплопроводность ячеистого бетона позволяет применять блоки для наружных ограждающих конструкций без использования дополнительного фасадного утепления (или с незначительным его количеством) как энергоэффективную кладку. Использование жаростойких блоков, растворов и огнеупорных клеев дает возможность применять кладку из блоков даже в промышленных зданиях [3].

Тем не менее в кладке из блоков (как из штучных материалов) образуются «мостики холода» при применении растворных скрепляющих швов между блоками, выполненные на цементно-песчаных или клеевых растворах. Проблема значительных «мостиков холода» в скрепляющих швах решается путем использования полиуретанового

клея для скрепления блоков в кладке [6]. Помимо этого, в процессе просыхания блоков в кладке, смонтированной на традиционные растворы, блоки уменьшаются в объеме за счет потери производственной влажности, вследствие чего образуются щели в вертикальных швах (кладка дает усадку) [4]. Применение полиуретанового клея исключает образование щелей и неплотностей в вертикальных швах в процессе усадки благодаря превосходной адгезии и возможности деформации шва по блоку. Учитывая темпы развития промышленного производства полиуретановых клеев, можно предположить, что в будущем оно будет полностью экологичным и безопасным для человека [7].

Нерешенным и неисследованным остается вопрос образования «мостиков холода» в местах устройства кладки блоков на монтажную клей-пену в зоне перемычек над оконными и дверными проемами, в которых, помимо блока и клей-пены, используются инородные материалы (арматура, прокатный профиль).

Цель испытания заключается в поиске альтернативного решения устройства перемычки в стенах и перегородках из блоков газобетона со швами полиуретановой клей-пены без использования арматурных каркасов и металлического профилированного проката, а также клеевых и цементных кладочных растворов.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения испытания использовался профессиональный универсальный полиуретановый однокомпонентный клей (табл. 1) для кладки силикатных блоков, гипсовых плит, газобетона, шлакоблоков, пеноблоков, арболита и кирпича (табл. 2). Клей для кладки испытан в соответствии с действующим ГОСТ 14760-69 [1].

В состав однокомпонентного клея включен жидкий полиуретан с изоцианатами. При контакте с водой или воздушной влагой образуются мочевиные группы, которые обеспечивают прочность сцепления. Скорость отверждения полиуретанового клея зависит от количества изоцианата в его составе, который, в свою очередь, влияет на жесткость и вязкость клея. Показатели полимерных клеев устанавливаются по ГОСТ 30535-97 [2].

Однокомпонентный клей выпущен в готовом для применения виде. Полимеризация зависит от наличия влаги. Влажность воздуха при проведении работ с клеем составляла 54 %, что позволяет последнему отлично вспениваться и полимеризоваться. Температура в помещении была +19 °С. Перед применением баллон с клей-пенной тщательно встряхнули, сняли с него защитный колпачок и навинтили монтажный пистолет.

Таблица 1

Технические характеристики используемого в исследовании пенополиуретанового однокомпонентного клея

Характеристика	Значение характеристики
Основа	Полиуретановый преполимер
Механизм отверждения	Полимеризация от влаги в воздухе
Коэффициент теплопроводности, $\lambda$	0,003 5 Вт/(м·К)
Время отверждения (при 22 °С / относительной влажности 65 %)	35 мин
Время полного отверждения	12 ч
Термостойкость	от –60 до +100 °С
Время для корректировки	7–10 мин
Температура воздуха и основания	От –5 до +35 °С

Таблица 2

Параметры адгезии используемого в исследовании  
пенополиуретанового однокомпонентного клея

Материал	Прочность клеевого соединения при отрыве $\sigma_{отр}$ , МПа
Арболитовые блоки	0,163
Газосиликатные блоки	0,216
Пеноблоки	0,138
Газобетонные блоки	0,179
Пазогребневые плиты	0,188

Для проведения исследования были закуплены газобетонные блоки плотностью D400 с классом прочности B2,0 и изготовлены 6 заготовок сечением  $l \times b \times h = 600 \times 100 \times 250$  мм для склеивания трех образцов перемычек. Торцевые склеиваемые поверхности заготовок были очищены от пыли и увлажнены мокрой тканью. При толщине заготовки 100 мм клей-пену, согласно рекомендациям производителя, наносят одной полосой (рис. 1).



Рис. 1. Процесс нанесения клей-пены на газобетонные заготовки

Количество наносимого клея оценивалось исходя из условия, чтобы после соединения составляющих заготовок перемычки клей-пена покрывала склеиваемые поверхности не менее чем на 70 %. После соединения заготовок выполнялась корректировка положения блоков в течение 1–2 мин, что допустимо (верхняя граница – до 7–10 мин). В итоге было изготовлено три перемычки сечением  $l \times b \times h = 1\,200 \times 100 \times 250$  мм (рис. 2).

Контроль прочности материала блоков и их плотности производился путем взвешивания и испытания на сжатие четырех образцов с номинальными размерами  $100 \times 100 \times 100$  мм. По результатам испытаний средняя фактическая плотность материала блока оказалась равной  $444,7 \text{ кг/м}^3$ , а прочность при сжатии составила  $0,21 \text{ кН/см}^2$ , что соответствует параметрам закупленного блока D400 B2.0.



Рис. 2. Процесс корректировки положения заготовок и твердения перемычек

Спустя 24 ч после склеивания, что достаточно для полного отверждения клея, три перемычки были испытаны на изгиб. Испытание образцов проводилось по расчетной схеме свободно опертой шарнирной балки. Нагрузка прикладывалась к перемычкам ступенчато при помощи гидравлического домкрата в двух точках через траверсу (рис. 3). К образцам нагрузка прикладывалась ступенями. Величина приложенного усилия контролировалась динамометром системы Токаря на 0,3 тс, прогиб измерялся в середине пролета при помощи прогибомера ПМ-3 с ценой деления 0,1 мм.



