

ISSN ONLINE 2782-1919

**УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ  
В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**  
SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION



**Том 5  
выпуск**

**2  
2024**

**VOL. 5  
ISSUE 2**

ИЗДАНИЕ ЯРОСЛАВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

# **УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 2020 года, выходит 4 раза в год

Включен в апреле 2023 года в Перечень ВАК РФ

**Том 5  
Выпуск 2**

**Ярославль 2024**

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ»

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Главный редактор:	<i>С.В. ФЕДОСОВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва)</i>
Заместитель главного редактора:	<i>П.Б. РАЗГОВОРОВ (д.т.н., проф., Ярославль)</i>
Ответственный секретарь:	<i>С.З. КАЛАЕВА (д.т.н., доцент. Ярославль)</i>

## МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*А.А. АБДЫКАЛЫКОВ (д.т.н., проф., Кыргызстан, Бишкек), П.А. АКИМОВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), М.О. БАКАНОВ (советник РААСН, д.т.н., доц., Иваново), В.В. БЕЛОВ (советник РААСН, д.т.н., проф., Тверь), А.М. БЕЛОСТОЦКИЙ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), Н.И. ВАТИН (советник РААСН, д.т.н., проф., Санкт-Петербург), В.М. ГОТОВЦЕВ (д.т.н., проф., Ярославль), А.В. ЗАХАРОВ (советник РААСН, к. архитектуры, проф., Иваново), А.Б. КАПРАНОВА (д.ф.-м.н., проф., Ярославль), В.И. КОЛЧУНОВ (академик РААСН, д.т.н., проф., Москва), В.Г. КОТЛОВ (советник РААСН, д.т.н., проф., Йошкар-Ола), Н.Н. КУДРЯШОВ (к. архитектуры, проф., Ярославль), А.Е. ЛЕБЕДЕВ (д.т.н., доц., Ярославль), С.Н. ЛЕОНОВИЧ (иностраннный акад. РААСН, д.т.н., проф., Республика Беларусь, Минск), В.Л. МОИДРУС (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Москва), А.И. МОХОВ (акад. РАЕН, д.т.н., проф., Москва), Т.А. НИЗИНА (советник РААСН, д.т.н., проф., Саранск), П.И. ПОСПЕЛОВ (д.т.н., проф., Москва), Ю.В. ПУХАРЕНКО (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Санкт-Петербург), С.П. РУДОБАШТА (д.т.н., проф., Москва), В.Е. РУМЯНЦЕВА (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Иваново), В.П. СЕЛЯЕВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Саранск), М.Ю. ТАРШИС (д.т.н., доц., Ярославль), В.И. ТРАВУШ (вице-президент РААСН, акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), А.А. ТРЕЩЕВ (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Тула), В.Н. ФЕДОСЕЕВ (советник РААСН, д.т.н., проф., Иваново), RADIVOJE MITROVIĆ (PhD по техн. н., проф., Республика Сербия, Белград)*

Учредитель	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный технический университет»
Адрес редакции:	150023, Россия, г. Ярославль, Московский проспект, 88
Телефон	+7 (4852) 44-68-13
E-mail	razgovorovpb@ystu.ru
Электронный адрес	<a href="http://comincon.ru">http://comincon.ru</a>

Журнал издается при содействии Российской Академии архитектуры и строительных наук

Редактор:	В.Б. Доброхотов
Англ. перевод:	Л.А. Тюкина
Компьютерная верстка, корректор:	А.С. Фролов

Зарегистрирован	27 ноября 2020 (Свидетельство ЭЛ № ФС 77 - 79733)
Периодичность:	4 раза в год
Подписка и распространение	Свободный доступ

PUBLISHED BY YAROSLAVL STATE TECHNICAL UNIVERSITY

# **SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION**

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Established in November 2020, published quarterly

Included in April 2023 in the List of the Higher Attestation Commission  
of the Russian Federation

**Volume 5**

**Issue 2**

**Yaroslavl 2024**

# SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

## «SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION»

### EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief:	S.V. FEDOSOV (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow)
Deputy Editor-in-Chief:	P.B. RAZGOVOROV (doc.eng.sc., prof., Yaroslavl)
Executive secretary:	S.Z. KALAEVA (doc.eng.sc., doc., Yaroslavl)

### INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

A.A. ABDYKALYKOV (doc.eng.sc., prof., Kyrgyzstan, Bishkek), P.A. AKIMOV (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), M.O. BAKANOV (adv. RAACS, doc.eng.sc., doc., Ivanovo) V.V. BELOV (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Tver), A.M. BELOSTOTSKIY (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), N.I. VATIN (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Saint-Petersburg), V.M. GOTOVTSEV (doc.eng.sc., prof., Yaroslavl), A.V. ZAKHAROV (adv. RAACS, cand. arch., prof., Ivanovo), A.B. KAPRANOVA (doc. phys. and math. sc., prof., Yaroslavl), V.I. KOLCHUNOV (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), V.G. KOTLOV (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Yoshkar-Ola), N.N. KUDRYASHOV (cand. arch., prof., Yaroslavl), A.E. LEBEDEV (doc.eng.sc., doc., Yaroslavl), S.N. LEONOVICH (for. acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Belarus, Minsk), V.L. MONDRUS (corr. memb. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), A.I. MOKHOV (acad. RANS, doc.eng.sc., prof., Moscow), T.A. NIZINA (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Saransk), P.I. POSPELOV (doc.eng.sc., prof., Moscow), Yu.V. PUKHARENKO (corr. memb. RAACS, doc.eng.sc., prof., Saint-Petersburg), S.P. RUDOBASHTA (doc.eng.sc., prof., Moscow), V.E. RUMYANTSEVA (corr. memb. RAACS, doc.eng.sc., prof., Ivanovo), V.P. SELYAEV (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Saransk), M.Yu. TARSHIS (doc.eng.sc., doc., Yaroslavl), V.I. TRAVUSH (Vice Pres. RAACS, acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), A.A. TRESHCHEV (corr. memb. RAACS, doc.eng.sc., prof., Tula), V.N. FEDOSEEV (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Ivanovo), RADIVOJE MITROVIĆ (PhD eng.sc., prof., Serbia, Belgrade)

Founder:	Yaroslavl State Technical University
Editorial office address	88, Moskovsky Prosp., Yaroslavl, 150023, Russia
Telephone	+7 (4852) 44-68-13
E-mail	razgovorovpb@ystu.ru
Website	<a href="http://comincon.ru">http://comincon.ru</a>

Published with the assistance of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences

Editor:	V.B. Dobrokhotov
English translator:	L.A. Tyukina
Layout designer, proofreader	A.S. Frolov

Registration	27 November 2020 (Certificate EL No FS 77 - 79733)
Frequency:	Quarterly
Subscription and distribution	Open Access

## СОДЕРЖАНИЕ / TABLE OF CONTENTS

### Строительные конструкции, здания и сооружения

*С.Л. Исаченко*

8 Деструктивные явления при некачественном прогреве монолитных железобетонных конструкций

*S.L. Isachenko*

Destructive phenomena at poor-quality heating of monolithic reinforced concrete structures

### Строительные материалы и изделия

*С.В. Федосов, М.О. Баканов, И.С. Грушко*

19 Предиктивное моделирование эксплуатационных свойств пеностекла с использованием моделей машинного обучения на основе линейной регрессии

*S.V. Fedosov, M.O. Bakanov, I.S. Grushko*

Predictive modelling of foam glass performance properties using linear regression-based machine learning models

*П.Б. Разговоров, В.В. Левандовский*

39 Композиционная строительная краска с включением гематита (Ярославская обл., Россия)

*P.B. Razgovorov, V.V. Levandovsky*

Composite construction paint with inclusion of hematite (Yaroslavl region, Russia)

### Проектирование и строительство дорог, метрополитенов

*С.Д. Тимрот, С.З. кзы Калаева, Н.Л. Маркелова, Р.Э. Калаев*

51 Модифицирующая добавка для повышения качества асфальтобетона

*S.D. Timrot, S.Z. kzy Kalaeva, N.L. Markelova, R.E. Kalaev*

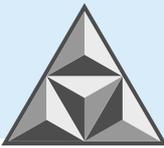
A modifying additive for asphalt concrete quality improvement

- В.И. Мартинсон, Ш.Н. Валиев, А.В. Кочетков*  
Особенности строительного контроля компонентов и конструкции полимерных зон деформационных швов мостовых сооружений
- 62 *V.I. Martinson, Sh.N. Valiev, A.V. Kochetkov*  
Construction control of components and design of polymer zones of bridge expansion joints

### **Архитектура зданий и сооружений.**

#### **Творческие концепции архитектурной деятельности**

- М.Н. Кюребекова*  
Водные объекты в архитектурном и социокультурном пространстве города (на примере средневекового Дербента)
- 76 *M.N. Kyurebekova*  
Water facilities in the architectural and socio-cultural space of the city (on the example of medieval Derbent)
- 88 Информация для авторов



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.05 + 693.5

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-8-19

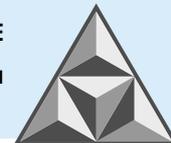
# Деструктивные явления при некачественном прогреве монолитных железобетонных конструкций

**С.Л. Исаченко**

**Сергей Леонидович Исаченко**

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва,  
Российская Федерация

*Isach21@yandex.ru*



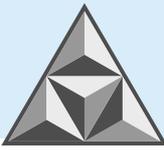
*Возрастание этажности строящихся зданий ведет к увеличению сроков строительства и, как следствие, необходимости устройства монолитных железобетонных конструкций в зимний период. Электропрогрев при помощи проводов является наиболее распространенным в Центральном регионе России методом выдерживания бетона в зимних условиях. При определенных условиях увеличивается риск возникновения дефектов монолитных железобетонных конструкций, связанный с различными видами нарушений технологического процесса. Основные виды дефектов монолитных конструкций неоднократно описаны, но практически не встречаются работы, поясняющие виды и причины дефектов, связанные с нарушениями при электропрогреве бетона. Сформирована блок-схема основных дефектов, а также выявлены основные причины их появления. Обобщен опыт, полученный в течение двух зимних периодов на строительных объектах г. Москвы, относящихся к уникальным зданиям и сооружениям. В ходе операционного и приемочного строительного контроля обозначены группы причин возникновения дефектов: ошибки монтажа и установки провода; нарушения режима прогрева. По каждой группе выявлены конкретные виды дефектов, а также даны рекомендации по их недопущению в дальнейшем. Сформирован «чек-лист» параметров, обязательных для контроля при электропрогреве проводами. Указаны контрольные точки, выполнение которых сводит к минимуму риск возникновения дефектов.*

**Ключевые слова:** электропрогрев бетона, греющий провод, зимнее строительство, температурное расширение, строительный контроль, монолитный железобетон

**Для цитирования:**

Исаченко С.Л. Деструктивные явления при некачественном прогреве монолитных железобетонных конструкций // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 2. С. 8-19.  
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5160/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-8-19



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-8-19

# Destructive phenomena at poor-quality heating of monolithic reinforced concrete structures

**S. L. Isachenko**

**Sergey L. Isachenko**

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

*Isach21@yandex.ru*



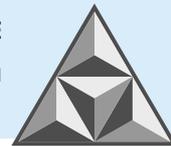
*The growth of the number of the building floors inevitably leads to an increase in the construction period and, consequently, to the need for monolithic reinforced concrete structures in winter. Electric heating by means of cables is the most widespread method of concrete curing in winter conditions in the Central region of Russia. The risk of defects in monolithic reinforced concrete structures increases under certain conditions. This risk is related to various types of technological process faults. The main types of monolithic structures defects have been repeatedly described. But there are practically no papers describing the types and causes of defects associated with failures during electric heating of concrete. The author has developed a block diagram of the main defects, and the main reasons for their occurrence have been identified. The paper summarizes the experience gained during two winter periods at the construction sites of Moscow city belonging to unique buildings and structures. Operational and quality inspection of the construction was performed. The author identified groups of defect causes: cable installation and installation errors; heating regime errors. The author identified specific types of defects for each group, and also gave recommendations on their avoidance in the future. The paper provides a 'check list' of parameters that must be checked during electric heating with heating cables. The checklist shows the control points that minimize the risk of defects.*

**Keywords:** electric heating of concrete, heating cable, winter construction, thermal expansion, construction control, monolithic reinforced concrete

**For citation:**

Isachenko, S.L. (2024) Destructive phenomena at poor-quality heating of monolithic reinforced concrete structures, *Smart Composite in Construction*, 5(2), pp. 8-19  
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5160/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-8-19



## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время на территории Российской Федерации, особенно на территории Москвы и Московской области, наблюдается тенденция к увеличению этажности строящихся зданий. Увеличение этажности, даже с применением современных технологий строительства, неминуемо приводит к увеличению сроков проведения общестроительных работ, и, следовательно, необходимости проводить работы в зимних условиях.

На указанной выше территории продолжительность периода зимнего строительства часто составляет не менее полугода [1]. Так как основным материалом, применяемым в строительстве гражданских зданий, является монолитный железобетон, в соответствии с СП 70.13330.2012 «Свод правил. Несущие и ограждающие конструкции», при снижении среднесуточной температуры ниже 5°C необходимо использовать специальные методы по обеспечению требуемых температурно-влажностных параметров при наборе прочности бетона.

Наибольшее распространение получили следующие методы зимнего бетонирования [1-4]:

- метод «термоса»;
- метод с использованием противоморозных добавок;
- электропрогрев бетона;
- индукционный нагрев бетона;
- инфракрасный обогрев бетона.

Как известно, бетон является искусственным строительным материалом, полученным в результате твердения смеси из минерального вяжущего (цемента), крупного и мелкого заполнителя и воды [5]. Поскольку набор прочности цементным камнем связан с протеканием реакций гидратации клинкерных минералов в составе вяжущего, возникает необходимость обеспечения специальных мер по поддержанию требуемого температурно-влажностного режима.

При температуре выше 70-80°C возможно чрезмерно быстрое испарение воды из бетонной смеси. В то же время при слабой интенсивности прогрева вероятно замерзание бетонной смеси. И то, и другое негативно скажется на итоговой прочности конструкции.

Порядок подбора размеров, параметров осуществления процесса, а также схемы раскладки греющих элементов подробно рассмотрены в [6].

Также ранее разобраны и описаны часто встречающиеся дефекты монолитных железобетонных конструкций, но практически нигде не выделены причинно-следственные связи между ними и особенностями распространения тепла от нагревательного провода [7-9].

Настоящая работа носит практический характер и призвана улучшить контроль качества строительных конструкций. Благодаря созданию перечня факторов влияния и выявлению «узких мест» можно заострить внимание на обеспечении надежности строительной продукции и снизить затраты на исправление дефектов.

Объектом исследования в данной работе выступают монолитные плиты перекрытия, устраиваемые в зимних условиях.

Предметом исследования являются дефекты, возникающие в горизонтальных монолитных конструкциях из-за некачественно выполненных работ по прогреву конструкций при зимнем бетонировании.

Цель работы – формирование перечня основных дефектов, возникающих при электропрогреве монолитного железобетона с помощью греющих проводов, а также выявление причин их возникновения.

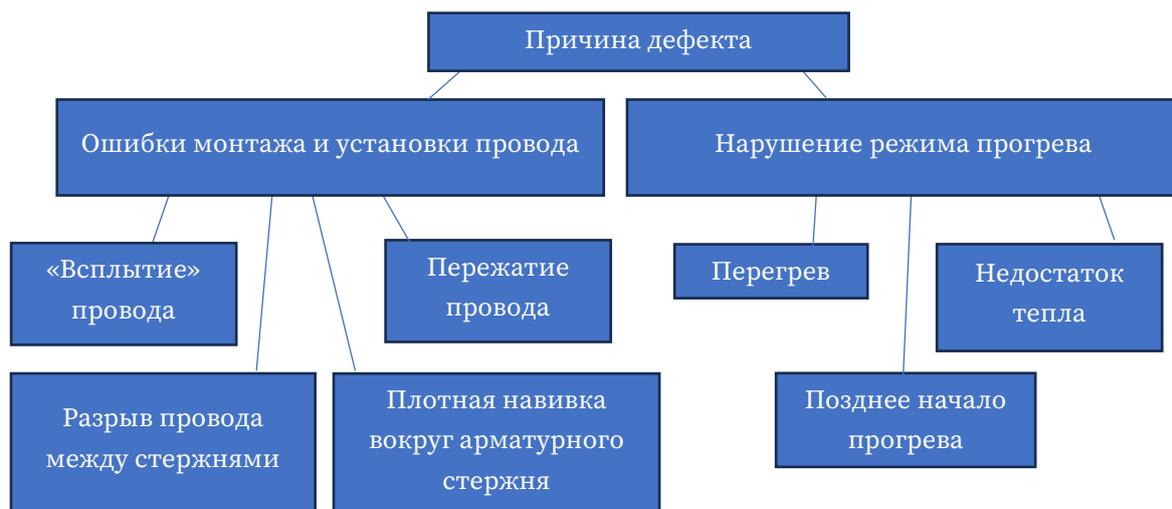


## ДЕФЕКТЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ИЗ-ЗА ОШИБОК МОНТАЖА И УСТАНОВКИ ПРОВОДА

Причины возникновения дефектов при проведении электропрогрева с помощью проводов можно разделить на две группы:

- ошибки монтажа и установки провода;
- нарушение режима прогрева.

По каждому из указанных пунктов имеется несколько направлений развития событий, и это удобнее представить в виде блок-схемы.



**Рис. 1.** Блок-схема: причины возникновения дефектов

**Fig. 1.** Block diagram: causes of faults

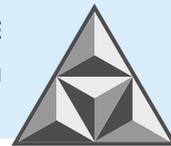
Далее перечислены основные причины возникновения дефектов. Что касается первой группы, в данной работе не приведены подробные инструкции по их устранению. Это связано с тем, что возникновение таких дефектов можно предупредить. Для этого необходимо произвести измерение электрического сопротивления до укладки бетонной смеси и при необходимости оперативно устранить проблему путем замены поврежденного участка провода. В случае выявления дефекта из второй группы (нарушение режима прогрева) алгоритм устранения приведен в следующем подразделе.

«Всплытие» провода возникает при большом шаге привязки провода к арматурным стержням. Опасность данного дефекта обусловлена тем, что «всплывший» провод лишается теплосъема со стороны бетонной смеси. В результате этого происходит обгорание изоляции и короткое замыкание.

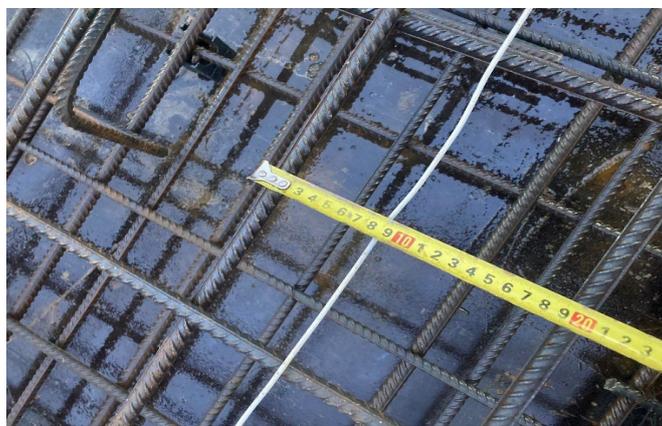


**Рис. 2.** Оплавившийся «всплывший» провод

**Fig. 2.** A melted 'surfaced' cable



Как правило, шаг раскладки греющего кабеля является кратным 100 мм, но в некоторых источниках можно встретить шаг раскладки провода 50 мм. В идеальных условиях необходимо стремиться к раскладке кабеля с шагом 200 мм, так как он наиболее распространен для фоновой арматуры, что позволяет избегать наличия «свободного» провода. Иными словами, «свободный» провод – такой, который не имеет прилегания к фоновой арматуре плиты перекрытия по всей длине. Размещение провода между стержнями может выглядеть как допустимое. Но во время процесса бетонирования монолитного перекрытия рабочие при укладке или уплотнении бетонной смеси могут наступить на «свободный» участок и разорвать провод, а восстановить его после укладки смеси не представляется возможным. Для исключения обрыва провода в ходе подготовки к приемке и укладке бетонной смеси следует проверить сопротивление провода мегомметром перед укладкой бетонной смеси и при необходимости восстановить поврежденный участок.

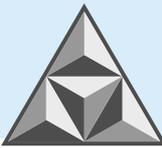


**Рис.3.** Укладка провода между арматурой  
**Fig. 3.** Cable laying between the reinforcement

Согласно [6], фиксировать греющий провод к поверхности рабочей арматуры допускается с применением пластиковых хомутов-стяжек либо при помощи кусков провода в изоляции. Как правило, используются отрезки провода ПНСВ, аналогичного закрепляемому. Это требование обусловлено тем, что во время бетонирования при движении рабочих по каркасу возможна подвижность арматурного каркаса. Если провод будет закреплен классической вязальной проволокой, при упругой деформации каркаса произойдет разрушение изоляции и дальнейшее перегорание провода с выводом из работы всей греющей ветки. На рис. 4 показан пример, когда часть провода закреплена при помощи пластиковых хомутов-стяжек, а часть – с использованием вязальной проволоки.



**Рис. 4.** Крепление греющего провода при помощи пластиковых хомутов-стяжек и вязальной проволоки  
**Fig. 4.** Fixing the heating cable with plastic tie clamps and binding wire



При рассмотрении основных схем укладки греющего провода в плите перекрытия можно выделить два варианта соединения провода в электрическую цепь: по схеме «звезда» и схеме «треугольник» [6, 10]. Главное отличие этих схем – сочетания греющих проводов при подключении к магистральным (схема монтажа «треугольник» приведена на рис. 5).

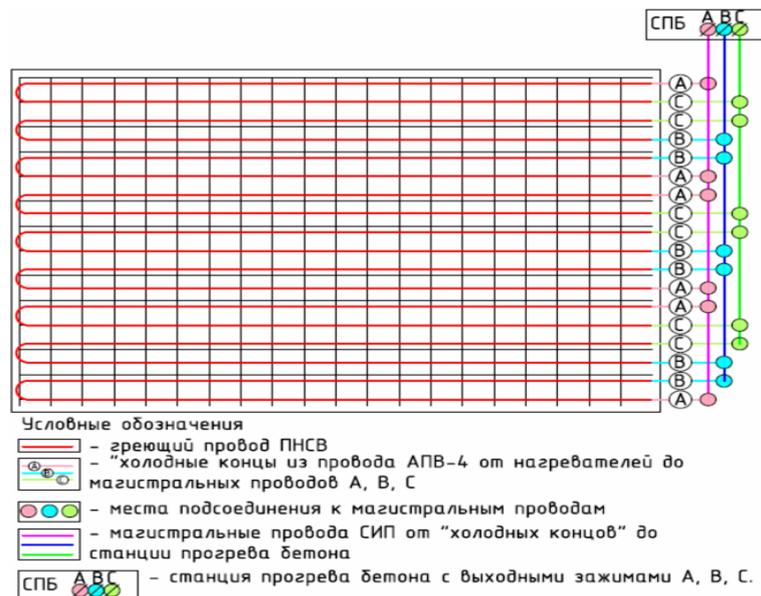


Рис. 5. Монтаж нагревательного провода при подключении по схеме «треугольник»

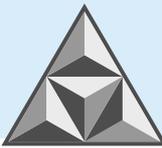
Fig. 5. Installation of the heating cable for triangle connection

В противоположной от магистральных проводов части плиты перекрытия при монтаже по любой схеме соединения проводов участки, где происходит смена направления их укладки, выглядят практически одинаково. При правильной организации технологического процесса необходимо производить крепление при помощи пластиковых хомутов-стяжек, добавляя дополнительную изоляцию в места поворота провода, избегая его перегибов. На практике же часто встречается плотная навивка провода вокруг арматуры. В таком случае при подаче электрического тока участок, оказавшийся в центре «обмотки», лишается теплосъема со стороны бетонной смеси, а также дополнительно получает тепловую энергию от смежных проводов. В итоге это приводит к обгоранию изоляции и выходу «ветки» провода из строя. Пример неподходящей навивки проводов представлен на рис. 6 (плотная в центральной части).



Рис. 6. Намотка греющего провода в зоне, противоположной магистральному проводу

Fig. 6. Heating cable winding in the area opposite the main cable



В то же время на правом и левом участке провода намотаны с зазором порядка 3-5 диаметров. Исходя из практического опыта это является достаточным расстоянием для удовлетворительного теплосъема со стороны бетонной смеси.

## ДЕФЕКТЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ИЗ-ЗА НАРУШЕНИЯ РЕЖИМА ПРОГРЕВА

Переходя к рассмотрению дефектов, возникающих из-за нарушений режима прогрева, следует отметить, что особенности тепловых режимов и шаг раскладки проводов подробно описаны в [1, 4, 6, 11]. В настоящей работе основной упор сделан на выявление и устранение результатов несоблюдения режима технологического процесса.

Главной задачей термообработки бетона является поддержание в теле бетона температуры, достаточной для продолжения реакций гидратации, а также форсированный набор прочности бетонной конструкции, так как увеличение температуры позволяет ускорить гидратацию вяжущего [6].

Мероприятия по ликвидации дефектов, возникших на перегретом или замерзшем участке плиты, следует проводить в последовательности:

1. Выявление отклонения температуры бетонной смеси/бетона от расчетных параметров в ходе мероприятий операционного контроля;
2. Проверка участка от магистрального провода до греющего;
3. Отключение группы проводов от магистральных проводов;
4. Мероприятия по приведению температурных параметров к нормативным условиям;
5. Контроль прочности бетона в возрасте 7 и 28 сут.;
6. Принятие решения о необходимости восстановительных мероприятий по итогам испытаний бетона в возрасте 28 сут.

Остановимся на каждом пункте отдельно:

1. Контроль за режимом термообработки бетона проводится лицом, ответственным за производство работ, назначенным приказом по организации, а также лицом, осуществляющим строительный контроль, при помощи технических термометров или датчиков температуры в бетонной смеси. Кроме того, после набора бетоном прочности более 1.5 МПа становится возможным сплошной контроль температуры бетона при помощи пирометра.

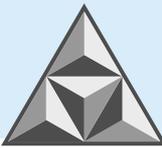
2. В случае исправности магистрального и соединительного провода, идущего от магистрального непосредственно к греющему, и нормально функционирующего трансформатора следует переходить к пункту 3.

3. Необходимо отключить группу проводов от магистрального, так как отсутствие или чрезмерный прогрев бетонной смеси свидетельствует о механическом повреждении изоляции греющего провода.

4. Мероприятия по приведению температурных параметров к нормативным условиям зависят от типа нарушения:

– в случае отсутствия подачи тепла на участок плиты перекрытия следует незамедлительно уложить на поверхность бетона греющие маты, а при их отсутствии – соорудить тепляк и прогревать воздух внутри тепляка тепловыми пушками;

– чрезмерный перегрев зоны плиты перекрытия (выше 80°C) может свидетельствовать о коротком замыкании на участке провода. В этом случае после снятия напряжения с дефектного участка необходимо дождаться снижения температуры до допустимых параметров и прибегнуть к обогреву бетона методами, указанными в предыдущем подпункте; при этом



нельзя исключать вероятность того, что перегрев бетонной смеси произошел из-за особенностей наложения тепловых полей в зоне поворотов греющего провода.

5. Необходимо провести контроль дефектных участков в возрасте 7 и 28 сут. неразрушающими методами контроля (ультразвуковой контроль прочности бетона и отрыв бетона со скалыванием). При обширных дефектных участках или невозможности произвести измерения указанным методом (из-за разрыхления верхнего слоя бетона) следует прибегнуть к отбору кернов с дальнейшим испытанием разрушающим методом контроля.

6. При положительных результатах испытаний дальнейшие мероприятия не проводятся, в противном случае необходимо разработать комплекс мероприятий по восстановлению несущей способности дефектных участков.

Отдельное внимание необходимо уделить дефекту, возникающему при задержке прогрева бетона. На практике такое явление случается достаточно редко. Этому способствуют разгрузочные плиты, устраиваемые непосредственно по грунту с целью устройства проездов и пешеходных участков на стилобатах здания. Конструктивной особенностью данных плит является расположение арматурной сетки в середине тела плиты, и, кроме того, значительный отъем тепла из свежеложенной бетонной смеси со стороны грунтового основания.

В случае, когда между завершением укладки бетонной смеси и началом прогрева проходит немало времени, а в качестве утепления выбрано только брезентовое тентовое укрытие, из-под которого возможно выдувание теплого воздуха, возникает следующая ситуация. Верхний слой бетона покрывается ледяной коркой. К моменту, когда корка имеет сформированную структуру, в середине сечения бетона начинается активное тепловыделение от греющего провода. Часто ответственное лицо, стремясь исправить свою ошибку, подает ток большой мощности на греющий провод. Под действием источника тепла начинается испарение воды из толщи бетонной смеси. Однако ледяная корка, сформировавшаяся на поверхности, препятствует свободному испарению влаги, в результате чего образуются многочисленные вздутия верхнего слоя бетона. Первый этап образования таких дефектов показан на рис. 7, а.

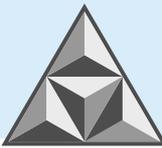


**Рис. 7.** Вздутие бетонной поверхности вследствие появления ледяной корки (а)  
и появления дефектных участков над греющим проводом (б)

**Fig. 7.** Bloating of the concrete surface due to ice crusting (a) and defective areas above the heating cable (b)

Кроме того, в данном примере греющий провод уложен неравномерно и с большим шагом, что, в свою очередь, также способствовало появлению дефектов (см. рис. 7, б).

После формирования перечня дефектов сделано заключение, что практически во всех случаях основной причиной проблем является человеческий фактор. Своевременное обнаружение дефектов позволяет минимизировать, а в некоторых случаях – свести к нулю



затраты, необходимые на восстановление расчетных характеристик и параметров готовых строительных конструкций. Кроме того, учет возможности появления данных дефектов позволяет прогнозировать возможность их возникновения и учесть этот фактор при построении организационно-технологической модели обеспечения эффективного строительного производства [12]. Это, в свою очередь, ведет к снижению общей стоимости строительства.

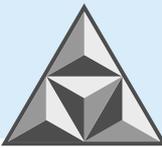
## ВЫВОДЫ

Сформирована блок-схема с перечнем дефектов, возникающих при электропрогреве бетона из-за нарушения технологического регламента. Создан «чек-лист», показывающий основные «узкие места» и параметры, на которые необходимо обратить внимание для снижения риска возникновения дефекта строительных конструкций при электропрогреве их проводами. Основные пункты такого «чек-листа»:

- отсутствие «свободного» провода, уложенного без плотной связи с армированием;
- крепление провода без применения стальной вязальной проволоки;
- отсутствие плотной навивки проводов вокруг армирования в зоне, противоположной магистральному кабелю;
- проверка сопротивления электрической цепи в начале процесса и при завершении процесса укладки бетонной смеси;
- контроль режима термообработки бетона;
- определение габаритов «дефектной» зоны (только при наличии грубых нарушений температурного режима выдерживания бетона).

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Головнев С.Г.** Технология зимнего бетонирования. Оптимизация параметров и выбор методов. Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 1999. 156 с.
2. **Забелина О.Б., Леонов Д.В.** Выбор эффективного метода зимнего бетонирования монолитных строительных конструкций // Перспективы науки. 2020. № 6. С. 67-70.
3. **Красновский Б.В.** Инженерно-физические основы методов зимнего бетонирования: в 2 ч. Ч. 1: учеб. пособие для вузов. М.: Изд. Юрайт, 2024. 286 с.
4. **Гныря А.И., Коробков С.В.** Технология бетонных работ в зимних условиях. Томск: Изд. ТГАСУ, 2011. 412 с.
5. **Баженов Ю.М.** Технология бетона. М.: Изд. АСВ, 2002. 500 с.
6. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях: под ред. Б.А. Крылова, С.А. Амбарцумяна, А.И. Звездова. М.: НИИЖБ, 2005. 275 с.
7. **Перунов А.С.** Характерные дефекты монолитных конструкций при нарушении технологии работ в зимнее время // Инженерный вестник Дона. 2024. № 3.
8. **Саденко Д.С., Гарькин И.Н.** Причины дефектов при производстве монолитных железобетонных конструкций, связанных с коррозией бетона // Региональная архитектура и строительство. 2020. № 4. С. 105-109.
9. **Khuzin A., Sharavina A.** Ways to improve the quality of monolithic reinforced concrete structures // IOP Conf. Ser.: Mat. Sci. Eng. IOP Publishing. 2020. Vol. 890, no. 1. P. 1-9.
10. **Дудин М.О., Барабанщиков Ю.Г.** Специфика монтажа электрического провода в технологии прогрева бетона // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 6. С. 47-61.
11. Зимнее бетонирование с применением нагревательных проводов МДС 12-48.2009. ЗАО «ЦНИИОМТП». М.: ОАО «ЦПП», 2009. 18 с.



12. **Федосов С.В., Опарина Л.А., Маилян А.Л., Петрухин А.Б., Федосеев В.Н.** Отечественный и зарубежный опыт моделирования организационно-технологической надежности строительного производства на современном этапе. Умные композиты в строительстве. 2021. Vol. 2, no. 1. P. 40-46. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5037/view>; DOI: 10.52957/27821919\_2021\_1\_40

*Поступила в редакцию 15.04.2024*

*Одобрена после рецензирования 24.05.2024*

*Принята к опубликованию 10.06.2024*

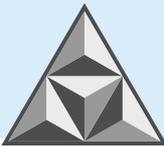
## REFERENCES

1. **Golovnev, S.G.** (1999) *Tekhnologiya zimnego betonirovaniya. Optimizatsiya parametrov i izbor metodov* [Winter concreting technology. Parameters' optimisation and choice of methods.]. Chelyabinsk: Izd. YuUrRGU, Russia. (in Russian).
2. **Zabelina, O.B. & Leonov, D.V.** (2020) Vybhor effektivnogo metoda zimnego betonirovaniya monolitnykh stroitel'nykh konstruksiy [Choosing an Effective Winter Concreting Method for Monolithic Building Structures], *Perspektivy nauki*, (6), pp. 67-70 (in Russian).
3. **Krasnovskiy, B.V.** (2024) *Inzhenerno-fizicheskie osnovy metodov zimnego betonirovaniya : v 2 ch. Chast' 1* [Engineering and physical foundations of winter concreting methods: in 2 parts. Part 1]. Ucheb. posobie dlya vuzov. Moscow: Izd. Yurajt, 2024 (in Russian).
4. **Gnyrya, A.I. & Korobkov, S.V.** (2011) *Tekhnologiya betonnykh работ v zimnih usloviyah* [Technology of concrete works in winter conditions]. Tomsk: Izd. TGASU (in Russian).
5. **Bazhenov, Yu. M.** (2002) *Tekhnologiya betona* [Concrete technology]. Moscow: Izd. ASV (in Russian).
6. **Krylov, B.A., Ambartsumyan, S.A. & Zvezdov, A.I.** (2005) *Rukovodstvo po progrevu betona v monolitnykh konstruksiyakh* [Guidelines for heating concrete in monolithic structures]. Moscow: Izd. NIIZhB (in Russian).
7. **Perunov, A.S.** (2024) Harakternye defekty monolitnykh konstruksiy pri narushenii tekhnologii работ v zimnee vremya [Characteristic defects of monolithic structures in violation of the technology of work in winter], *Inzhenerniy vestnik Dona*, (3) (in Russian).
8. **Sadenko, D.S. & Garkin, I.N.** (2020) Prichiny defektov pri proizvodstve monolitnykh zhelezobetonnykh konstruksiy, svyazannykh s korrozией betona [Causes of defects in production of monolithic reinforced concrete structures related to concrete corrosion], *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo*, (4), pp. 105-109 (in Russian).
9. **Khuzin, A. & Sharavina, A.** (2020) Ways to improve the quality of monolithic reinforced concrete structures, *IOP Conf. Ser.: Mat. Sci. Eng.*, IOP Publishing, 890(1), pp. 1-9.
10. **Dudin, M.O., Barabanshchikov, Yu.G.** (2015) Specifics of electric wire installation in concrete heating technology, *Construction of unique buildings and structures*, (6), pp. 47-61 (in Russian).
11. *Zimnee betonirovanie s primeneniem nagrevatel'nykh provodov MDS 12-48.2009.* ZAO TsNIIOMTP. M.: OAO TsPP, 2009. 18 p. (in Russian).
12. **Fedosov, S.V., Oparina, L.A., Mailyan, A.I., Petrukhin, A.B. & Fedoseyev, V.N.** (2021) Russian and international experience in simulation of the organizational and technological reliability of modern construction production, *Smart Composite in Construction*, 2(1), pp. 40-46 [online]. Available at: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5037/view>; DOI: 10.52957/27821919\_2021\_1\_40 (in Russian) (accessed 12.03.2024).