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

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

По результатам испытания перемычек на изгиб, изготовленных только с применением пенополиуретановой клей-пены, средняя суммарная предельная внешняя нагрузка составила 106,1 кг; средний предельный момент сечения (без учета собственного веса) – 1 910,9 кг·см; средний прогиб ступени нагружения, предшествующий разрушению, был равен 0,7 мм.

Исследуемые образцы разрушились в середине пролета (разрушение – хрупкое). При детальном изучении среза перемычек было выявлено, что разрушение произошло из-за отслоения тонкого слоя газобетонного блока толщиной менее 1 мм (рис. 4), а клеевой шов сохранился и соответствует адгезионным свойствам клей-пены, указанным в табл. 2. Разрушение в зоне клеевого шва могло произойти из-за не 100%-го нанесения клей-пены в зоны стыковки заготовок перемычек.

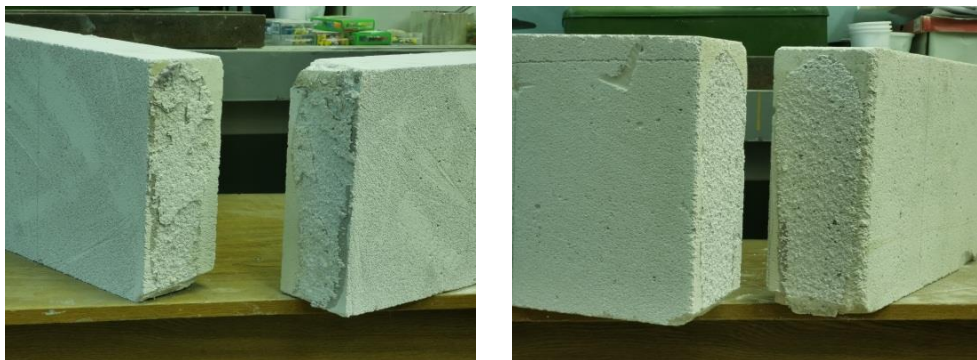


Рис. 4. Типичный характер разрушения исследуемых перемычек

Результаты исследования показали, что изготовление перемычек только с применением однокомпонентной полиуретановой клей-пены в настоящий момент не может быть рекомендовано в связи со сколом слоя блока в зоне клеевого шва и хрупким характером разрушения перемычки в целом.

С целью дальнейшего изучения перемычек на клей-пене требуется проведение дополнительных исследований. В частности, для предотвращения скола части блока образцов в зоне клеевого шва предлагается, во-первых, увеличить площадь контакта клей-пены между образцами с рекомендованных не менее 70 % до 100 % путем нанесения избыточного количества пены для создания максимально однородного сечения блока, а во-вторых, увеличить глубину проникновения клей-пены в зоне контакта с блоком путем перфорации, устройства штроб или канавок в заготовках, которые будут заполнены пеной в процессе изготовления перемычки. Для устранения хрупкого характера разрушения предлагается рассмотреть устройство полос из пенополиуретановой клей-пены в растянутой зоне, имитирующих действие арматурных стержней в классических железобетонных перемычках, и провести новое исследование эффективности данного решения.

Актуальность использования полиуретановой клей-пены при кладке газобетонных блоков и изготовление перемычек без использования арматурных каркасов и металлического профилированного проката будет только расти ввиду увеличения темпов гражданского строительства. На данный момент требуются дополнительные теоретические и экспериментальные изыскания в вопросе применения пенополиуретановой однокомпонентной клей-пены при изготовлении газобетонных перемычек.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 14760-69. Клеи. Метод определения прочности при отрыве: утвержден и введен в действие Госстандартом СССР от 01.01.1970. М.: Стандартинформ. 1970. 7 с.
2. ГОСТ 30535-97. Клеи полимерные. Номенклатура показателей: утвержден и введен в действие Госстандартом России от 01.01.2002. М.: Стандартинформ. 2002. 12 с.



3. Абызов В.А., Клинов О.А., Ряховский Е.Н. Основные направления повышения качества и расширения номенклатуры жаростойких растворов и огнеупорных клеев // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура*. 2007. № 14 (86). С. 37–39.
4. Физико-химические факторы, влияющие на эксплуатационное состояние и долговечность наружных стен зданий на основе автоклавных газобетонных блоков / В.В. Бабков, А.И. Габитов, Д.В. Кузнецов, А.М. Гайсин, О.А. Резвов // *Башкирский химический журнал*. 2010. № 5. С. 155–158.
5. Горшков А.С., Ватин Н.И. Свойства стеновых конструкций из ячеистобетонных изделий автоклавного твердения на полиуретановом клею // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. № 5 (40). С. 5–19.
6. Повышение теплотехнической однородности стен из ячеисто-бетонных изделий за счет использования в кладке полиуретанового клея / А.С. Горшков, Г.И. Гринфельд, В.Е. Мишин, Е.С. Никифоров, Н.И. Ватин // *Строительные материалы*. 2014. № 5. С. 57–64.
7. Промышленное производство и применение водных полиуретановых дисперсий / К.В. Голованова, Д.Е. Михайлов, А.Ю. Маляшова, Л.А. Зенитова // *Вестник Казанского технологического университета*. 2017. № 14. С. 38–43.
8. Деркач В.Н. Прочность и деформативность каменной кладки из ячеисто-бетонных блоков автоклавного твердения на полиуретановых швах. Часть 2. Прочность на растяжение при изгибе // *Строительные материалы*. 2017. № 7. С. 30–33.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*ЛЕВИКОВ Александр Валерьевич* – кандидат философских наук, доцент кафедры «Конструкции и сооружения», 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 «Конструкции и сооружения», 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. К вопросу использования полиуретановой однокомпонентной клей-пены при изготовлении газобетонных перемычек // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 3 (19). С. 83–89.