*Received 15.04.2024*

*Approved after reviewing 24.05.2024*

*Accepted 10.06.2024*



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.3; 004.852

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-20-38

# Предиктивное моделирование эксплуатационных свойств пеностекла с использованием моделей машинного обучения на основе линейной регрессии

**С.В. Федосов<sup>1</sup>, М.О. Баканов<sup>2,\*</sup>, И.С. Грушко<sup>3</sup>**

**Сергей Викторович Федосов**

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,  
Москва, Российская Федерация

*fedosov-academic53@mail.ru*

**Максим Олегович Баканов**

<sup>2</sup>Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России», Иваново, Российская Федерация

*mask-13@mail.ru\**

**Ирина Сергеевна Грушко**

<sup>3</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова,  
Новочеркасск, Российская Федерация

*grushkois@gmail.com*



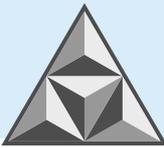
*С учетом энергосбережения, строительство требует применения эффективных теплоизоляционных материалов, таких как пеностекло. Рассматривается предиктивное моделирование эксплуатационных свойств пеностекла с использованием моделей машинного обучения. Представлено математическое описание влияния добавок в шихте на свойства пеностекла. Разработано девять составов шихты для синтеза пеностекла и определены основные параметры их микроструктуры. С помощью программной среды Jupyter Notebook и библиотеки SciKit-Learn на языке программирования Python протестированы регрессионные модели. Проанализированы коэффициенты уравнений регрессий и дана оценка погрешности моделирования. Полученные результаты подтверждают эффективность предиктивного моделирования эксплуатационных свойств пеностекла на базе линейной регрессии.*

**Ключевые слова:** пеностекло, микроструктура, эксплуатационные свойства, машинное обучение, регрессионный анализ

**Для цитирования:**

Федосов С.В., Баканов М.О., Грушко И.С. Предиктивное моделирование эксплуатационных свойств пеностекла с использованием моделей машинного обучения на основе линейной регрессии // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 2. С. 20-38.  
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5160/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-20-38



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-20-38

# Predictive modelling of foam glass performance properties using linear regression-based machine learning models

**S.V. Fedosov<sup>1</sup>, M.O. Bakanov<sup>2\*</sup>, I.S. Grushko<sup>3</sup>**

**Sergey V. Fedosov**

<sup>1</sup>National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

*fedosov-academic53@mail.ru*

**Maksim O. Bakanov**

<sup>2</sup>Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Ivanovo, Russia

*mask-13@mail.ru\**

**Irina S. Grushko**

<sup>3</sup>Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

*grushkois@gmail.com*



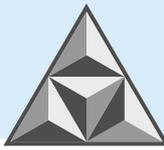
*Building construction requires the use of efficient thermal insulation materials such as foam glass in view of energy conservation. The paper considers predictive modelling of the performance properties of foam glass using machine learning models. The paper presents a mathematical description of the additives impact in the charge on the properties of foam glass. Nine charge compositions for foam glass synthesis were developed and their main microstructure parameters were determined. The authors tested the regression models using the Jupyter Notebook software environment and the SciKit-Learn library in the Python programming language. The paper analyses the regression equation coefficients and estimates the modelling error. The obtained results confirm the effectiveness of predictive modelling of foam glass performance properties on the basis of linear regression.*

**Keywords:** foam glass, microstructure, functional properties, machine learning, regression analysis

**For citation:**

Fedosov, S.V., Bakanov, M.O. &, Grushko, I.S. (2024) Predictive modelling of foam glass performance properties using linear regression-based machine learning models, *Smart Composite in Construction*, 5(2), pp. 20-38. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5160/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-20-38



## ВВЕДЕНИЕ

В сфере строительства важной проблемой является разработка инновационных теплоизоляционных материалов с оптимальными характеристиками [1]. Примером такого материала может служить пеностекло, обладающее низкой теплопроводностью, высокой прочностью и морозостойкостью [2-4]. Физические свойства пеностекла зависят от его структуры, формируемой в процессе синтеза [5-10]. Улучшение структуры пеностекла для достижения требуемых свойств [11-16] возможно, в частности, с использованием математического моделирования [17, 18].

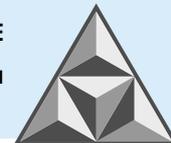
Понятие предиктивной аналитики, известной как «продвинутая аналитика», описывается набором сложных методов, предназначенных для прогнозирования различных параметров (рис. 1). Используя статистические модели, предиктивная аналитика позволяет выявлять закономерности и устанавливать корреляции между параметрами [19], а также прогнозировать физико-химические характеристики. Регрессия является наиболее распространенной и используемой формой предиктивной аналитики. При разработке модели регрессии используется количественная переменная, которую необходимо предсказать. Существует большое количество типов регрессии, включая многомерную линейную и полиномиальную, а также регрессионные деревья. Чтобы успешно применять предиктивную аналитику, необходимо подготовить данные, определить модель прогнозирования и следовать предиктивному процессу. Предиктивные модели могут иметь различные формы и масштабы в зависимости от сложности и применения, для которого они были разработаны.



Рис. 1. Методы продвинутой аналитики

Fig. 1. Advanced analytics methods

На сегодняшний день наблюдается активное развитие области, посвященной предиктивному моделированию сложных технологических процессов [20-24]. Очевидно, успешная реализация этого направления невозможна без использования методов машинного обучения, которые позволяют автоматизировать процесс обучения и улучшать поведение



системы на основе анализа базы данных без явного программирования. Применение методов машинного обучения в предиктивном моделировании дает возможность системам самостоятельно извлекать и использовать закономерности, выявленные из анализа большого набора характеристик. Это позволяет создавать модели, способные предсказывать поведение сложных технологических процессов с высокой точностью.

Используемый статистический подход, включающий регрессионный анализ [25-29], способствует детальному изучению воздействия различных факторов на характеристики композиционного материала или изделия. В данном исследовании рассматривается влияние состава исходного сырья на свойства материала, а также параметры его микроструктуры. Учитывая необходимость оценки совместного влияния факторов при работе со сложными системами стекол, такие методы машинного обучения с учителем, как линейная регрессия, могут быть эффективным инструментом для решения обозначенной проблемы. Они позволяют анализировать множество переменных и их взаимосвязь, а также предсказывать значения целевой переменной. Таким образом, использование методов машинного обучения с учителем может способствовать разработке и оптимизации свойств теплоизоляционных материалов, включая пеностекло с необходимым набором эксплуатационных характеристик.

Цель исследования заключается в выявлении закономерностей формирования структуры пеностекла при температурах ниже 850°C. В работе используются методы машинного обучения с учителем, включая линейную регрессию, для прогнозирования эксплуатационных характеристик материала на основе изменений химического состава исходных компонентов.

Для достижения поставленной цели исследования решаются следующие задачи:

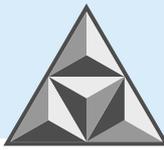
1. Формирование оптимальных составов шихты для создания пеностекла;
2. Оценка параметров микроструктуры, включая фазовый состав, долю кристаллической и аморфной фаз, пористость, толщину межпоровых перегородок, а также эксплуатационные свойства пеностекла (теплопроводность, плотность, механическая прочность и др.);
3. Разработка регрессионных моделей, описывающих влияние химического состава на свойства пеностекла;
4. Проверка разработанных моделей на адекватность и повторяемость результатов;
5. Оценка возможности повышения точности путем учета комбинированного воздействия факторов.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для анализа микроструктуры пеностекла использовали метод рентгенофазового анализа (дифрактометр Bruker D2 Phaser) и программы PDXL2 и TOPAS. Пористость и толщину перегородок измеряли с помощью микротомографии (Skyscan-1172); данные обрабатывали с использованием программы STAn.

Химический состав материала пеностекла вычисляли теоретически [29]. Оценка эксплуатационных характеристик образцов (теплопроводность, плотность, прочность на сжатие и изгиб) производили в соответствии с методиками [11-16].

Настоящее исследование посвящено предсказанию эксплуатационных свойств пеностекла, а также параметров его микроструктуры (обозначаемых символами  $x_n$ ). Пространство, в котором описываются характеристики, называется пространством объектов и обозначается символом  $X$ . В данном случае целевой переменной, которую мы стремимся определить, являются процентные доли компонентов шихты, и множество их значений обозначается символом  $Y$ . Пространство ответов представляет собой множество вещественных



чисел:  $\mathbb{Y} = \mathbb{R}$ . Отдельные значения целевой переменной обозначаются символом  $y$ . Каждый пример в наборе данных, где имеем информацию об объектах и их соответствующих ответах, называется обучающим примером. Полное множество таких примеров называется обучающей выборкой и обозначается  $X = \{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$ , где  $x_1, \dots, x_n$  — объекты обучающей выборки, а  $n$  — количество примеров в выборке. Одной из ключевых особенностей обучающих объектов является наличие соответствующих им ответов  $y_1, \dots, y_n$ .

Обычно для анализа необходимо описать объекты с помощью набора характеристик, которые называются признаками или факторами. Вектор, который включает все признаки объекта  $x$ , называется признаковым описанием этого объекта.

Для получения результата используем матрицу «объекты-признаки»  $X \in \mathbb{R}^{n \times d}$ , где каждая строка представляет признаковое описание одного из обучающих объектов. Таким образом, строки в матрице соответствуют объектам, а столбцы представляют различные признаки.

Необходимо разработать функцию  $a: X \rightarrow \mathbb{Y}$ , которая способна предсказывать ответ для любого объекта. Такая функция может быть названа алгоритмом или моделью. Для определения ожиданий от алгоритма необходимо ввести функционал качества, который позволяет оценить эффективность его работы. Если мы хотим минимизировать функционал, его можно назвать функционалом ошибки.

Данные задачи относятся к категории обучения с учителем, а именно — к задаче регрессии, которая характеризуется наличием вещественной целевой переменной.

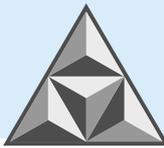
В области машинного обучения существует широкий спектр алгоритмов ( $\mathcal{A}$ ), которые могут использоваться для решения различных задач. Одним из простых и хорошо изученных семейств алгоритмов являются линейные модели. Они строятся на основе линейной комбинации признаков, включая свободный коэффициент  $\omega_0$ , и используются для предсказания результатов:

$$\mathcal{A} = \{a(x) = \omega_0 + \omega_1 x_1 + \dots + \omega_d x_d \mid \omega_0, \omega_1, \dots, \omega_d \in \mathbb{R}\}, \quad (1)$$

где через  $x_i$  обозначается значение  $i$ -признака у объекта  $x$ . Лучшая из таких моделей может быть выбрана путем минимизации MSE (Mean Squared Error — среднеквадратичная ошибка):

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \omega_0 + \sum_{j=1}^d \omega_j x_{ij} - y_i \right)^2 \rightarrow \min_{\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_d}, \quad (2)$$

Здесь  $x_{ij}$  обозначает значение  $j$ -признака на  $i$ -объекте. Обучение — это процесс нахождения оптимального алгоритма. Если модель  $a(x)$  имеет дифференцируемые параметры  $\omega$ , мы можем использовать градиентные методы для оптимизации: начинаем с произвольной точки и движемся в сторону наименьшего значения функционала ошибки (антиградиента). В случае выпуклых функционалов этот метод найдет глобальный минимум, но для невыпуклых функционалов гарантируется только сходимость к локальному минимуму. Как достичь лучшего локального минимума, можно решить различными способами, например, при выборе начального значения или при использовании сложных методов оптимизации. Важно отметить, что дифференцируемые модели, которые поддаются оптимизации, состоят из простых последовательных преобразований данных и не могут полностью заменить сложные структуры или программы с ветвлениями и циклами. В настоящее время существует немного недифференцируемых моделей, которые могут быть эффективно обучены. Однако известны успешные примеры (градиентный бустинг над решающими деревьями), которые позволяют



обучить недифференцируемые модели. Эти модели используются в различных областях и позволяют достичь хороших результатов при анализе сложных данных.

При использовании моделей линейной регрессии происходит комбинирование признаков с определенными коэффициентами для прогностических значений:

$$a(x) = \omega_0 + \sum_{j=1}^d \omega_j x_{ij}. \quad (3)$$

В модели фигурируют параметры, обозначаемые как веса  $\omega_j$ , где  $\omega_0$  упоминается как свободный коэффициент или смещение (bias). В формуле (3) сумма представляет скалярное произведение вектора признаков на вектор весов. Линейные модели имеют простую структуру, что обеспечивает высокую скорость обучения и делает их популярными в работе с большими объемами данных. Кроме того, они имеют небольшое количество параметров, что позволяет контролировать риск переобучения и использовать их с зашумленными данными и небольшими выборками. В линейных моделях предполагается линейная связь между каждым признаком и целевой переменной, а также отсутствие зависимости последней от комбинаций признаков. Это означает, что каждый признак вносит свой вклад в предсказание модели независимо от других признаков, что может быть полезно при работе с данными, где линейные зависимости представлены в хорошем приближении. Однако в случае, когда зависимости более сложные, линейные модели могут быть ограничены в способности хорошо предсказывать целевую переменную.

Для анализа данных использовали методы регрессионного и корреляционного анализов в Jupyter Notebook с применением языка программирования Python и библиотеки SciKit-Learn [30]. Применяли модель множественной линейной регрессии, а для уменьшения ошибок использовали метод градиентного спуска. Данные нормализовали путем центрирования и масштабирования. Оценку ошибок модели в процессе составления коэффициентов проводили с использованием метрики среднеквадратичной ошибки (MSE), финальное качество модели проверялось с помощью корня из среднеквадратичной ошибки (RMSE). Эти метрики позволяют сделать выводы о качестве связи между микроструктурой и свойствами пеностекла.

Для проведения регрессионного анализа требуется создать достаточный набор исходных данных. На предварительном этапе создано девять различных составов пеностекла при одинаковом температурно-временном режиме (см. рис. 2).

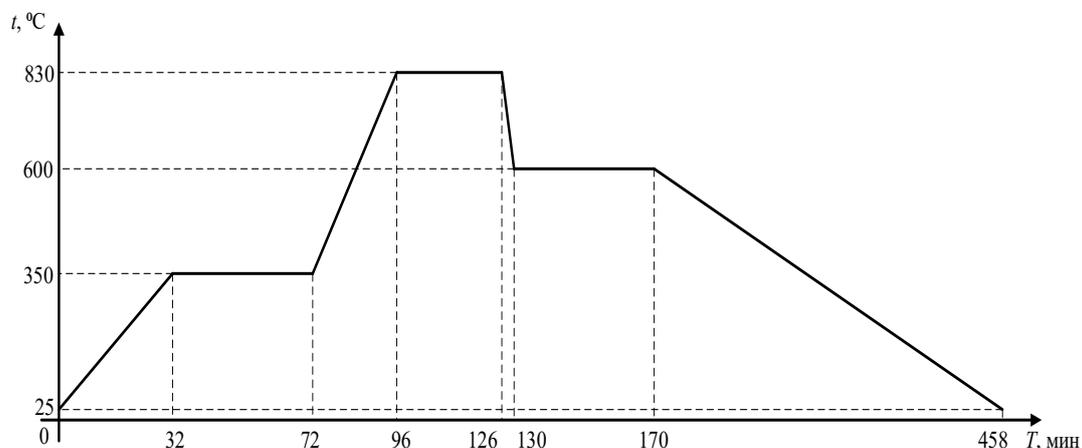
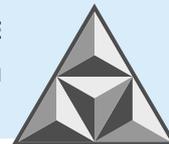


Рис. 2. Температурный режим синтеза образцов пеностекла

Fig. 2. Temperature conditions for synthesis of foam glass



При создании кристаллической фазы в аморфном скелете материала использовали катализаторы кристаллизации, эффективные для данного исследования. Количество составов определялось так, чтобы их было достаточно для построения линейной модели. Один из составов (нулевой) является базовым (табл. 1).

**Таблица 1.** Химический состав оксидов в анализируемых пробах

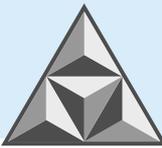
**Table 1.** Chemical composition of oxides in the analyzed samples

№ образца	Оксидный состав, мас%							
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O
0	63.13	0.27	8.17	3.56	0.04	3.16	6.73	11.50
1	62.96	0.25	7.49	3.27	0.03	2.90	6.16	11.30
2	62.84	0.25	7.48	3.26	0.04	2.89	6.15	11.28
3	62.28	0.25	7.42	3.23	0.50	2.88	7.13	11.19
4	61.88	0.25	7.29	3.18	0.04	2.84	8.53	11.00
5	62.57	0.25	7.45	3.25	0.04	3.19	7.17	11.25
6	61.88	0.25	7.29	3.18	0.04	3.12	8.53	11.00
7	62.57	0.25	7.45	3.25	0.04	2.90	7.17	11.25
8	61.88	0.25	7.29	3.18	0.04	2.84	8.53	11.00
№ образца	Оксидный состав, мас%							
	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	BaO	SO <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>
0	1.40	0.04	0.04	0.02	0.01	0.01	1.90	–
1	1.29	0.03	0.04	0.02	–	0.77	3.48	–
2	1.28	0.04	0.05	0.03	0.02	0.97	3.48	–
3	1.29	0.04	0.05	0.03	0.02	–	3.45	0.30
4	1.25	0.04	0.04	0.03	0.02	–	3.40	0.29
5	1.29	0.04	0.05	0.03	0.02	0.02	3.46	–
6	1.25	0.04	0.04	0.03	0.02	–	3.40	–
7	1.29	0.04	0.05	0.03	0.02	0.31	3.46	–
8	1.25	0.04	0.04	0.03	0.02	0.29	3.40	–

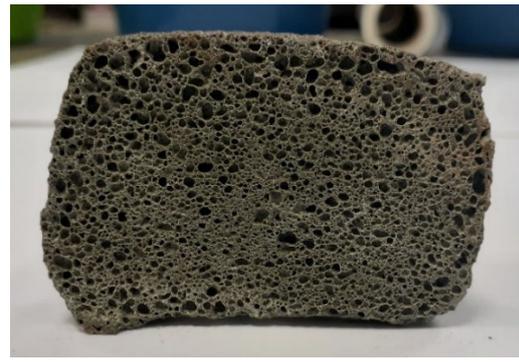
Базовый состав включал только основные компоненты, без катализаторов кристаллизации и модификаторов. Дополнительно нами было добавлено четыре компонента, каждый как минимум с двумя уровнями, повторенными дважды для повышения надежности результатов. Общее количество составов равнялось 9. Различные дополнительные компоненты использовали для изучения их воздействия на материал, особенно влияние катализатора кристаллизации. К примеру, сочетания оксида хрома в количествах 0.75 и 1.00 г рассмотрены для оценки влияния; кроме того, диапазоны варьирования выбирали узкими для корректного применения теории линеаризации.

Для подготовки образцов использовали следующие процедуры. Сначала золошлаковую смесь и стеклобой измельчали в щековой дробилке, а затем – в фарфоровом барабане с мелющими телами. После отсева с использованием сита 0.08 материал размещали на вращающиеся валки. Размер зерен подбирали с учетом стандартов и требований заводов-производителей. Сырьевые компоненты взвешивали на электронных весах, смешивали, увлажняли, упаковывали и формовали в цилиндры с использованием гидравлического пресса.

Процесс синтеза изображен на рис. 3. Начальные образцы вводили в печь при 25°C, нагревали до 350°C (10°C/мин) и выдерживали 40 мин. Затем нагревали до 830°C (20°C/мин) и выдерживали 30 мин, после чего температуру снижали до 600°C и выдерживали 40 мин. Отжиг происходит с охлаждением до 25°C. Предложенный режим формирует материал с качественной пористой структурой. Рис. 3, б демонстрирует результирующий образец.



а



б

**Рис. 3.** Общий вид пеностекла: а – перед термической обработкой; б – после термической обработки

**Fig. 3.** General view of foam glass: a – before heat treatment; b – after heat treatment

В лаборатории изучены свойства пеностекла (теплопроводность, плотность, прочность на сжатие и изгиб, в направлении, перпендикулярном лицевой поверхности, и под центральной нагрузкой) и определены параметры его микроструктуры (качественный и количественный состав фаз, процент кристаллической и аморфной фаз, уровень пористости, толщина межпоровой перегородки). Табл. 2 содержит диапазоны изменения и средние значения указанных выше параметров для различных потенциальных применений моделей. Каждое среднее значение произведено как арифметическое среднее параметра (4) по девяти составам:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i = \frac{1}{N} (x_1 + \dots + x_N), \quad (4)$$

где  $x_i$  – исходный вектор признаков;  $\bar{x}$  – среднее значение вектора признаков.

**Таблица 2.** Диапазоны изменений эксплуатационных свойств и параметров микроструктуры

**Table 2.** Ranges of changes in operational properties and microstructure parameters

Параметр	max	min	mean value
Теплопроводность, Вт·м <sup>-1</sup> ·град <sup>-1</sup>	0.17	0.11	0.14
Плотность, кг·м <sup>-3</sup>	900.13	658.50	791.62
Прочность при сжатии, МПа	29.70	7.52	18.01
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	0.90	0.34	0.61
Прочность при растяжении перпендикулярно лицевой поверхности, МПа	19.44	9.78	14.01
Прочность при действии сосредоточенной нагрузки, МПа	27.31	6.64	15.40
Пористость, %	77.30	56.10	70.19
Толщина межпоровых перегородок, мм	0.36	0.17	0.29
Количественные значения кристаллических фаз, %	21.54	0.60	4.39
Количество аморфной фазы, %	43.30	8.36	25.42
Кварц SiO <sub>2</sub> , %	10.80	5.30	7.59
Пироксен (диопсид) Ca(Mg,Fe)(Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ), %	72.40	44.80	62.03
Кристаллит SiO <sub>2</sub> , %	15.50	1.90	6.37
Нефелин Na <sub>3</sub> K(AlSiO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub> , %	6.70	1.30	4.29
Эсколаит Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	10.10	0.00	2.73
Волластонит Ca(SiO <sub>3</sub> ), %	37.70	0.00	16.92

Проведенный исследовательский анализ включал химический состав и эксплуатационные характеристики. Результаты были объединены в файл \*.csv и загружены в среду Jupyter Notebook с применением языка программирования Python.



Для построения регрессионных моделей представлены два варианта исследования. В первом варианте проанализировано воздействие химического состава на эксплуатационные характеристики материала. Как независимая переменная использовалось процентное содержание компонентов (см. табл. 1). Теплопроводность, плотность, прочность при сжатии, изгибе, растяжении перпендикулярно поверхности и при действии сосредоточенной нагрузки были использованы в качестве зависимых переменных.

На основе этих данных были получены уравнения регрессии, которые описывают зависимость между химическим составом и эксплуатационными свойствами материала.

Оценку корреляции между переменными производили с использованием метода Пирсона (5). Для этого дана корреляционная матрица (рис.4), которая позволила определить степень взаимосвязи между независимыми и зависимыми параметрами. Результирующее значение равно [-1, 1], где -1 означает идеальную отрицательную корреляцию, а +1 означает идеальную положительную корреляцию; 0 означает, что две переменные не имеют линейной корреляции. Это позволило выявить наиболее значимые факторы, оказывающие влияние на эксплуатационные свойства пеностекла.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}}, \tag{5}$$

где  $x_i$  – значения переменной  $X$ ;

$y_i$  – значения переменной  $Y$ ;

$\bar{X}$  – среднее выборочное по  $X$ ;

$\bar{Y}$  – среднее выборочное по  $Y$ .

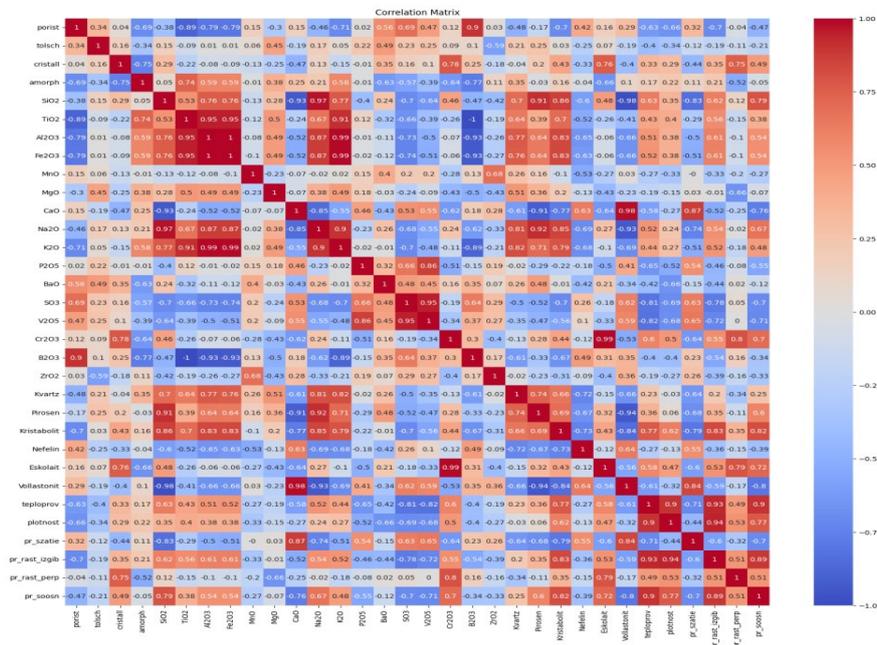
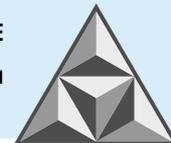


Рис. 4. Корреляционная матрица степени взаимосвязи между независимыми и зависимыми параметрами

Fig. 4. Correlation matrix of the relationship degree between independent and dependent parameters

Для стандартизации вектора независимых переменных применено стандартное отклонение с использованием функции StandardScaler из библиотеки SciKit-Learn. Для настройки регрессионной модели использована функция SGDRegressor из sklearn.linear\_model (6-8). Этот метод позволяет без участия человека подобрать коэффициенты модели с помощью градиентного спуска.



При этом определяется стандартизация ( $z$ ):

$$z = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}; \quad (6)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i); \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \quad (8)$$

где  $x_i$  – исходный вектор признаков,

$\bar{x}$  – среднее значение вектора признаков,

$\sigma$  – стандартное отклонение.

Задаем целевую метрику для минимизации (используется среднеквадратичная ошибка MSE) и определяем параметры градиентного спуска: скорость обучения  $\eta_0$  (например, 0.01) и критерий останова через параметр  $\text{tol}$  (например, 0.0001). Алгоритм SGDRegressor завершит процесс обновления коэффициентов модели, если изменение MSE станет меньше 0.0001.

Путем последовательного подбора гиперпараметров в SciKit-Learn определены значения для зависимых параметров. Для каждого параметра использовали коэффициенты регрессионных моделей, учитывающие влияние каждой независимой переменной и их комбинации без квадратичных зависимостей. В итоге получены 12 моделей, соответствующих зависимым параметрам.

Сценарий №2 включал в себя получение уравнений регрессии, описывающих связь химического состава с микроструктурой и ее влияние на эксплуатационные характеристики образца. На первом этапе независимыми параметрами были процентные доли компонентов, согласно табл. 1. Зависимыми параметрами последовательно служили пористость, толщина межпоровой перегородки, количество кристаллической и аморфной фаз, кварца, пироксена, кристобалита, нефелина, эсколаита, волластонита. Для моделирования использованы нормализованные данные вектора из сценария №1 с аналогичными гиперпараметрами SGDRegressor. Этап завершился созданием 20 моделей, соответствующих микроструктуре, и удвоением зависимых параметров.

На втором этапе исследования использовались параметры пористости, толщины перегородки, содержание фаз кварца, пироксена. Зависимые параметры включали теплопроводность, плотность, прочность и др. Создано 12 моделей с данными, нормализованными через стандартное отклонение в SciKit-Learn. Оптимизирована регрессионная модель с SGDRegressor и гиперпараметрами, разработано 32 модели.

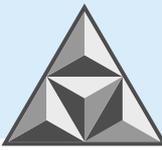
Для каждой созданной модели были определены значения RMSE, которые представляют собой корень из средней квадратичной ошибки, рассчитанный по традиционной математической формуле:

$$RMSE(a, X) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (a(x_i) - \hat{y}_i)^2}, \quad (9)$$

где  $N$  – количество экспериментальных данных, равное числу представленных образцов;

$y_i$  – значение зависимой переменной  $y$ , которое было экспериментально получено для  $i$ -образца и является образцовым значением;

$\hat{y}_i$  – значение зависимой переменной  $y$  для  $i$ -образца с использованием модели.



Результаты измерений RMSE были преобразованы в относительные величины погрешности  $\delta$ :

$$\delta = \frac{RMSE}{y_{max}} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где  $y_{max}$  – верхняя граница значений зависимой переменной  $y$ , полученная путем анализа результатов измерений по всем образцам в выборке.

Также была проведена проверка моделей на воспроизводимость; коэффициенты рассчитывались минимум пять раз для оценки стабильности результатов (в пределах  $\pm 10\%$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе разработанных моделей (12 для Сценария №1 и 32 для Сценария №2) приведены формулы, используемые для предварительной проверки соответствия результатов принципу согласованности с теоретическими положениями и известными связями, описывающими термохимические превращения. При составлении формул использованы обозначения:

$$x_{\text{комп}} = f(v_{\text{комп}}) = \frac{v_{\text{комп}} - u}{\sigma}, \quad (11)$$

где  $v_{\text{комп}}$  – доля конкретного компонента (оксида);

$u$  – среднее значение химического состава, рассчитанное по всем значениям;

$\sigma$  – стандартное отклонение исходных данных от среднего по составу.

1) Модель регрессии была построена для анализа влияния содержания конкретного химического соединения на количество кристаллической фазы в исходном составе. Важность увеличения содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в шихте для увеличения количества кристаллической фазы в итоговом образце отражена в модели:

$$\begin{aligned} K(x_{\text{компи}}) = & 6.88 \cdot x_{\text{Cr}_2\text{O}_3} - 3.19 \cdot x_{\text{CaO}} + 2.33 \cdot x_{\text{MgO}} + 2.22 \cdot x_{\text{ZrO}_2} + 2.22 \cdot x_{\text{P}_2\text{O}_5} - \\ & - 1.95 \cdot x_{\text{K}_2\text{O}} - 1.79 \cdot x_{\text{BaO}} + 1.72 \cdot x_{\text{V}_2\text{O}_5} + 1.17 \cdot x_{\text{SO}_3} - 1.04 \cdot x_{\text{Na}_2\text{O}} + 0.72 \cdot x_{\text{SiO}_2} + \\ & + 0.67 \cdot x_{\text{TiO}_2} - 0.66 \cdot x_{\text{B}_2\text{O}_3} + 0.25 \cdot x_{\text{Al}_2\text{O}_3} + 0.08 \cdot x_{\text{Fe}_2\text{O}_3} + 0.002 \cdot x_{\text{MnO}} + 4.39. \end{aligned} \quad (12)$$

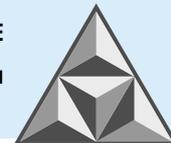
2) Данная модель выявляет преобладающее влияние снижения доли  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в исходном составе на увеличение количества кристаллической фазы в конечном образце:

$$\begin{aligned} A(x_{\text{компи}}) = & -4.58 \cdot x_{\text{Cr}_2\text{O}_3} + 2.53 \cdot x_{\text{CaO}} + 1.65 \cdot x_{\text{K}_2\text{O}} - 1.56 \cdot x_{\text{SO}_3} - 1.53 \cdot x_{\text{V}_2\text{O}_5} - \\ & - 1.30 \cdot x_{\text{MgO}} - 1.14 \cdot x_{\text{P}_2\text{O}_5} - 1.03 \cdot x_{\text{B}_2\text{O}_3} + 0.93 \cdot x_{\text{TiO}_2} - 0.86 \cdot x_{\text{BaO}} - 0.81 \cdot x_{\text{SiO}_2} + \\ & + 0.75 \cdot x_{\text{Fe}_2\text{O}_3} + 0.66 \cdot x_{\text{Al}_2\text{O}_3} + 0.34 \cdot x_{\text{Na}_2\text{O}} - 0.17 \cdot x_{\text{ZrO}_2} + 0.06 \cdot x_{\text{MnO}} + 25.42. \end{aligned} \quad (13)$$

3) Модель регрессии, которая анализирует взаимосвязь между содержанием эсколаита  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и долями химических соединений в исходной смеси, включая их комбинации. В данной модели подчеркивается ключевая роль увеличения содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  во всех комбинациях для формирования эсколаита:

$$\begin{aligned} n_{\text{эсколаит}}(x_{\text{компи}}, x_{\text{компи}}, x_{\text{компи}}) = & (2.17 \cdot x_{\text{BaO}} \cdot x_{\text{Cr}_2\text{O}_3} + 1.90 \cdot x_{\text{V}_2\text{O}_5} \cdot x_{\text{Cr}_2\text{O}_3} + 1.86 \cdot x_{\text{SO}_3} \cdot x_{\text{Cr}_2\text{O}_3} + \\ & + 1.82 \cdot x_{\text{P}_2\text{O}_5} \cdot x_{\text{Cr}_2\text{O}_3} + 1.82 \cdot x_{\text{MnO}} \cdot x_{\text{Cr}_2\text{O}_3} + 1.73 \cdot x_{\text{K}_2\text{O}} \cdot x_{\text{Cr}_2\text{O}_3} + 1.72 \cdot x_{\text{Na}_2\text{O}} \cdot x_{\text{Cr}_2\text{O}_3} + \\ & + 1.72 \cdot x_{\text{Al}_2\text{O}_3} \cdot x_{\text{Cr}_2\text{O}_3} + 1.72 \cdot x_{\text{Fe}_2\text{O}_3} \cdot x_{\text{Cr}_2\text{O}_3} + 1.71 \cdot x_{\text{B}_2\text{O}_3} \cdot x_{\text{Cr}_2\text{O}_3} + 1.70 \cdot x_{\text{MgO}} \cdot x_{\text{Cr}_2\text{O}_3} + \\ & + 1.70 \cdot x_{\text{SiO}_2} \cdot x_{\text{Cr}_2\text{O}_3} + 1.68 \cdot x_{\text{TiO}_2} \cdot x_{\text{Cr}_2\text{O}_3} + 1.68 \cdot x_{\text{Cr}_2\text{O}_3} + 1.23 \cdot x_{\text{CaO}} \cdot x_{\text{Cr}_2\text{O}_3} + 26.94) \cdot 10^{-1}. \end{aligned} \quad (14)$$

4) В данной модели подчеркивается важность снижения пористости и толщины межпоровых перегородок при увеличении теплопроводности материала:



$$\lambda(z_{\text{парам.}i}, z_{\text{парам.}i}, z_{\text{парам.}j}) = (-2.47 \cdot \Pi \cdot d - 2.14 \cdot d - 1.94 \cdot \Pi - 1.67 \cdot d \cdot n_{\text{пироксен}} - 1.42 \cdot d \cdot n_{\text{кварц}} + 1.40 \cdot n_{\text{кристобалит}} \cdot n_{\text{нефелин}} - 1.36 \cdot \Pi \cdot n_{\text{пироксен}} - 1.27 \cdot \Pi \cdot n_{\text{кварц}} - 1.26 \cdot n_{\text{кристобалит}} \cdot n_{\text{воластонит}} + 1.18 \cdot A \cdot n_{\text{кристобалит}} + 1.16 \cdot A - 1.08 \cdot n_{\text{эсכולант}} \cdot n_{\text{воластонит}} + 1.03 \cdot A \cdot n_{\text{нефелин}} + 1.01 \cdot n_{\text{кристобалит}} + 0.99 \cdot n_{\text{пироксен}} \cdot n_{\text{кристобалит}} + 88.14) \cdot 10^{-3}, \quad (15)$$

где  $\Pi$  – пористость;

$d$  – толщина межпоровой перегородки;

$n_x$  – количество компонента  $x$  кристаллической фазы.