---

### ON THE USE OF POLYURETHANE SINGLE-COMPONENT ADHESIVE FOAM IN THE MANUFACTURE OF AERATED CONCRETE JUMPERS

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

**Abstract.** The article presents the results of experimental bending test of a lintel made of aerated concrete blocks, which is made using only polyurethane foam adhesive foam for masonry without the use of reinforcement, additional metal rolled profiles and classical masonry mortars.



Examination of the destroyed specimens revealed sufficient adhesion of the adhesive foam to the aerated concrete under load. It is noted that the aerated concrete glued lintel is able to withstand a distributed load up to 100 kg/m, but the nature of the failure is brittle, which does not allow recommending the use of such lintels in practice. Comprehensive proposals for improving the design of glue-foam bonded blanks, which can prevent brittle fracture character in the process of additional theoretical and experimental studies, are given.

**Keywords:** polyurethane adhesive foam, aerated concrete blocks, lintel.

#### REFERENCES

1. State Standard 14760-69. Adhesives. Method for determining the strength at separation. Moscow: Standartinform Publ. 1970. 7 p. (In Russian).
2. State Standard 30535-97. Polymer adhesives. Nomenclature of indicators. Moscow: Standartinform Publ. 2002. 12 p. (In Russian).
3. Abyzov V.A., Klinov O.A., Ryakhovsky E.N. The main directions of improving the quality and expanding the nomenclature of heat-resistant solutions and refractory adhesives. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*. 2007. No. 14 (86), pp. 37–39. (In Russian)
4. Physico-chemical factors affecting the operational condition and durability of external walls of buildings based on autoclaved aerated concrete blocks / V.V. Babkov, A.I. Gabitov, D.V. Kuznetsov, A.M. Gaisin, O.A. Rezvov. *Bashkirskij himicheskij zhurnal*. 2010. No. 5, pp. 155–158. (In Russian).
5. Gorshkov A.S., Vatin N.I. Properties of wall structures made of cellular concrete products of autoclave hardening on polyurethane glue. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*. 2013. No. 5 (40), pp. 5–19. (In Russian).
6. Increasing the thermal uniformity of walls made of cellular concrete products due to the use of polyurethane glue in masonry / A.S. Gorshkov, G.I. Grinfeld, V.E. Mishin, E.S. Nikiforov, N.I. Vatin. *Stroitel'nye materialy*. 2014. No. 5, pp. 57–64. (In Russian).
7. Industrial production and application of aqueous polyurethane dispersions / K.V. Golovanova, D.E. Mikhailov, A.Yu. Malyashova, L.A. Zenitova. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2017. No.14, pp. 38–43. (In Russian).
8. Derkach V.N. Strength and deformability of masonry made of cellular concrete blocks of autoclave hardening on polyurethane seams. Part 2. Tensile strength in bending. *Stroitel'nye materialy*. 2017. No. 7, pp. 30–33. (In Russian).

#### 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: GavrilenkoAV@tstu.tver.ru

#### CITATION FOR AN ARTICLE

Levikov A.V., Gavrilenko A.V. On the use of polyurethane single-component adhesive foam in the manufacture of aerated concrete jumpers // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2023. No. 3 (19), pp. 83–89.

УДК 502.504; 628.386

**УТИЛИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ  
КАК ФАКТОР ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ  
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ***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 ВНИИ ГОЧС (ФЦ) (г. Москва)*© Филиппова О.П., Калаева С.З.,  
Цховребов Э.С., Сергеев Е.С., 2023

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследований состава и свойств распространенных отходов Ярославской области – гальванических шламов и отходов «зеленого масла». На основании полученных данных представлены технологии утилизации данных отходов, разработанные на базе Ярославского государственного технического университета. Отмечено, что внедрение предлагаемых технологий послужит немаловажным фактором снижения уровня экологической опасности, предупреждения возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера в регионе.

**Ключевые слова:** гальванические шламы, «зеленое масло», коррозия, нефтепродукты, утилизация, отходы, экологическая безопасность.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-3-90-98****ВВЕДЕНИЕ**

Проблемы загрязнения окружающей среды с каждым годом становятся все актуальнее, причем их характер обретает глобальный масштаб. Таким образом, главными задачами исследователей-экологов по-прежнему остаются внедрение малоотходных экологически безопасных технологий и разработка процессов утилизации промышленных отходов в целях снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду. Данные технологии вкпе с эффективно организованной системой обращения опасных производственных отходов, основанной на достижении ресурсосберегающего технологического уклада экономики, станут базой обеспечения экологической безопасности на территориях регионов Российской Федерации [1–5].

Для каждого региона Российской Федерации характерно преобладание определенных видов отходов. В настоящей статье объектом исследования служат токсичные крупнотоннажные отходы, содержащие углеводородное сырье и характерные для Ярославской области, а кроме того, предлагаются способы их утилизации, разработанные учеными и специалистами ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет» (ЯГТУ) при взаимодействии с научными сотрудниками ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций».