Ниже дополнительно представлены некоторые примеры моделей, вызвавших особый интерес авторов и требующие дополнительного анализа.

1) Модель регрессии, которая учитывает связь между содержанием конкретного химического соединения в исходной смеси и уровнем пористости материала:

$$\Pi(x_{\text{компи}}) = 2.62 \cdot x_{\text{BaO}} - 2.24 \cdot x_{\text{Cr}_2\text{O}_3} - 2.02 \cdot x_{\text{ZrO}_2} + 1.67 \cdot x_{\text{B}_2\text{O}_3} - 1.59 \cdot x_{\text{TiO}_2} - 1.07 \cdot x_{\text{P}_2\text{O}_5} - 0.98 \cdot x_{\text{MgO}} - 0.90 \cdot x_{\text{Al}_2\text{O}_3} - 0.82 \cdot x_{\text{Fe}_2\text{O}_3} + 0.68 \cdot x_{\text{Na}_2\text{O}} + 0.64 \cdot x_{\text{CaO}} + 0.40 \cdot x_{\text{SO}_3} + 0.28 \cdot x_{\text{K}_2\text{O}} - 0.18 \cdot x_{\text{V}_2\text{O}_5} + 0.09 \cdot x_{\text{SiO}_2} - 0.04 \cdot x_{\text{MnO}} + 70.19. \quad (16)$$

2) Модель регрессии, учитывающая взаимосвязь между содержанием определенного химического соединения в изначальной смеси и количеством кварца в конечном образце:

$$n_{\text{кварц}}(x_{\text{компи}}) = (5.01 \cdot x_{\text{MgO}} + 3.06 \cdot x_{\text{ZrO}_2} + 3.04 \cdot x_{\text{MnO}} - 2.98 \cdot x_{\text{CaO}} + 2.61 \cdot x_{\text{BaO}} + 2.56 \cdot x_{\text{Na}_2\text{O}} + 2.32 \cdot x_{\text{SiO}_2} + 1.95 \cdot x_{\text{K}_2\text{O}} - 1.92 \cdot x_{\text{Cr}_2\text{O}_3} + 1.54 \cdot x_{\text{Al}_2\text{O}_3} + 1.48 \cdot x_{\text{Fe}_2\text{O}_3} - 0.74 \cdot x_{\text{SO}_3} + 0.68 \cdot x_{\text{TiO}_2} - 0.62 \cdot x_{\text{V}_2\text{O}_5} - 0.49 \cdot x_{\text{B}_2\text{O}_3} - 0.30 \cdot x_{\text{P}_2\text{O}_5} + 75.24) \cdot 10^{-1}. \quad (17)$$

3) Модель регрессии, учитывающая взаимосвязь между теплопроводностью материала и различными параметрами его микроструктуры:

$$\lambda(z_{\text{парам.}i}) = (0.45 \cdot n_{\text{эсכולант}} - 0.45 \cdot \Pi + 0.44 \cdot n_{\text{кристобалит}} - 0.43 \cdot d - 0.29 \cdot n_{\text{воластонит}} + 0.18 \cdot A + 0.17 \cdot K + 0.07 \cdot n_{\text{пироксен}} - 0.05 \cdot n_{\text{кварц}} + 0.03 \cdot n_{\text{нефелин}} + 7.95) \cdot 10^{-2}. \quad (18)$$

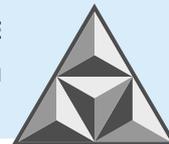
4) Модель регрессии, учитывающая влияние отдельных параметров микроструктуры на плотность материала:

$$\rho(z_{\text{парам.}i}) = (4.34 \cdot n_{\text{эсכולант}} - 4.06 \cdot \Pi - 3.28 \cdot n_{\text{кварц}} + 2.64 \cdot A + 2.16 \cdot n_{\text{кристобалит}} - 1.07 \cdot n_{\text{пироксен}} - 0.64 \cdot n_{\text{воластонит}} + 0.44 \cdot n_{\text{нефелин}} + 0.28 \cdot d + 0.05 \cdot K + 79.16) \cdot 10. \quad (19)$$

В табл. 3 представлены результаты расчета значений относительной приведенной погрешности  $\delta$ .

Сравнение зависимых переменных и варианты учета факторов в таблице показали, что моделирование теплопроводности имеет наибольшие погрешности. Учет химического состава и их сочетаний снижает ошибку на 19.48%. Двухэтапный регрессионный анализ помогает точнее прогнозировать эксплуатационные параметры.

В результате исследований разработаны регрессионные модели, позволяющие оценить влияние параметров химического состава шихты на эксплуатационные свойства пеностекла. Разработанные модели обладают высокой точностью прогнозирования плотности и прочности при сжатии и растяжении с погрешностью  $\leq 1\%$ . Проверка разработанных уравнений подтвердила их соответствие теоретическим представлениям и логическим связям, описывающим термохимические процессы в системе. Это означает, что модели удовлетворяют основным принципам и концепциям, принятым в данной области исследований. Продолжительный анализ повторяемости расчета коэффициентов регрессии показал, что полученные результаты являются достаточно стабильными и надежными в



рамках рассматриваемой области знаний. Это говорит о том, что модели можно применять для прогнозирования свойств системы.

Анализ расчетной ошибки прогнозирования выявил необходимость использования двухэтапного регрессионного анализа. Этот метод включает вывод уравнений, отражающих влияние химического состава на структуру образца, и последующее определение влияния структуры на его свойства.

**Таблица 3.** Коэффициент ошибки регрессионных моделей, разработанных в исследовании

**Table 3.** Error coefficient of regression models developed under the study

Прогнозируемый параметр	Относительная ошибка моделей регрессии (%)			
	Сценарий №1		Сценарий №2	
	Эффект отдельных факторов на переменные	Эффект независимых переменных в отдельности и их комбинаций	Эффект отдельных факторов на переменные	Эффект независимых переменных в отдельности и их комбинаций
Теплопроводность	32.47	19.48	33.06	29.52
Плотность	1.26	1.05	2.39	0.02
Прочность при сжатии	9.14	9.05	5.23	0.30
Прочность на растяжение при изгибе	9.67	6.22	9.11	7.00
Прочность при растяжении, перпенд. лиц. поверхности	1.38	0.63	2.82	0.42
Прочность при действии сосредоточ. нагрузки	7.95	7.44	2.33	0.01
Пористость			0.81	0.56
Толщина межпоровых перегородок			18.61	11.11
Количественные значения кристаллических фаз			4.05	0.81
Количество аморфной фазы			1.18	0.61
Кварц SiO <sub>2</sub>			6.50	6.24
Пироксен (диопсид) Ca(Mg,Fe)(Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )			1.84	1.79
Кристаллит SiO <sub>2</sub>			2.52	1.55
Нефелин Na <sub>3</sub> K(AlSiO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub>			3.81	1.28
Эсколаит Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			4.01	3.19
Волластонит Ca(SiO <sub>3</sub> )			2.35	2.18

Полученные данные позволяют оценить необходимую плотность и прочность образца с учетом параметров структуры. Также рекомендуется учитывать влияние сочетания компонентов при расчете толщины перегородок и теплопроводности строительного материала. Погрешность прогнозирования теплопроводности составляет примерно 20%, что достаточно для предварительных оценок, но требует расширения обучающей выборки.

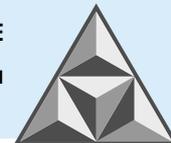
## ВЫВОДЫ

После анализа ранжирования коэффициентов в регрессионных моделях выявлено:

1. Основное воздействие на характеристики пеностекла оказывает Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Эсколаит, формирующийся в структуре материала, влияет его на теплопроводность, плотность и, как результат, на прочностные свойства.

2. Увеличение содержания MgO в шихте в сочетании с другими компонентами оказывает прямое влияние на показатели прочности материала.

3. Содержание BaO в шихте, особенно в сочетании с CaO, оказывает влияние на ряд характеристик материала. Увеличение уровня BaO приводит к снижению теплопроводности,



плотности и механических свойств материала. Это объясняется тем, что ВаО обеспечивает формирование пористой структуры материала, причем эффект ВаО на пористую структуру превышает воздействие  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

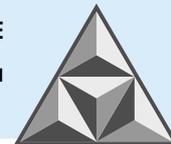
4. Существенное воздействие на прочность материала при сжатии оказывает СаО. Этот результат проявляется при взаимодействии СаО с другими составляющими смеси, что помогает компенсировать отрицательное воздействие  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  на механические характеристики материала. Увеличение концентрации СаО в смеси приводит к повышению содержания кристаллической фазы и снижению доли аморфной фазы в материале. Это свидетельствует о преобладающем влиянии СаО на структуру материала.

Разработанные модели машинного обучения на основе линейной регрессии представляют собой мощный инструмент, который позволяет анализировать экспериментальные данные не только для проверки существующих зависимостей, но и выявления скрытых и неочевидных взаимосвязей. Благодаря этим моделям появляется возможность оценить влияние взаимодействия различных факторов на эксплуатационные свойства пеностекла.

Использование моделей машинного обучения на основе линейной регрессии способствует установлению взаимосвязей между различными параметрами исследуемого материала. Они позволяют выявить важные факторы и определить их влияние на конечные характеристики пеностекла. Более того, эти модели позволяют реализовать предиктивное моделирование для оценки и предсказания потенциальных эффектов, которые могут проявляться при варьировании выявленных факторов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Sejdinović B.** Modern Thermal Insulation and Sound Insulation Materials // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023. Vol. 539. P. 218-233. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-17697-5\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-031-17697-5_19).
2. **Davraz M., Kору M., Akdağ A.E., Kılınçarslan Ş., Delikanlı, Y.E. et al.** g additives and usage rates in the production of ultra-light foam glass // *J. Therm. Analys. Calorimetr.* 2022. Vol. 147. P. 3567-3576. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10781-8>.
3. **Bashiri A., Amirhosseini A., Mirkazemi S. M. Ghanbari H.** Effect of Temperature and Water Glass Addition on the Microstructure and Physical Properties of Soda-Lime Foam Glass // *Glass Phys. Chem.* 2021. Vol. 47. P. 83-90. <https://doi.org/10.1134/S1087659621020024>.
4. **Semukhin B.S., Votinov A.V., Kazmina O.V.** Properties of Foamglass with Fullerene-like Mesostructure // *Rus. Phys. J.* 2020. T. 63. № 4. P. 710-712.
5. **Латынцева Е.А., Подойникова Я.Р., Безрукова Т.А., Муртазина А.А.** Влияние сырья на свойства пеностекла и перспективы развития // *Строительные материалы и изделия*. 2020. Т. 3. № 1. С. 44-48.
6. **Сорокин Д.С., Береговой В.А., Капустин А.Е.** Пористые гранулированные материалы на основе природных силицитов // *Инженерный вестник Дона*. 2019. № 2(53). С. 44.
7. **Zhimalov A.A., Nikishonkova O.A., Spiridonov Yu.A., Kosobudskii I.D.** Physical-Chemical Studies of Gaizes as Alternative Raw Materials for the Production of Foam Glass and Foam Materials // *Glass and Ceramics*. 2019. Vol. 75. P. 387-390. <https://doi.org/10.1007/s10717-019-00091-9>.
8. **Liu H., Tang M., Wang Z., Liu W. et al.** Optimized mechanical properties and thermal insulation capacity of foam glass through  $\text{K}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$  whiskers addition // *J. Austral. Ceram. Soc.* 2022. Vol. 58. P. 1241-1248. <https://doi.org/10.1007/s41779-022-00761-y>.
9. **Vedyakov I., Vaskalov V., Maliavski N., Nezhikov A. et al.** Granular Foam-Glass-Ceramic Thermal Insulation Based on Natural Quartz Sand // *Lect. Notes Civ. Eng.* 2023. Vol. 282. P. 395-405. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-10853-2\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-031-10853-2_37).
10. **Федосов С.В., Bakanov M.O.** Теоретические и прикладные основы процессов высокотемпературной термической обработки при производстве теплоизоляционного пеностекла // *Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт*. Мат. VII Межд. науч.-практ. конф. Тамбов, 2020. С. 40-43.

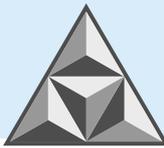


11. ГОСТ 7076-99 Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. М.: ГУП ЦППБ, 2000. 27 с.
12. ГОСТ EN 1602-2011 Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения кажущейся плотности. М.: Стандартинформ, 2012. 8 с.
13. ГОСТ 33949-2016 Изделия из пеностекла теплоизоляционные для зданий и сооружений. М.: Стандартинформ, 2019. 15 с.
14. ГОСТ 17177-94 Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний. М.: ИПК Изд. стандартов, 2002. 40 с.
15. ГОСТ EN 1607-2011 Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения прочности при растяжении перпендикулярно к лицевым поверхностям. М.: Стандартинформ, 2012. 11 с.
16. ГОСТ EN 12430-2011 Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения прочности при действии сосредоточенной нагрузки. М.: Стандартинформ, 2012. 16 с.
17. **Fedosov S.V., Bakanov M.O.** Modelling of Temperature Field Distribution of the Foam Glass Batch in Terms of Thermal Treatment of Foam Glass // *Int. Journ. Comput. Civ. Struct. Eng.* 2017. Vol. 13, no. 3. P. 112-118.
18. **Федосов С.В., Баканов М.О., Домнина К.Л.** Математическое моделирование технологических процессов получения теплоизоляционных ячеистых композитов // *Изв. Кыргыз. гос. техн. ун-та им. И. Раззакова*. 2020. № 3(55). С. 207-213.
19. **Гутьеррес, Д.Д.** Inside BIG DATA. Руководство по предиктивной аналитике: Платформа для бизнес-аналитики TIBCO Spotfire. 2017. Режим доступа: <http://www.spotfiretibco.ru/wpcontent/uploads/2017/09/InsideBIGDATA.pdf>. Дата доступа: 01.02.2024.
20. **Omar N.S., Hatem W.A., Najy H.I.** Predictive modeling for developing maintenance management in construction projects // *Civ. Eng. J.* 2019. Vol. 5. no. 4. P. 892-900.
21. **Moein M.M., Saradar, A., Rakhmati K., Musavinedzhad S.Kh.G. et al.** Predictive models for concrete properties using machine learning and deep learning approaches: rev. // *J. Build. Eng.* 2023. Vol. 63. P. 105444.
22. **Mater, Ya., Kamel M., Karam A., Bakhum E.** ANN-Python prediction model for the compressive strength of green concrete // *Constr. Innovation*. 2023. Vol. 23. no. 2. P. 340-359.
23. **Amin M.N. et al.** Prediction model for rice husk ash concrete using AI approach: Boosting and bagging algorithms // *Structures*. Elsevier, 2023. Vol. 50. P. 745-757. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.02.080>.
24. **Nazar S., Tszyn Ya., Amin M.N., Khan K. et al.** Machine learning interpretable-prediction models to evaluate the slump and strength of fly ash-based geopolymer // *J. Mat. Res. Tech.* 2023. Vol. 24. P. 100-124. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.180>.
25. **Fransson E., Eriksson F., Erhart P.** Efficient construction of linear models in materials modeling and applications to force constant expansions // *Npj Comput Mater.* 2020. Vol. 6. P. 135. <https://doi.org/10.1038/s41524-020-00404-5>.
26. **Chore H. S., Shelke, N. L.** Prediction of compressive strength of concrete using multiple regression model. *Struct. Eng. Mechan.* 2013. Vol. 45(6). P. 837-851. <https://doi.org/10.12989/SEM.2013.45.6.837>.
27. **Obianyo I.I., Anosike-Francis E.N., Ihekwe G.O. et al.** Multivariate regression models for predicting the compressive strength of bone ash stabilized lateritic soil for sustainable building. *Constr. Build. Mat.* 2020. Vol. 263. P. 120677. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120677>.
28. **Jin R., Chen Q., Soboyejo A.B.O.** Non-linear and mixed regression models in predicting sustainable concrete strength // *Construction and Building Materials*. 2018. V. 170. P. 142-152. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.063>.
29. **Матвеев М.А., Матвеев Г.М., Френкель Б.Н.** Расчеты по химии и технологии стекла. *Справ. пособие* // М.: Изд. лит. по строительству, 1972. 240 с.
30. **Pedregosa F. et al.** Scikit-learn: Machine Learning in Python // *J. Mach. Learn. Res.* 2011. Vol. 12. P. 2825-2830.