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалами для проведения исследования стали опубликованные труды авторов, собственные результаты исследований в сфере проблем обработки и утилизации промышленных отходов [6–10], ресурсосбережения, экологической безопасности территорий [11–15].

В основу исследования положен системный анализ представленных в литературе концепций, методов обработки и утилизации отходов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На территории Ярославской области расположено более тысячи предприятий, являющихся источником образования производственных отходов, содержащих углеводородное сырье. Такое сырье может быть повторно использовано для выпуска различной продукции и при ведении строительных и иных видов работ.

Решению указанных актуальных вопросов может способствовать предложенная учеными и специалистами ЯГТУ технология утилизации гальваношламов. Были собраны статистические данные о составе и свойствах отходов гальваношламов по предприятиям региона (рис. 1) [6, 7].

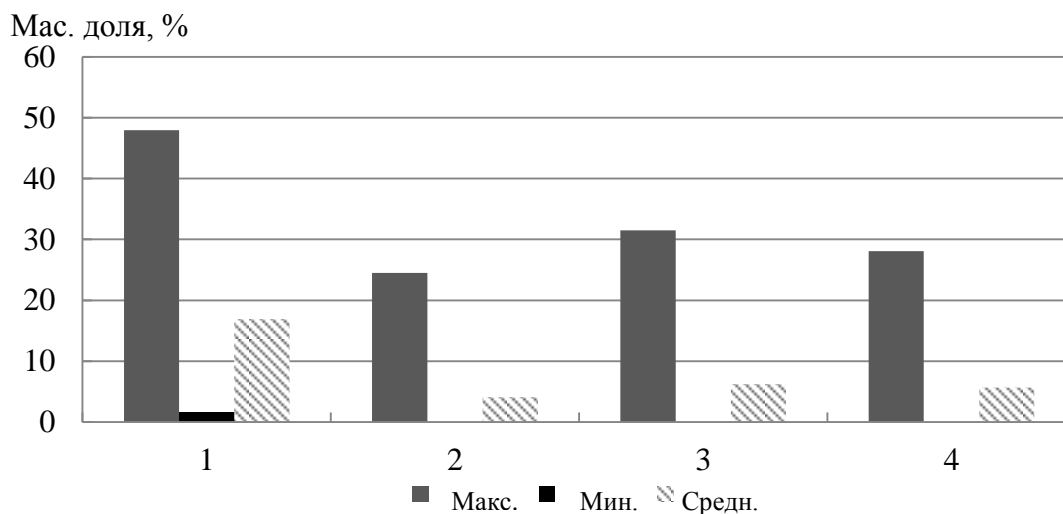


Рис. 1. Содержание в гальваношламах региона элементов:  
1 – железа; 2 – хрома; 3 – цинка; 4 – кальция

С учетом содержания в отходах значительного количества железосодержащих компонентов предложено разработать технологию получения антикоррозионного пигмента и магнитных материалов (магнетита и магнитной жидкости).

Согласно требованиям ТУ 82.3.011-99 «Антикоррозионный пигмент», содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в пигменте должно быть от 35 до 70 % (в пересчете на  $\text{Fe}^{3+}$  – от 24,50 до 49 %). Таким образом, на основе результатов инструментального анализа подобного рода отходов было принято решение о возможности их применения по данному назначению [8, 9].

Исходя из многолетних исследований, авторы предлагают технологию утилизации гальваношламов, показанную на рис. 2.

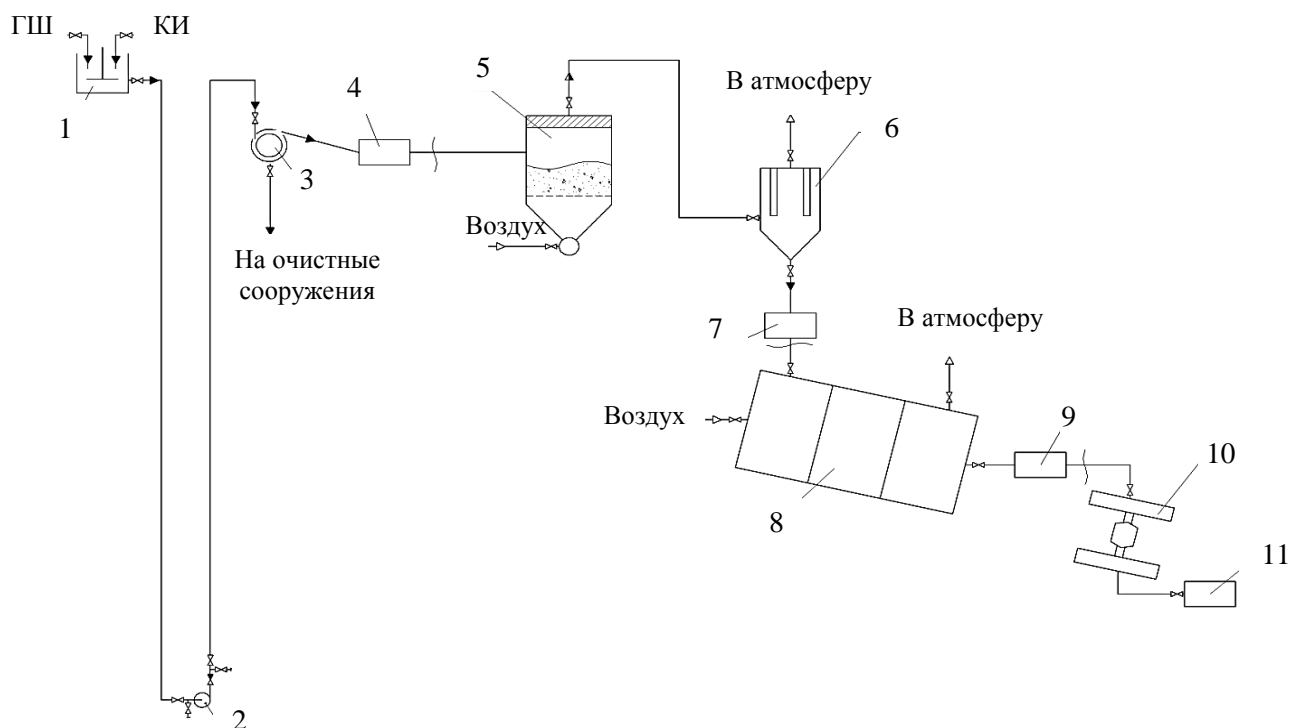


Рис. 2. Схема процесса утилизации гальванического шлама для получения антикоррозионного пигмента

Гальванический шлам после очистки сточных вод с влажностью 97 % в соотношении  $\text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{CaO} = 1 : 1$  смешивается с кальцийсодержащим компонентом-ингибитором в смесителе 1 (см. рис. 2), откуда с помощью насоса 2 подается в барабанный вакуумный фильтр 3, где за счет вакуума вода продавливается через лавсановую ткань, а на поверхности остается осадок влажностью 60 %, который собирается в емкость 4. Эту емкость перемещают в сушилку с кипящим слоем инертного носителя 5, снабженную фарфоровыми шариками с  $d = 6-8$  мм. Подаваемый сверху осадок налипает на шарики, которые поднимаются снизу горячим воздухом (300 °С), а как только суспензия на шариках просыхает, происходит соударение, в результате чего осадок измельчается и в виде пыли, влажность которой составляет 15 %, удаляется из сушилки прямо в рукавный фильтр 6. В рукавном фильтре 6 пыль отделяется от воздуха и с влажностью 10 % собирается в емкость 7. После этого емкость 7 с пылью помещают в трехзонную прокалочную печь 8. В первой зоне печи идет нагрев пыли до 900 °С, во второй зоне пыль выдерживается 60 мин в условиях температуры 900 °С, в третьей зоне пыль охлаждается до 40 °С и собирается в емкости 9. Из емкости 9 сухую пыль переносят на вибрационное сито 10, где она просевается через сетку (с размером отверстий 50 мкм), после чего готовый продукт (антикоррозионный пигмент) собирают в емкость 11 и используют для получения антикоррозионных покрытий.

Тем не менее применение магнитной жидкости (МЖ) ограничено их весьма высокой стоимостью (от 50 тыс. руб/л), так как магнитно-мягкая фаза МЖ (магнетит) изготавливается из химически чистых материалов. Поэтому синтез магнетита из существующих в больших количествах промышленных отходов, содержащих  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$ ,

не только снизит техносферное влияние на природу, но и значительно удешевит (не менее чем на порядок) стоимость магнитной жидкости, расширяя, таким образом, сферу ее применения [10, 11].

Для получения составов с  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$  использованы травильные растворы, гальваношламы. Схема получения магнетита приведена на рис. 3.

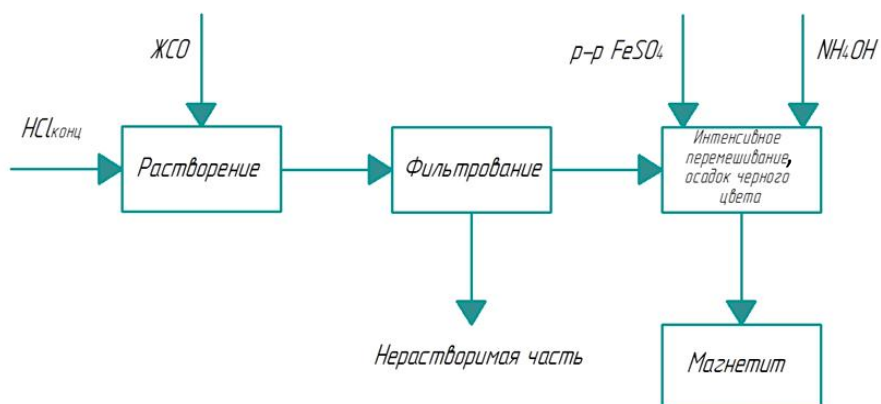


Рис. 3. Схема процесса утилизации гальваношлама для получения магнетита

Раствор магнетита подогревается до  $95^{\circ}$ , затем вводятся стабилизатор и жидкость-носитель для получения магнитной жидкости. Магнитные жидкости могут применяться в различных экологических технологиях: для удаления нефтепродуктов с поверхности воды, снижения негативного влияния виброактивности оборудования, разделения отходов по плотности, а также в дефектоскопии (передовой метод минимизации образования отходов при проведении испытаний).

Сотрудниками, аспирантами и студентами ЯГТУ уже несколько лет ведется мониторинг состояния дренажной системы путем замера уровня «зеленого масла» два раза в неделю. Последние данные можно представить в виде графика (рис. 4).