Поступила в редакцию 02.03.2024

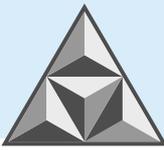
Одобрена после рецензирования 30.05.2024

Принята к опубликованию 10.06.2024



## REFERENCES

1. **Sejdinović, B.** (2023) Modern Thermal Insulation and Sound Insulation Materials, *Lecture Notes in Networks and Systems*, (539), pp. 218-233. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-17697-5\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-031-17697-5_19).
2. **Davraz, M., Koru, M., Akdağ, A.E., Kılıncarslan, Ş. & Delikanlı, Y.E. et al.** (2022) An investigation of foaming additives and usage rates in the production of ultra-light foam glass, *J. Therm. Analys. Calorimetr.*, (147), pp. 3567-3576. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10781-8>.
3. **Bashiri, A., Amirhosseini, A., Mirkazemi, S.M. & Ghanbari, H.** (2021) Effect of Temperature and Water Glass Addition on the Microstructure and Physical Properties of Soda-Lime Foam Glass, *Glass Phys. Chem.*, (47), pp. 83-90. <https://doi.org/10.1134/S1087659621020024>.
4. **Semukhin, B.S., Votinov, A.V. & Kazmina, O.V.** (2020) Properties of Foamglass with Fullerene-like Mesostructure, *Rus. Phys J.*, 63 (4), pp. 710-712 (in Russian).
5. **Latyntseva, E. A., Podoynikova, Ya. R., Bezrukova, T.A. & Murtazina, A.A.** (2020) Influence of raw materials on the properties of foam glass and development prospects, *Constr. Mat. Prod.*, 3 (1), pp. 44-48 (in Russian).
6. **Sorokin, D.S., Beregovoy, V.A. & Kapustin, A.E.** (2019) Porous granular materials based on natural silicites // *Engineering Journal of the Don*, 2(53), p. 44 (in Russian).
7. **Zhimalov, A.A., Nikishonkova, O.A., Spiridonov, Yu.A., Kosobudskii, I.D. & Vikulova, M.A.** (2019) Physical-Chemical Studies of Gaizes as Alternative Raw Materials for the Production of Foam Glass and Foam Materials, *Glass and Ceramics*, (75), pp. 387-390. <https://doi.org/10.1007/s10717-019-00091-9>.
8. **Liu, H., Tang, M., Wang, Z., Liu, W., Ma, Y. et al.** (2022) Optimized mechanical properties and thermal insulation capacity of foam glass through  $K_2Ti_6O_{13}$  whiskers addition, *J. Austral. Ceramic Soc.*, (58), pp. 1241-1248. <https://doi.org/10.1007/s41779-022-00761-y>.
9. **Vedyakov, I., Vaskalov, V., Maliavski, N., Nezhikov, A. & Vedyakov, M.** (2023) Granular Foam-Glass-Ceramic Thermal Insulation Based on Natural Quartz Sand, *Lect. Not. Civ. Eng.*, (282), pp. 395-405. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-10853-2\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-031-10853-2_37).
10. **Fedosov, S.V. & Bakanov, M.O.** "Theoretical and applied principles of high-temperature heat treatment processes in the production of thermal insulating foam glass" // *Ustojchivoe razvitie regiona: arhitektura, stroitel'stvo, transport [Sustainable development of the region: architecture, construction, transport]*. Mat. VII Mezhd. nauch.-prakt. konf. Tambov [Mat. VII Int. Sci. Pract. Conf. Tambov], 2020, pp. 40-43 (in Russian).
11. GOST 7076-99 *Construction materials and products. Method for determining thermal conductivity and thermal resistance under stationary thermal conditions*. M.: State Unitary Enterprise TsPPb, 2000 (in Russian).
12. GOST EN 1602-2011 *Thermal insulation products used in construction. Method for determining apparent density*. M.: Standartinform, 2012 (in Russian).
13. GOST 33949-2016 *Heat-insulating foam glass products for buildings and structures*. M.: Standartinform, 2019 (in Russian).
14. GOST 17177-94 *Heat-insulating construction materials and products. Test methods*. M.: IPK Publ. House of Standards, 2002 (in Russian).
15. GOST EN 1607-2011 *Thermal insulation products used in construction. Method for determining tensile strength perpendicular to face surfaces*. M.: Standartinform, 2012 (in Russian).
16. GOST EN 12430-2011 *Thermal insulation products used in construction. Method for determining strength under concentrated load*. M.: Standartinform, 2012 (in Russian).
17. **Fedosov, S.V. & Bakanov, M.O.** (2017) Modelling of Temperature Field Distribution of the Foam Glass Batch in Terms of Thermal Treatment of Foam Glass, *Int. J. Comput. Civ. Struct Eng.*, 13(3), pp. 112-118.
18. **Fedosov, S.V., Bakanov, M.O. & Domnina, K.L.** (2020) Mathematical modeling of technological processes for producing heat-insulating cellular composites, *News of the Kyrgyz. State Techn. Un-t im. I. Razzakova*, 3(55), pp. 207-213 (in Russian).
19. **Gutierrez, D.D.** Inside BIG DATA. Guide to Predictive Analytics: TIBCO Spotfire Business Intelligence Platform. 2017. Available at: <http://www.spotfiretibco.ru/wpcontent/uploads/2017/09/InsideBIGDATA.pdf>. (in Russian) (accessed 12.02.2024).
20. **Omar, N.S., Hatem, W.A. & Najy, H.I.** (2019) Predictive modeling for developing maintenance management in construction projects, *Civ. Eng. J.*, 5(4), pp. 892-900.



21. **Moein, M.M., Saradar, A., Rakhmati K., Musavinedzhad S.Kh.G. & Bristow J. et al.** (2023) Predictive models for concrete properties using machine learning and deep learning approaches: rev., *J. Build. Eng.*, (63), p. 105444.
22. **Mater, Ya., Kamel M., Karam A. & Bakhum E.** (2023) ANN-Python prediction model for the compressive strength of green concrete, *Constr. Innovation*, 23(2), pp. 340-359.
23. **Amin, M.N., Ivtikhar, B., Khan K., Javed M.F. & AbuArab A.M. et al.** (2023) Prediction model for rice husk ash concrete using AI approach: Boosting and bagging algorithms, *Structures*, (50), pp. 745-757. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.02.080>.
24. **Nazar, S., Tszyn Ya., Amin, M.N., Khan K. & Ashraf M. et al.** (2023) Machine learning interpretable-prediction models to evaluate the slump and strength of fly ash-based geopolymers, *J. Mat. Res. Techn.*, (24), pp. 100-124. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.180>.
25. **Fransson, E., Eriksson, F. & Erhart, P.** (2020) Efficient construction of linear models in materials modeling and applications to force constant expansions, *Npj Comput. Mater.*, (6), p. 135. <https://doi.org/10.1038/s41524-020-00404-5>.
26. **Chore, H.S. & Shelke, N.L.** (2013) Prediction of compressive strength of concrete using multiple regression model, *Struct. Eng. Mechan.*, 45(6), pp. 837-851. <https://doi.org/10.12989/SEM.2013.45.6.837>.
27. **Obianyo, I.I., Anosike-Francis, E.N., Ihekwe, G.O., Geng, Ya. & Jin, R. et al.** (2020) Multivariate regression models for predicting the compressive strength of bone ash stabilized lateritic soil for sustainable building, *Constr. Build. Mat.*, (263), p. 120677. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120677>
28. **Jin, R., Chen, Q. & Soboyejo, A.B.O.** (2018) Non-linear and mixed regression models in predicting sustainable concrete strength, *Constr. Build. Mat.*, (170), pp. 142-152. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.063>.
29. **Matveev, M.A., Matveev, G.M. & Frenkel, B.N.** *Calculations on chemistry and glass technology*: Ref. man. M.: Constr. Liter. Publ. House, 1972 (in Russian).
30. **Pedregosa, F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V. & Bertrand T. et al.** (2011) Scikit-learn: Machine Learning in Python, *J. Mach. Learn. Res.*, (12), pp. 2825-2830.

Received 02.03.2024

Approved after reviewing 30.05.2024

Accepted 10.06.2024



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.746

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-39-50

# Композиционная строительная краска с включением гематита (Ярославская обл., Россия)

**П.Б. Разговоров\*, В.В. Левандовский**

**Павел Борисович Разговоров, Владислав Владимирович Левандовский**

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

*razgovorovpb@ystu.ru\**, *vladislavlev79@gmail.com*



*Получена композиционная строительная краска на основе натриевого жидкого стекла, обработанного карбамидом. Установлена возможность замены традиционных минеральных компонентов в составе твердой фазы на гематит (Ярославская обл., Россия), включающий оксиды железа. Проведенные испытания показали высокую устойчивость строительной краски к статическому воздействию воды при  $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ , механическому истиранию и достаточную адгезию к стеклянной подложке и оштукатуренной поверхности. Это выявляет перспективы использования гематита и снижения стоимости производства краски.*

**Ключевые слова:** композиционная строительная краска, натриевое жидкое стекло, гематит, устойчивость к статическому воздействию воды, укрывистость, адгезия

**Для цитирования:**

Разговоров П.Б., Левандовский В.В. Композиционная строительная краска с включением гематита (Ярославская обл., Россия) // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 2. С. 39-50. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5160/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-39-50



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-39-50

# Composite construction paint with inclusion of hematite (Yaroslavl region, Russia)

**P.B. Razgovorov\*, V.V. Levandovsky**

**Pavel B. Razgovorov, Vladislav V. Levandovsky**

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

*razgovorovpb@ystu.ru\*, vladislavlev79@gmail.com*



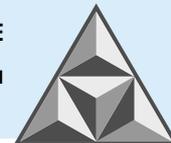
*The authors have developed a composite construction paint based on a binder - sodium liquid glass treated with urea. The authors found a possibility to replace traditional mineral components of the solid phase by hematite (Yaroslavl region, Russia), including iron oxides. The tests conducted showed high resistance of the construction paint to static water exposure at  $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ , mechanical abrasion and sufficient adhesion to glass substrate and plastered surface. This shows the prospects of hematite usage and reduction of paint production cost.*

**Keywords:** composite building paint, sodium liquid glass, hematite, resistance to static water, covering power, adhesion

**For citation:**

Razgovorov, P.B. & Levandovsky, V.V. (2024) Composite construction paint with inclusion of hematite (Yaroslavl region, Russia), *Smart Composite in Construction*, 5(2), pp. 39-50. Available at: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5160/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-39-50



## ВВЕДЕНИЕ

Композиционные строительные краски на основе натриевого жидкого стекла (НЖС), обработанного карбамидом, могут обладать высокими защитными свойствами, даже в том случае, когда в состав твердой фазы (ТФ) входят различные промышленные отходы, включающие оксиды железа (II, III), меди, никеля и хрома (III) [1, 2]. Подобные материалы отличаются дешевизной, негорючестью и повышенной адгезией к минеральной поверхности [3-6]. При этом характерно, что силикатное покрытие используется как для отделки стен снаружи, так и внутри помещений. Силикат не подвержен запылению, поэтому чаще им покрывают фасадные части зданий. Эти материалы также распространены в обозначениях разметок на автомобильных дорогах. Главный компонент состава краски – силикат калия [5, 6] или натрия. В то же время варианты пигментирующих добавок и наполнителей – компонентов ТФ могут существенно различаться, о чем исследователям известно уже более полувека [7]. По сравнению с другими материалами для фасадов, силикатные краски хорошо подходят для защиты кирпичных и бетонных стен. Выбор карбамида в качестве модифицирующей добавки к жидкому стеклу [2, 8] обусловлен, во-первых, обеспечением стабильности композиции при хранении в смешанном виде, а во-вторых, возможностью использования для окрашивания цоколей и кирпичных стен жилых домов [7].

Следует отметить, что в производстве российских силикатных красок и в настоящее время обычно используют калиевое жидкое стекло (КЖС), как это описано в [5, 7]. Несмотря на тот факт, что калиевые силикаты являются более дорогим сырьем, чем натриевые, на их основе удается получать более водоустойчивое связующее для красок, и это играет большую роль при оценке качества покрытий. Кроме того, композиционные силикатные краски отличает невысокая стабильность при хранении [5], поэтому ТФ, включающую пигменты (оксид цинка или диоксид титана) и наполнители (мел и тальк), требуется перемешивать со связующим компонентом непосредственно на строительной площадке. В этой связи такие краски выпускают двухупаковочными [3]: 1 – связующее (жидкое стекло), 2 – ТФ (пигментная часть), что объясняет дополнительные трудо- и энергозатраты работников строительных организаций, смешивающих компоненты перед нанесением на поверхность.

Четыре десятилетия назад на немецких предприятиях разработаны одноупаковочные силикатные краски [2] на основе калиевого жидкого стекла, модифицированного полиакрилатами, со сроком хранения до 6 мес. В свою очередь, в 1990-х годах в Ивановской государственной химико-технологической академии (Россия) проведены пионерские исследования с целью удешевления одноупаковочной краски на основе НЖС, выпускаемого в значительных объемах на предприятии АО «Ивхимром» (г. Иваново). Задача решалась одновременно путем модифицирования НЖС карбамидом [2] и удешевления состава за счет введения в ТФ отходов промышленных производств.

Одноупаковочные силикатные краски в наше время выпускают компании ALCRO-BECKERS AB и VIVACOLOR (Швеция), ALLIGATOR и CARAPOL (Германия), JUB (Словения), TIKKURILA (Финляндия) и др. Такие материалы рекомендованы для использования в странах Союза Независимых Государств [9] и России [10, 11].

Институт общей и неорганической химии Национальной Академии наук (Республика Беларусь) с 2000-х годов проводит разработку защитных композиционных материалов полифункционального назначения. В результате исследований получена краска, представляющая собой одноупаковочную композицию на основе КЖС (ГОСТ 18958-73). В состав ТФ входят также диоксид титана (пигмент) и неактивные щелочестойкие наполнители,



вододисперсный полимер, вещества, устойчивые в области высоких рН (диспергатор, загуститель, пеногаситель), и добавки, способствующие двойному окремнению силикатных покрытий и придающие поверхности гидрофобность («эффект лотоса») [9]. Такая краска обеспечивает диффузию водяного пара, высокие физико-механические свойства покрытия и хорошо защищает поверхность от влаги [9].

Однако проблема разработки одноупаковочных силикатных красок для современного строительства не потеряла актуальности, особенно с использованием НЖС, а также промышленных отходов и компонентов в невысоком ценовом диапазоне. Проведенные исследования [2] показали, что такие материалы получают в производственных условиях при реализации идеи модифицирования исходного сырья, причем в ходе несложного технологического цикла.

Цель настоящей работы – исследование возможности использования гематита (Ярославская обл., Россия) в составе ТФ одноупаковочной краски на базе НЖС и изучение физико-химических свойств покрытий, получаемых из разработанных составов.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для получения композиционной строительной краски использовали натриевое жидкое стекло с силикатным модулем 2.9 и исходной плотностью 1.35–1.39 г·см<sup>-3</sup> (НЖС (1.35)) марки ETIZ, в которое вводили карбамид при 313-343 К, как это описано в [2, 8]. Модифицированный продукт имел плотность 1.40-1.43 г·см<sup>-3</sup>; его тщательно смешивали в фарфоровой ступке с рецептурным количеством воды и латекса ПВА. Затем композицию насыщали компонентами ТФ – мелом, тальком, оксидом цинка, а также гематитом (Ярославская обл., Россия) при различном содержании последнего в составе ТФ (см. рис. 1): 30, 50 мас% или полное замещение типовых веществ.

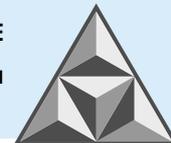


Рис. 1. Различные составы краски с добавлением гематита

Fig. 1. Various paint formulations with added hematite

Готовый композиционный материал со степенью перетира  $\approx 70$ -80 мкм по прибору «Клин» хранили в темном месте до момента нанесения на поверхность.

Краску наносили с помощью щетинной кисти или валика на хорошо очищенную и не имеющую следов влаги поверхность, как правило, в 1-2 слоя. При необходимости удаляли старые слои покрытия, а также следы жира. Фрагменты поверхности, на которой наблюдалось растрескивание старого покрытия, зачищали металлической щеткой до состояния целостного



покрытия. Трещины предварительно грунтовали раствором исходного связующего сырья (в данном случае – силиката натрия с плотностью 1.35-1.39 г·см<sup>-3</sup>). Затем проводили грунтование поверхности с применением смеси, самостоятельно полученной из 3 ч. воды и 1 ч. силиката натрия. Из-за риска быстрой карбонизации краску не приготавливали заранее; это делали непосредственно перед защитой поверхности, чтобы использовать материал в полном объеме, снизить отходы (требование экономичности).

Дисперсионные силикатные краски (их можно считать таковыми ввиду создания дисперсии пигментирующих веществ и наполнителей в жидкой фазе – растворе силиката натрия определенной плотности и латексе ПВА) не требуют проведения дополнительных операций перед осуществлением работ; достаточно открыть герметичную емкость с краской. В составе краски в данном случае имеется латекс ПВА, выполняющий роль дополнительного связующего компонента к раствору силиката натрия.

Исследование физико-механических свойств осуществляли в соответствии с разработанными и известными методиками, представленными в [1, 2].

Экспериментальные составы силикатной краски, наряду с традиционным пигментом – оксидом цинка и наполнителями (мел, тальк), включают гематит, содержащий оксиды железа и представляющий собой массу темно-бурого цвета (табл. 1.)

**Таблица 1.** Экспериментальные составы силикатной краски

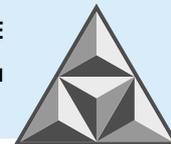
**Table 1.** Experimental compositions of silicate paint

Компоненты краски	№ образца			
	1	2	3	контрольный
Модифицированное карбамидом НЖС с плотностью 1.43 г·см <sup>-3</sup> , г	35.0	35.6	35.0	35.0
Вода, г	10.0	10.0	10.0	10.0
Сухая пигментная часть, г, в том числе:	45.0	45.0	45.0	45.0
– мел порошок, г	15.8	11.3	–	22.5
– тальк порошок, г	6.3	4.5	–	9.0
– цинковые белила, г	9.4	6.7	–	13.5
– гематит (Ярославская обл., Россия), г	13.5	22.5	45.0	–
Латекс ПВА, г	10.0	10.0	10.0	10.0
Всего, г	100.0	100.0	100.0	100.0

Все полученные экспериментальные образцы композиционной краски с включением в состав гематита (Ярославская обл., Россия) оценивали по физико-химическим характеристикам и потребительским свойствам, имеющим важное значение в отношении перспектив применения в строительстве.

*Устойчивость к статическому воздействию воды* – способность покрытия противостоять разрушающему действию воды при длительной эксплуатации окрашенной поверхности.

Для оценки устойчивости к статическому воздействию воды краску наносили щетинной кистью на стеклянные пластинки размером 120×90×1.4 мм, протертые смоченной ацетоном тканью, а затем – насухо. Покрытия выдерживали 24 ч в стеклянном шкафу при комнатной температуре. По истечении 24 ч пластину с покрытием погружали на 2/3 длины в стеклянный стакан с дистиллированной водой, выдерживали в воде 24 ч, затем извлекали из воды и вновь высушивали 1 сут. при комнатной температуре. О степени вымывания покрытия судили по наличию отпечатков на фланели (60×60 мм) при трении о поверхность.



*Смываемость* (устойчивость к смыванию краски при механическом воздействии – истирании) – выражается в процентах покрытия, смытого с поверхности стекла водой при помощи щетки. Характеризует способность лакокрасочного покрытия противостоять атмосферным и механическим воздействиям.

Для определения смываемости на две чистые стеклянные пластинки размером 120×90×1.4 мм и с известной массой щетинной кистью наносили композиционную краску, отверждали покрытие 24 ч в стеклянном шкафу при комнатной температуре. Пластинки с покрытием вновь взвешивали на аналитических весах. Затем в течение 30 с под струей воды при температуре (293±2) К и нагрузке (20±2) Н зубной щеткой терли покрытие, осуществляя круговые движения. Затем пластинки с покрытиями высушивали в течение 24 ч в стеклянном шкафу при комнатной температуре, после чего в третий раз взвешивали на аналитических весах. Смываемость краски определяли в г·м<sup>-2</sup> – как разность масс пластинки с покрытием до испытания и после него, отнесенную к площади покрытия, а также в процентах – как массу смытого покрытия в ходе испытания, отнесенную к общей массе покрытия до испытания.

*Укрывистость* – способность композиционного материала делать невидимыми цветовые различия окрашиваемой поверхности (ГОСТ 8784-75). Она показывает, сколько сухой пленки испытуемого материала необходимо, чтобы полностью укрыть 1 м<sup>2</sup> поверхности, и характеризует его расход на единицу площади.

Кроющую способность краски (укрывистость) оценивали по ГОСТ 8784-75, раздел 3. На стеклянные пластинки размером 120×90×1.4 мм, протерты тканью с ацетоном, высушенные и взвешенные с точностью до второго десятичного знака, наносили слои разработанной краски. Стеклопластиковую пластинку с материалом краски помещали на шахматную доску и наблюдали при рассеянном дневном свете на предмет просвечивания белых и черных полей (квадратов доски). В случае, если поля доски просвечивали, наносили на пластинку новые слои композиционного материала, причем до тех пор, пока различие между белыми и черными полями не переставало ощущаться. После этого пластинку взвешивали с точностью до второго десятичного знака, сушили и вновь взвешивали. Перед третьим взвешиванием удаляли потеки материала с ребер пластинки; нанесение каждого нового слоя композиционного материала на пластинку предварялось перемешиванием.

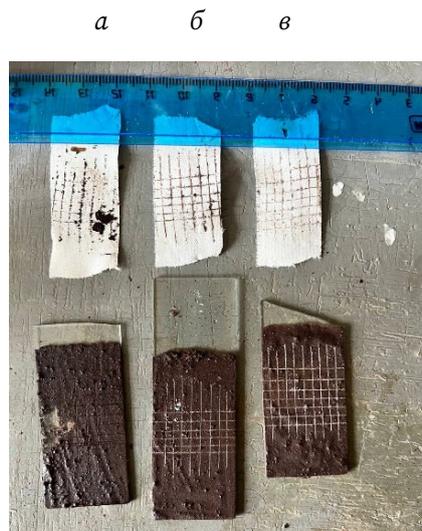
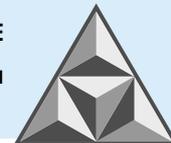
Укрывистость определяли как отношение массы пленки в граммах (после высушивания краски, нанесенной на пластинку) к общей окрашенной площади пластинки, выраженной в квадратных метрах.

*Адгезия* – характеристика, позволяющая оценить качество сцепления покрытия с защищаемой поверхностью. Ее оценивали по методу решетчатого надреза (см. рис. 2).

Бритвенным лезвием по линейке на покрытие через 1 мм наносили пять параллельных и перпендикулярных надрезов (в виде решетки). Сверху наклеивали отрезок белой изоляционной ленты и резко отрывали. Результат в баллах связывали с количеством отслоенных в результате отрыва квадратов: 1 балл – отсутствие отслоившихся фрагментов; 2 балла – отслоение 5%; 3 балла – отслоение 35%; 4 балла – отслоение более 35% квадратов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После тестирования полученных образцов новой краски (рис. 2) выявлено, что адгезия покрытия к стеклянной подложке достаточно высока (1-2 балла). После отрыва липкой ленты от покрытия, включающего 30% гематита (рис. 2, в), для образца № 1 отмечается отсутствие отслоения краски: на ленте даже сетка решетчатых надрезов практически не отразилась.



**Рис. 2.** Адгезия к стеклу краски с включением гематита (Ярославская обл., Россия): сверху – изоляционная лента с частицами отслоившейся краски, снизу – стеклянные подложки.

Замена твердой фазы, %: а – 100; б – 50; в – 30

**Fig. 2.** Adhesion to glass of paint using hematite (Yaroslavl region, Russia): insulating tape with peeled paint particles on top, glass substrates on the bottom. Solid phase replacement, %: a – 100; b – 50; c – 30

Адгезия для образца № 2 (рис. 2, б), несмотря на более четкую видимость сетки решетчатых надрезов на липкой ленте, также оценена нами в 1 балл. Образец № 3 (полная замена компонентов ТФ на гематит) характеризуется адгезией покрытия в 2 балла:  $\approx 5\%$  по площади покрытия отслоилось от стеклянной подложки (см. рис. 2, а). Таким образом, в отношении данного показателя допускается замена в составе композиционного материала 30-50% ТФ на гематит (Ярославская обл., Россия) по массе.

Согласно ГОСТ 18958-73, специальные требования к физико-химическим свойствам и потребительским характеристикам строительных силикатных красок не обозначены. Так, например, степень перетира краски по прибору «Клин» не регламентируется вовсе (дисперсность  $\delta \leq 150$  мкм). Тем не менее, ориентируясь на требования нормативной документации в отношении водно-дисперсионных фасадных композиционных материалов, можно обозначить рекомендуемый (оптимальный) уровень показателей: адгезия – 1 балл (отсутствует отслоение покрытия от поверхности); устойчивость к статическому воздействию воды при 293 К – без изменений; смываемость покрытия при механическом воздействии  $\leq 4$  г·м<sup>-2</sup>; укрывистость пленки  $\leq 200$ -250 г·м<sup>-2</sup>.

Результаты испытаний разработанной нами композиционной краски с включением гематита (Ярославская обл., Россия), представленные в табл. 2, показывают, что, при условии замены  $\leq 50\%$  ТФ по массе, материалы характеризуются не только достаточным уровнем адгезии к стеклу.

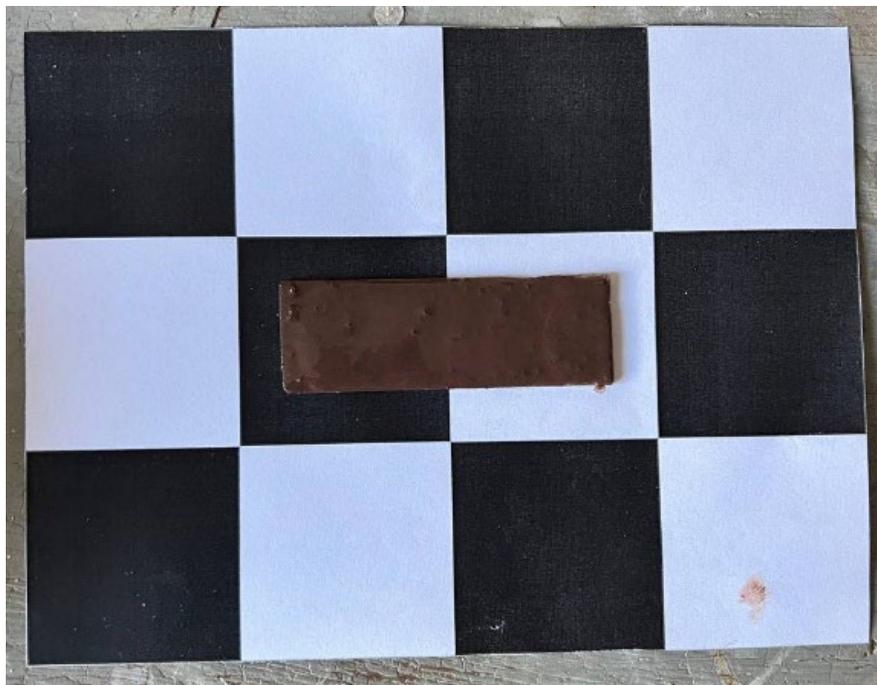
Таблица 2. Физико-химические свойства силикатной краски

Table 2. Physico-chemical properties of silicate paint

Показатель	№ образца			
	1	2	3	контрольный
Адгезия, баллы	1	1	2	2
Стойкость к статическому воздействию воды при 293 К	без изменений	вымеливает слабо	вымеливает значительно	вымеливает слабо
Смываемость, г·м <sup>-2</sup> , % по массе	7.0 ± 0.4 5.0 ± 0.3	8.0 ± 0.4 4.0 ± 0.2	21.3 ± 1.1 10.0 ± 0.5	7.0 ± 0.4 5.0 ± 0.3
Укрывистость, г·м <sup>-2</sup>	143 ± 4	187 ± 6	225 ± 7	167 ± 5



Так, смываемость пленки после высушивания покрытия с включением в состав ТФ до 50 мас% гематита (основной компонент –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) находится на уровне 4-5% ( $\approx 7-8 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}$ ) при истирании под нагрузкой  $(20\pm 2) \text{ Н}$ , а крошащая способность удовлетворяет необходимым требованиям: по шахматной доске (см. рис. 3) она составляет  $140-190 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}$ .

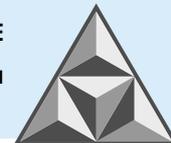


**Рис. 3.** Оценка укрывистости краски с гематитом с помощью шахматной доски

**Fig. 3.** Assessment of the coverability of hematite paint using a chessboard

После нанесения на бетонные кубики и белый кирпич разработанной композиционной краски с включением в состав ТФ гематита (Ярославская обл., Россия) покрытие приобретает глубокий красно-коричневый цвет (см. рис. 2), интенсивность которого, однако, несколько снижается (покрытие становится более светлым) при воздействии в течение 24 ч водопроводной воды при нормальных условиях (температура 293 К, давление  $1.01 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ). Все составы краски не имеют выраженного запаха органических веществ, хорошо наносятся кистью на защищаемую минеральную поверхность (бетон, цемент, асбоцемент). Они могут храниться в одноупаковочном виде в течение 4-6 мес., а перед применением разводятся небольшим количеством воды до малярной консистенции и, ввиду проявления тиксотропных свойств [7], перемешиваются без значительных усилий и наносятся в 1-2 слоя на поверхность. Срок силикатизации (отверждения покрытия) не превышает 6-8 ч на воздухе (при стандартных условиях).

Более тщательный анализ результатов выявил, что рассматриваемые композиции имеют достаточную стойкость при статическом воздействии воды лишь в том случае, когда замена традиционных пигментов и наполнителей в составе ТФ на гематит не превышает 30% по массе (табл. 2, образец № 1). При этом удается сохранить приемлемый показатель смываемости покрытия как в абсолютных единицах ( $6-7 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}$ ), так и в процентах (5%), и высокую укрывистость пленки ( $\approx 140 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}$ ), не уступающую по расходным характеристикам контрольному образцу (стандартный состав ТФ с оксидом цинка, в отсутствие ярославского гематита). Полная замена ТФ на гематит является неприемлемой (образец № 3, табл. 2); покрытие из краски имеет малую водостойчивость; при этом расход материала повышается на 35 (контрольный образец) – 58% (образец № 1).



## ВЫВОДЫ

1. Доказана возможность применения гематита (Ярославская обл., Россия) в составе силикатных красок, изготовленных на основе модифицированного карбамидом НЖС марки ETIZ; результаты удовлетворяют требованиям ГОСТ 18958-73. При этом предпочтительным вариантом является замена  $\leq 30$  мас% сухой пигментной части на гематит.

2. Выявлено, что по истечении 14 сут. с момента проведения натуральных испытаний наносимое покрытие не потеряло целостность, не изменило цвет, а попадание осадков не нарушает структуру покрытия.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Разговоров П.Б., Игнатьев А.А., Абрамов М.А., Нагорнов Р.С.** Переработка алюмосиликатного сырья и отвалов строительства метрополитена в композиционные сорбенты для очистки водных и маслосодержащих сред // *Умные композиты в строительстве*. 2020. Т. 1. Вып 1. С. 10-26; URL: <https://ystu.editorum.ru/ru/nauka/issue/5036/view>
2. **Разговоров П.Б.** Научные основы создания композиционных материалов из технических и природных силикатов. Автореферат дис... д-ра техн. наук. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т. 2008. 32 с.
3. **Лендова Н.А., Коробовцева Т.А., Погребницкая Г.В.** Краски на основе жидкого стекла // *ЛКМ и их применение*. 1989. № 3. С. 101-103.
4. **Корюкин А.В.** Защитно-декоративные силикатные покрытия // *ЛКМ и их применение*. 1990. № 1. С. 34-38.
5. **Соков В.Н., Баженова С.И., Петров М.А., Пепеляева А.Ю.** Фасадная негорючая краска на основе калиевого жидкого стекла: особенности состава // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2019. № 1. С. 33-37
6. Пат. 2043375 РФ. С 09 D 1/02, С 04 В 41/45. Силикатная краска / **Гизатуллина М.Ю., Васильев В.В., Яценко О.Е.** Заявл. 23.11.1992. Оpubл. 10.09.1995.
7. **Климанова Е.А., Барцевский Ю.А., Жилкин И.Я.** *Силикатные краски*. М.: Стройиздат, 1968. 86 с.
8. **Разговоров П.Б., Игнатов В.А., Койфман З.Ц., Терская И.Н.** Исследование механизма модификации жидких стекол мочевиной // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 1993. Т. 36. Вып. 1. С. 68-70.
9. **Шинкарева Е.В.** Однокомпонентная силикатная краска на основе жидкого калиевого стекла производства ОАО «Домановский ПТК». *ЛКМ и их применение*. 2013. № 6. С. 28-33.
10. Пат. 2007430 РФ. С 09 D 1/04. Силикатная краска / **Матвеев Л.Г., Лазарева В.В., Шкуро В.Г., Федотов А.И.** Заявл. 05.08.1991. Оpubл. 15.02.1994.
11. Пат. 2272820 РФ. С 09 D 1/02. Краска силикатная / **Гуляев А.А., Непомилуев А.М., Земляной К.Г.** Заявл. 06.08.2004. Оpubл. 27.03.2006.

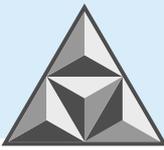
Поступила в редакцию 02.05.2024

Одобрена после рецензирования 31.05.2024

Принята к опубликованию 06.06.2024

## REFERENCES

1. **Razgovorov, P.B., Ignatyev, A.A., Abramov, M.A. & Nagornov, R.S.** (2020) Processing of raw aluminosilicates and subway construction dumps into composite sorbents for purification of water and oil-containing media. *Umnye kompozity v stroitel'stve [Smart Composite in Construction]*, 1(1), pp. 10-26. Available at: <https://ystu.editorum.ru/ru/nauka/issue/5023/view> (accessed 20.03.2024).
2. **Razgovorov, P.B.** (2008) *Scientific bases of creation of composite materials from technical and natural silicates*. PhD. Ivanovo State Chemical and Technological University. Ivanovo (in Russian).
3. **Lendova, N.A., Korobovtseva, T.A. & Pogrebitskaya, G.V.** (1989) Paints on the basis of liquid glass, *LKM i ikh primeneniye [Paint and varnish materials and their application]*, (3), pp. 101-103 (in Russian).
4. **Koryukin, A.V.** Protective and decorative silicate coatings (1990) *LKM i ikh primeneniye [Paint and varnish materials and their application]*, (1), pp. 34-38 (in Russian).