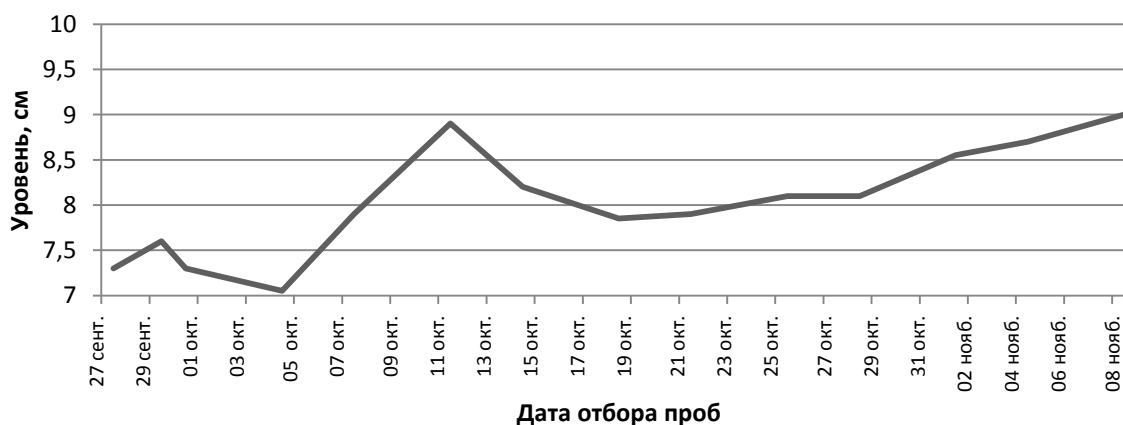


Рис. 4. Мониторинг дренажной системы

Как показали исследования, в течение нескольких месяцев уровень «зеленого масла» в системе практически не уменьшается. Основные показатели отхода «зеленого масла» в сравнении с «чистым» продуктом приведены в таблице.

Основные показатели «зеленого масла» и отхода «зеленого масла»

Показатели	«Зеленое масло»	Отход «зеленого масла»
Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	0,983 ± 0,04	0,960 ± 0,02
Пределы кипения, °С	155–365	100–345
Коксуемость, %	0,44 ± 0,39	1,69 ± 0,5
Фракционный состав, °С: начальная концентрация медианная концентрация конечная концентрация	155 ± 45 260 ± 20 370 ± 10	100 ± 50 261 ± 4 345 ± 4,5
Содержание, %: вода зола механические примеси неорганическая часть	Следы 0,004 ± 0,001 0,003 ± 0,005 1,0 ± 0,2	5,5 ± 5,0 0,0037 ± 0,001 0,0023 ± 0,005 1,8 ± 0,2

По результатам проведенных исследований предлагается усовершенствованная технологическая схема переработки отхода «зеленого масла» (рис. 5).

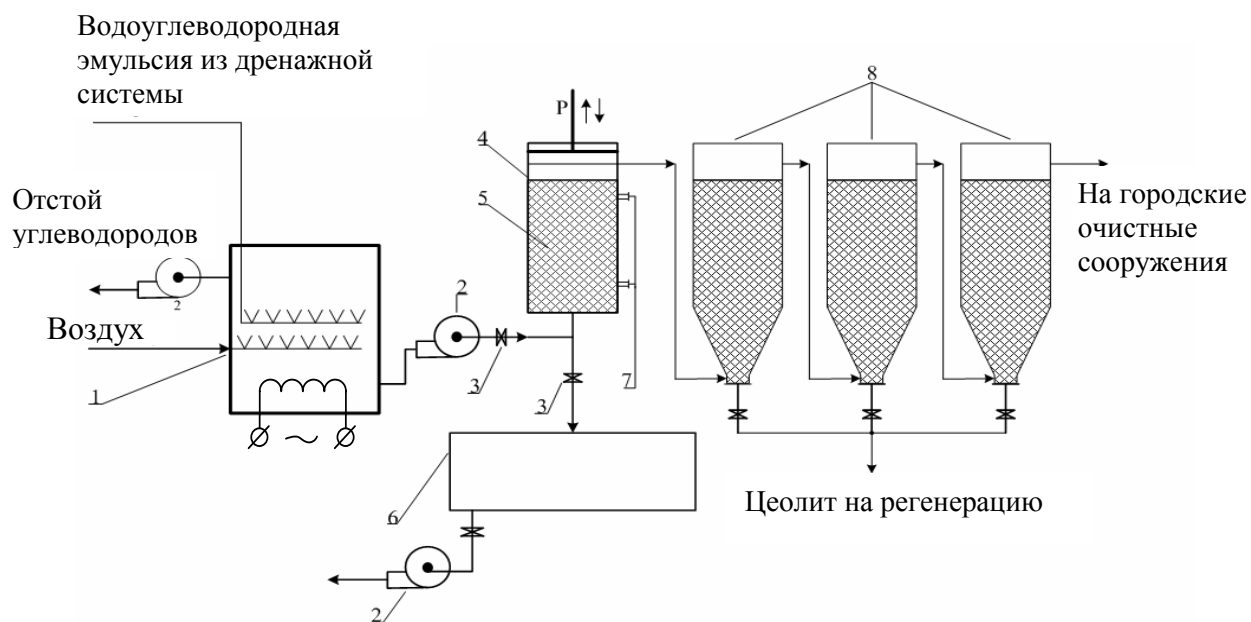


Рис. 5. Схема процесса очистки водоуглеводородной эмульсии:

- 1 – сборник-отстойник водоуглеводородной эмульсии; 2 – насосы;
- 3 – запорные устройства; 4 – фильтр с полиуретановой крошкой;
- 5 – полиуретановая загрузка; 6 – емкость для сбора углеводородов;
- 7 – люки для загрузки и выгрузки полиуретановой крошки; 8 – фильтры-адсорберы

Данная технология переработки предусматривает две стадии очистки водоуглеводородной эмульсии, позволяя при этом добиться стандартизованного качества получаемого углеводородного вторичного сырья. Высокий уровень заинтересованности хозяйствующих субъектов в получаемом вторичном сырье характеризует высокий уровень экономической эффективности технологии.

### ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Несмотря на увеличивающуюся антропогенную нагрузку, наблюдается тенденция к экологизации и повышению качества окружающей среды. Проводятся исследования по разработке и внедрению малоотходных технологий и утилизации накопившихся отходов. Причем темпы их увеличиваются в связи с ростом числа заинтересованных в решении экологических проблем слоев российского общества, а также повышается их технический уровень.

Проведенные на базе ЯГТУ исследования позволяют сделать вывод, что предложенные в данной статье технологии переработки отходов помогут решить вопрос утилизации токсичных крупнотоннажных отходов Ярославской области. Таким образом, можно будет начать их внедрение в производственных масштабах. Это станет важным фактором предупреждения возникновения техногенных чрезвычайных ситуаций и их опасных экологических последствий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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. Vol. 945. P. 988–994.
3. Цховребов Э.С. Формирование региональных стратегий управления обращением с вторичными ресурсами // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 4 (127). С. 453.
4. 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.
5. Организационно-экономические и правовые аспекты создания и развития производственно-технических комплексов по переработке золошлаковых отходов в строительную и иную продукцию / И.С. Кожуховский, Е.Г. Величко, Ю.К. Целыковский, Э.С. Цховребов // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 6 (129). С. 756–773.
6. Утилизация гальваношламов сложного состава / Т.А. Трифонова, Н.В. Селиванова, О.Г. Селиванов, Л.А. Ширкин, В.А. Михайлов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14. № 5 (3). С. 850–852.
7. Сергеев Е.С., Филиппова О.П. Проблема хранения гальванических шламов и пути ее решения // *Производственные системы будущего: опыт внедрения Lean и экологических решений: Материалы международной научно-практической конференции*. Кемерово: КузГТУ. 2022. С. 526.
8. Соколов Э.М., Макаров В.М., Володин Н.И. Комплексная утилизация гальваношламов машиностроительных предприятий. Тула: ТулГУ. 2006. 264 с.
9. Технология переработки отходов / Э.М. Соколов, Ю.А. Москвичев, Е.А. Фролова, О.П. Филиппова, Н.И. Володин, В.М. Макаров. Ярославль: ЯГТУ. 2006. 387 с.
10. О технологии получения магнетита для магнитных жидкостей с использованием гальваношлама / В.М. Макаров, С.З. Калаева, А.М. Шипилин, И.Н. Захарова, А.А. Чеснокова, А.В. Андриянова // *Материалы 17-й Международной Плесской научной конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям*. Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина. 2016. С. 165–170.

11. Obtaining synthetic magnetite and ferromagnetic fluid from industrial waste topurify water from petroleum products / S.Z. Kalaeva, V.M. Makarov, N.L. Markelova, R.E. Kalaev // *The first Eurasian conference «Innovations in minimization of natural and technological risks», RISK-2019, 22–24 may 2019, Baku, Azerbaijan. 2019. P. 30.*
12. Капустина Е.С., Макаров В.М, Капустин С.М. Определение группового химического состава отходов зеленого масла, прошедших почвенную фильтрацию, и их промышленная утилизация // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология.* 2011. Т. 54. № 12. С. 114–116.
13. Гекова О.А., Михайлова И.А., Филиппова О.П. Снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду путем очистки водно-масляной эмульсии от отходов «зеленого» масла // *Научно-технические и инженерные разработки – основа решения современных экологических проблем: Сборник материалов Юбилейной семидесятой всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием.* Ярославль: ЯГТУ. 2017. С. 557–560.
14. Комина Е.Н., Макаров В.М. Исследование проблемы загрязнения отходом зеленого масла окружающей среды // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета: Материалы 13-ой межрегиональной научно-практической конференции «Высокие технологии в экологии».* Воронеж: Воронежский ГАСУ. 2010. С. 32–37.
15. Петровых А.В., Березина Е.Н., Тимрот С.Д. Определение класса опасности «зеленого масла» экспериментальным методом // *Семьдесят шестая Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием.* 19–20 апреля 2022 г. Ярославль: ЯГТУ. 2023. С. 363–367.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

*ЦХОВРЕБОВ Эдуард Станиславович* – кандидат экономических наук, доцент, старший научный сотрудник ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 121352, Россия, г. Москва, ул. Давыдовская, д. 7. E-mail: rebrovstanislav@rambler.ru

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

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Филиппова О.П., Калаева С.З., Цховребов Э.С., Сергеев Е.С. Утилизация промышленных отходов как фактор предупреждения возникновения экологической опасности // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии».* 2023. № 3 (19). С. 90–98.



**UTILIZATION OF INDUSTRIAL WASTE  
AS A FACTOR IN PREVENTING THE OCCURRENCE  
OF ENVIRONMENTAL HAZARDS****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>*VNII GOCh (FC) (Moscow)*

**Abstract.** This article presents the results of studies of the composition and properties of common waste of the Yaroslavl region – galvanic sludge and waste «green oil». Based on the data obtained, the technologies for the disposal of these wastes developed on the basis of the Yaroslavl State Technical University are presented. It was noted that the introduction of the proposed technologies will be an important factor in reducing the level of environmental hazards and preventing man-made emergencies in the region.

**Keywords:** galvanic sludge, «green oil», corrosion, petroleum products, recycling, waste, environmental safety.

**REFERENCES**

1. Tshovrebov E.S. Ecological and economic aspects of planning the placement and design of industrial facilities for processing, utilization, and neutralization of waste. *Vestnik MGSU*. 2018. Vol. 13. No. 11 (122), pp. 1326–1340. (In Russian).
2. 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. Vol. 945, pp. 988–994.
3. Tshovrebov E.S. Formation of regional strategies for managing the management of secondary resources. *Vestnik MGSU*. 2019. Vol. 14. No. 4 (127), pp. 453. (In Russian).
4. Velichko E., Tskhovrebov E., Shevchenko A. Environmental safety providing during heat insulation works and using thermal insulation materials. *MATEC Web of Conferences*. 2017, pp. 03009.
5. Organizational, economic and legal aspects of the creation and development of industrial and technical complexes for the processing of ash and slag waste into construction and other products / I.S. Kozhukhovskiy, E.G. Velichko, Yu.K. Tselykovskiy, E.S. Tshovrebov. *Vestnik MGSU*. 2019. Vol. 14. No. 6 (129), pp. 756–773. (In Russian).
6. Utilization of electroplating sludge of complex composition / T.A. Trifonova, N.V. Selivanova, O.G. Selivanov, L.A. Shirkin, V.A. Mikhailov. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. 2012. Vol. 14. No. 5 (3), pp. 850–852. (In Russian).
7. Sergeev E.S., Filippova O.P. The problem of storage of galvanic sludge and ways to solve it. *Production systems of the future: experience in implementing Lean and environmental solutions: Materials of the international scientific and practical conference*. Kemerovo: KuzSTU. 2022, pp. 526. (In Russian).
8. Sokolov E.M., Makarov V.M., Volodin N.I. Complex utilization of electroplating sludge of machine-building enterprises. Tula: TSU. 2006. 264 p.
9. Waste processing technology / E.M. Sokolov, Yu.A. Moskvichev, E.A. Frolova, O.P. Filippova, N.I. Volodin, V.M. Makarov. Yaroslavl: YSTU. 2006. 387 p.
10. On the technology of obtaining magnetite for magnetic liquids using electroplating / V.M. Makarov, S.Z. Kalaeva, A.M. Shipilin, I.N. Zakharova, A.A. Chesnokova,

A.V. Andrianova. *Materials of the 17th International Pless Scientific Conference on nanodisperse magnetic liquids (September 6-9, 2016, Pless)*. Ivanovo: Publ. house of the IGEU named after V.I. Lenin. 2016, pp. 165–170. (In Russian).

11. Acquiring synthetic magnetite and ferromagnetic fluid from industrial waste topurify water from petroleum products / S.Z. Kalaeva, V.M. Makarov, N.L. Markelova, R.E. Kalaev. *The first Eurasian conference «Innovations in minimization of natural and technological risks»*. Baku, Azerbaijan. 2019, pp. 30.

12. Kapustina E.S., Makarov V.M., Kapustin S.M. Determination of the group chemical composition of green oil waste that has undergone soil filtration and their industrial disposal. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya: Himiya i himicheskaya tekhnologiya*. 2011. Vol. 54, No. 12, pp. 114–116. (In Russian).

13. Gekova O.A. Mikhailova I.A. Filippova O.P. Reduction of anthropogenic load on the environment by cleaning water-oil emulsion from waste «green» oil. *Scientific, technical and engineering developments – the basis for solving modern environmental problems: Collection of materials of the seventieth Anniversary all-Russian scientific and technical conference of students, undergraduates and postgraduates with international participation*. Yaroslavl, April 19, 2017. Part 1. Yaroslavl: YSTU. 2017, pp. 557–560. (In Russian).

14. Komina E.N., Makarov V.M. Investigation of the problem of pollution by waste of green oil of the environment. *Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta: Materials of the interregional scientific and practical conference «High technologies in ecology»*. Voronezh: VSU. 2010, pp. 32–37. (In Russian).

15. Petrov A.V., Berezina E.N., Timrot S.D. Determination of the hazard class of «green oil» by an experimental method. *Seventy-sixth All-Russian Scientific and Technical Conference of students, undergraduates and postgraduates with international participation*. 19–20 April 2022. Yaroslavl: YSTU. 2023, pp. 363–367. (In Russian).

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

*TSKHOVREBOV Edward Stanislavovich* – Candidate of Economics Sciences, Associate Professor, Senior Researcher at the VNII GOCh (FC), 7, Davydkovskaya street, Moscow, 121352, Russia. E-mail: rebrovstanislav@rambler.ru

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

#### CITATION FOR AN ARTICLE

Filippova O.P., Kalaeva S.Z., Tskhovrebov E.S., Sergeev E.S. Utilization of industrial waste as a factor in preventing the occurrence of environmental hazards // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2023. No. 3 (19), pp. 90–98.

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

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

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

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

*Главный редактор*

Гультияев В.И. – д.т.н., доцент ТвГТУ

*Ответственный секретарь*

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

*Члены редакционной коллегии:*

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

Белов В.В. – д.т.н., профессор ТвГТУ

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

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

Бронштейн Л.М. – к.х.н., с.н.с., химический факультет Индианского универси-  
тета, Блумингтон, США

Ковалев К.Л. – д.т.н., профессор МАИ

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

Корнеев К.Б. – к.т.н., доцент ТвГТУ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Трещев А.А. – д.т.н., профессор ТулГУ

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

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

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

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

**ВЕСТНИК ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

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

Научный рецензируемый журнал  
№ 3 (19), 2023

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

---

Дата выхода в свет 15.12.2023

---

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