5. **Sokov, V.N., Bazhenova, S.I., Petrov, M.A. & Pepelyaeva, A.Yu.** (2019) Facade non-combustible paint on the basis of potassium liquid glass: features of the composition, *Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova [Bulletin of V.G. Shukhov BGTU]*, (1), pp. 33-37 (in Russian).
6. **Gizatullina, M.Yu., Vasiliev, V.V. & Yatsenko, O.E.** Silicate paint [Silikatnaya kraska] Pat. 2043375 Russia. 1995.
7. **Klimanova, E.A., Barshchevsky, Yu.A. & Zhilkin, I.Ya.** (1968) *Silikatnye kraski [Silicate paints]*. Stroyizdat, Moscow (in Russian).
8. **Razgovorov, P.B., Ignatov, V.A., Koifman, Z.Ts. & Terskaya, I.N.** (1993) Study of the mechanism of modification of liquid glasses by urea, *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khimi. Kkhim. Tekhnol. [ChemChemTech]*, 36(1), pp. 68-70 (in Russian).
9. **Shinkareva, E.V.** (2013). "One-component silicate paint on the basis of liquid potassium glass produced by OAO "Domanovsky PTC", *LKM i ikh primeneniye [Paint and varnish materials and their application]*, (6), pp. 28-33 (in Russian).
10. **Matveev, L.G., Lazareva, V.V., Shkuro, V.G. & Fedotov, A.I.** Silicate paint [Silikatnaya kraska]. Pat. 2007430 Russia. 1994.
11. **Gulyaev, A.A., Nepomiluev, A.M. & Zemlyanoy, K.G.** Silicate paint [Silikatnaya kraska]. Pat. 2272820 Russia. 2006.

*Received 02.05.2024*

*Approved after reviewing 31.05.2024*

*Accepted 06.06.2024*



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.168

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-51-61

# Модифицирующая добавка для повышения качества асфальтобетона

**С.Д. Тимрот, С.З. кзы Калаева\*, Н.Л. Маркелова, Р.Э. Калаев**

**Сергей Дмитриевич Тимрот, Сахиба Зияддин кзы Калаева, Надежда Леонидовна Маркелова,  
Рамиль Эйвазович Калаев**

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация  
*timrotsd@ystu.ru, kalaevasz@ystu.ru\*, markelovanl@ystu.ru, ram0299@mail.ru*



*Получена модифицирующая добавка на основе отхода – осадка обезжелезивания сточных подземных вод пос. Некрасовское Ярославской области. Установлено, что преобладающими компонентами данного отхода являются трех- и двухвалентное коллоидное железо в соотношении 3:1. На основе изучения физико-химических свойств отхода предлагается использовать его в качестве модификатора асфальтобетонной смеси с целью повышения адгезии битума к минеральным компонентам. Проведены исследования смеси различных марок и подобраны оптимальные условия использования осадка обезжелезивания в технологическом процессе производства асфальтобетона. Установлено, что применение модифицирующей добавки позволяет повысить сдвигоустойчивость и водостойкость асфальтобетона.*

**Ключевые слова:** асфальтобетонные смеси, качество асфальтобетона, адгезионная добавка, осадок обезжелезивания, водостойкость, сдвигоустойчивость

**Для цитирования:**

Тимрот С.Д., Калаева С.З. кзы, Маркелова Н.Л., Калаев Р.Э. Модифицирующая добавка для повышения качества асфальтобетона // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 2. С. 51-61. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5160/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-51-61



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-51-61

# A modifying additive for asphalt concrete quality improvement

**S.D. Timrot, S.Z. kzy Kalaeva\*, N.L. Markelova, R.E. Kalaev**

**Sergey D. Timrot, Sakhiba Z. kzy Kalaeva, Nadezhda L. Markelova, Ramil E. Kalaev**

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

*timrotsd@ystu.ru, kalaevasz@ystu.ru\*, markelovanl@ystu.ru, ram0299@mail.ru*



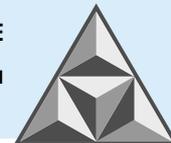
*The paper describes the production of modifying additive on the basis of waste - deferrization sludge of waste groundwater of Nekrasovskoye settlement, Yaroslavl region. The authors found that the predominant components of this waste are trivalent and divalent colloidal iron in the ratio of 3:1. The authors propose to use this waste as a modifier of asphalt concrete mixture to increase the adhesion of bitumen to mineral components based on the study of its physical and chemical properties. The authors have conducted studies of mixes of various grades and selected optimal conditions for the use of deferrization sludge in the technological process of asphalt concrete production. The use of modifying additive allows to increase shear stability and water holding capacity of asphalt concrete.*

**Keywords:** asphalt concrete mixtures, asphalt concrete quality, adhesion additive, deferrization sludge, water resistance, shear stability

**For citation:**

Timrot, S.D., Kalaeva, S.Z. kzy, Markelova, N.L. & Kalaev, R.E. (2024) A modifying additive for asphalt concrete quality improvement, *Smart Composite in Construction*, 5(2), pp. 51-61.  
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5160/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-51-61



## ВВЕДЕНИЕ

Важным фактором влияния на потребительские свойства асфальтобетонных смесей является адгезия вяжущего к минеральным компонентам. Так, с начала XXI столетия и по настоящее время в индустрии материалов для транспортного строительства (МТС) стали широко применяться адгезионные присадки и модифицирующие добавки различного состава [1-3], которые могут быть введены в разогретый битум. Однако эти присадки и добавки имеют недостатки, а именно:

– при нагревании битума до 150-180°C происходит термическая деструкция большинства применяемых присадок и модифицирующих добавок; в результате эффективность их действия и качество МТС существенно снижается;

– стоимость присадок и модифицирующих добавок достаточно высока.

Нами в качестве модифицирующей добавки – присадки-активатора адгезии МТС используется осадок, получаемый в процессе обезжелезивания воды и вводимый дополнительно к минеральным компонентам асфальтобетона.

Подземные и поверхностные воды являются важным источником питьевой воды; при этом доля подземных вод в системе водоснабжения нашей страны составляет  $\approx 46\%$  [4].

На сегодняшний день проблема выделения и переработки железа из подземных и поверхностных вод стоит особенно остро. Во многом это объясняется тем, что в России значительная доля подземных ресурсов (и в том числе – вод) характеризуется высоким уровнем железа, и это негативно сказывается на их использовании для хозяйственных нужд. [5]. Ряд требований эстетического (цветность; следы на белье и посуде, кухонном и санитарном оборудовании), технического (коррозия и забивание трубопроводов), экономического (вывод из строя бытовых умягчительных систем) и органолептического (привкус) характера, а также проблемы, возникающие в пищевой, текстильной, целлюлозно-бумажной, химической и других отраслях промышленности, загрязнение продукции и материалов промышленного применения [6, 7] приводят к технической необходимости очистки воды от соединений железа. Хотя, как известно, железо является элементом, необходимым для полноценного питания человека, и обеспечивает поддержку оптимального уровня гемоглобина в крови, его поступление в повышенных количествах в организм может нанести здоровью значительный вред. Кроме того, не стоит забывать, что именно избыток соединений железа способствует так называемому «зарастанию» водопроводных сетей и водоразборной арматуры.

Способ очистки воды от таких примесей зависит от формы железа, содержащегося в воде [8, 9].

Так, типовая технологическая схема обезжелезивания питьевой воды включает две основные стадии [10]:

1) насыщение воды кислородом, приводящее к окислению гидрокарбоната железа  $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$  до  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ;

2) выделение гидроксида железа (III) на насыпных фильтрах.

Для химического процесса обезжелезивания воды характерна реакция:



Предметом настоящего исследования является осадок станции обезжелезивания питьевой воды, расположенной в пос. Некрасовское (Ярославская обл.), и образцы асфальтобетона, полученные с введением в него такой модифицирующей добавки. Внесение вклада в разработку технологии утилизации осадка обезжелезивания воды с получением



качественного МТС является актуальной задачей, решение которой касается одновременно развития транспортного строительства и важной проблемой ресурсосбережения.

Цель работы – поиск эффективного пути повышения адгезии битума к минеральной части асфальтобетона и, соответственно, повышение качества асфальтобетонных материалов, применяемых в современном дорожном строительстве.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Плотность и влажность, а также химический состав осадка станции обезжелезивания питьевой воды пос. Некрасовское (Ярославская обл.) определены нами экспериментально (табл. 1).

**Таблица 1.** Состав осадка станции обезжелезивания питьевой воды пос. Некрасовское (Ярославская обл.)

**Table 1.** Precipitation composition of the drinking water deferrization station in Nekrasovskoye settlement (Yaroslavl region)

Показатель	Значение
Плотность, г·см <sup>-3</sup>	1.17–1.26
Влажность, % масс.	90.0–91.0
Нерастворимые в HCl вещества, мас%	2.9–6.7
Содержание Fe <sub>общ</sub> (в пересчете на Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ), мас%.	83.1–85.0
Соотношение Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :FeO	3:1
Содержание Si (в пересчете на SiO <sub>2</sub> ), мас%	2.3–5.4
Содержание Al (в пересчете на Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), мас%	0.6–1.3
Содержание Ca (в пересчете на CaO), мас%	2.6–4.8
Содержание Mg (в пересчете на MgO), мас%	1.8–4.9
Содержание Zn, Cu, Pb, мас%	Не обнаружены

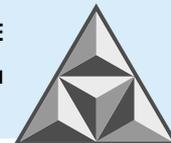
Как видно из табл. 1, отход станции обезжелезивания подземных вод обводнен, плотность осадка находится в пределах 1.17–1.26 г·см<sup>-3</sup>. Преобладающим компонентом отхода является коллоидное железо (II, III). Соотношение соединений железа (III) и железа (II) составляет 3:1. В небольших количествах в осадке содержатся кремний, магний, кальций и алюминий; цинк, медь и свинец не обнаружены.

После изучения состава осадка обезжелезивания воды предложено использовать его как модифицирующую добавку в асфальтобетонные смеси с целью повышения адгезии минеральных компонентов к битуму. Отсутствие хорошей адгезии битума к поверхности минеральных материалов, особенно кислых пород, приводит к преждевременному разрушению асфальтобетона и качества дорожного покрытия.

Для оценки эффективности использования предлагаемой модифицирующей добавки – суспензии гидроксида железа, получаемой в процессе обезжелезивания воды, на первом этапе использовали методику в соответствии с ГОСТ 12801-98.

Гранитный щебень (кислая порода) обрабатывали суспензией, включающей осадок обезжелезивания питьевой воды. Качество сцепления оценивали визуально (рис. 2). Были испытаны различные варианты обработки исходного щебня (рис. 2, а); щебень обрабатывали модифицирующей добавкой как в просушенном виде (рис. 2, б), так и взятой до сушки (рис. 2, в).

На втором этапе с целью подбора условий использования осадка обезжелезивания воды в технологическом процессе производства асфальтобетона проведено исследование качества дорожной смеси различных марок. На основе сделанного выбора применяли состав горячей асфальтобетонной смеси типа Б марки 1 (мелкозернистой) (см. табл. 2).

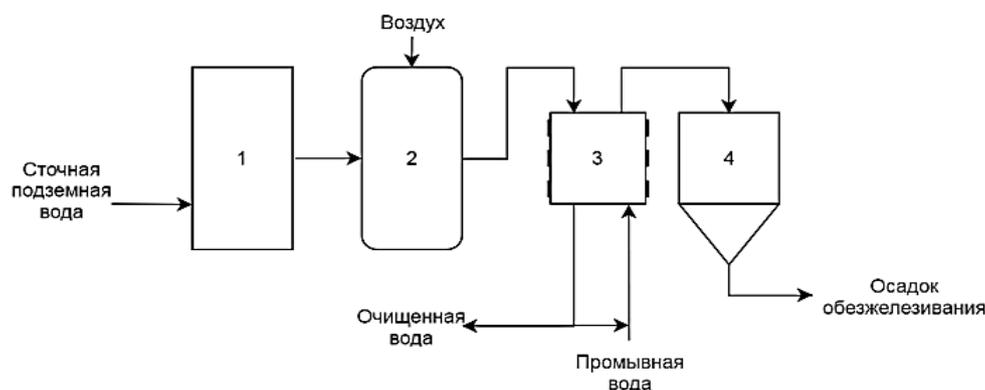
**Таблица 2.** Состав горячей асфальтобетонной смеси типа Б марки 1**Table 2.** Type B grade 1 hot asphalt concrete mix composition

№ п/п	Материал	Состав минеральной части асфальтобетона, % (битум сверх 100%)
1	Щебень фр.5-20, М1200	42.0
2	Песок из отсевов дробления, фр.0-5, М1200	55.0
4	Минеральный неактивированный порошок	3.0
5	Битум БНД 60/90	5.0

Как видно из табл. 2, значительную часть (55%) в таком составе занимает дробленый песок, фракция 0-5, М1200; дополнительно в небольшом количестве присутствует неактивированный минеральный порошок (3%).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлена блок-схема обезжелезивания воды в пос. Некрасовское (Ярославская обл.).

**Рис. 1.** Схема нейтрализации и обезжелезивания воды: 1 – водозаборное сооружение;

2 – камера аэрации, эжектор; 3 – насыпной фильтр; 4 – отстойник

**Fig. 1.** Water neutralisation and deferrization scheme: 1 – water collection facility;

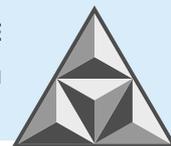
2 – aeration chamber, ejector; 3 – bulk filter; 4 – settling tank

Подземная вода поступает в водозаборное сооружение 1, затем она попадает в камеру аэрирования 2, где происходит ее насыщение кислородом. Вода, содержащая гидроксид железа (III), очищается в насыпном фильтре 3 и подается потребителю. Промывка фильтра осуществляется обратным потоком воды.

В ходе очистки на станциях водоподготовки при промывке фильтров возникают большие объемы промывных вод, которые поступают в отстойник 4 и представляют собой суспензию железосодержащего осадка, выделенного в ходе технологического процесса. Отметим, что данный железосодержащий осадок является источником загрязнения окружающей среды. Поэтому по мере накопления на дне отстойника 4 осадок необходимо систематически удалять и утилизировать. В данном случае осадок наносится на минеральные компоненты, входящие в состав асфальтобетонной смеси.

Изначально качество сцепления битума в отсутствие модифицирующей добавки – осадка обезжелезивания, удаленного из отстойника 4, визуально (см. рис. 2, а) оценивается в 2 балла.

Как видно из рис. 2, в, лучший эффект достигается на образце, обработанном добавкой до сушки; при этом качество сцепления составляет по стандарту 5 баллов. При обработке добавкой до сушки (рис. 2, б) качество сцепления составило 3 балла, а необработанный образец (рис. 2, а) имеет низкое качество сцепления.



а) Щебень без добавки  
a) Crushed stone without additive



б) Щебень, обработанный  
добавкой после сушки  
b) Crushed stone treated with additive  
after drying



в) Щебень, обработанный  
добавкой до сушки  
c) Crushed stone treated with additive  
before drying

Рис. 2. Варианты обработки щебня модифицирующей добавкой

Fig. 2. Crushed stone treatment options with modifying additive

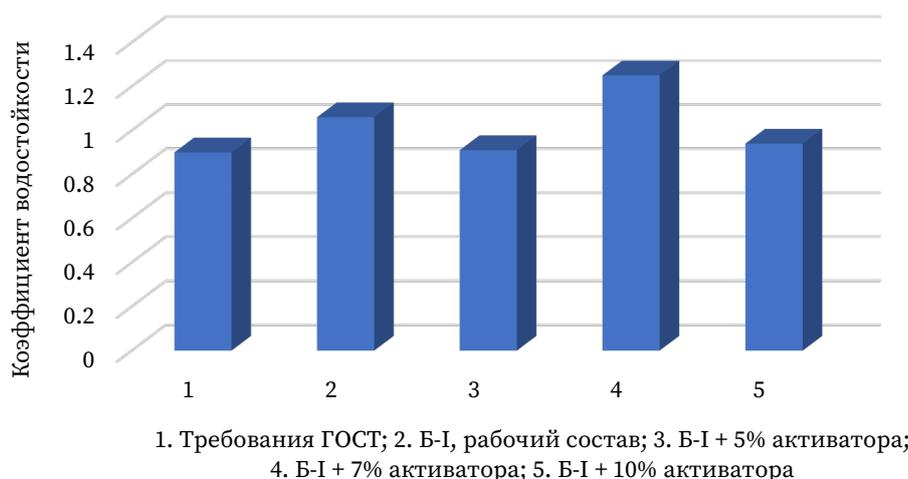
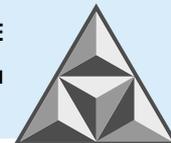
Данная зависимость может объясняться тем, что при нанесении добавки на горячий щебень нарушается равномерность покрытия из-за быстрого испарения воды. В этой связи рекомендуется наносить добавку-модификатор на холодные материалы.

Результаты испытаний рабочих составов асфальтобетона в отсутствие модифицирующей добавки – активатора и с различной дозировкой осадка обезжелезивания воды представлены в табл. 3 и на рис. 3, 4.

Таблица 3. Результаты испытаний асфальтобетонных смесей типа В марки 1 в присутствии модифицирующей добавки

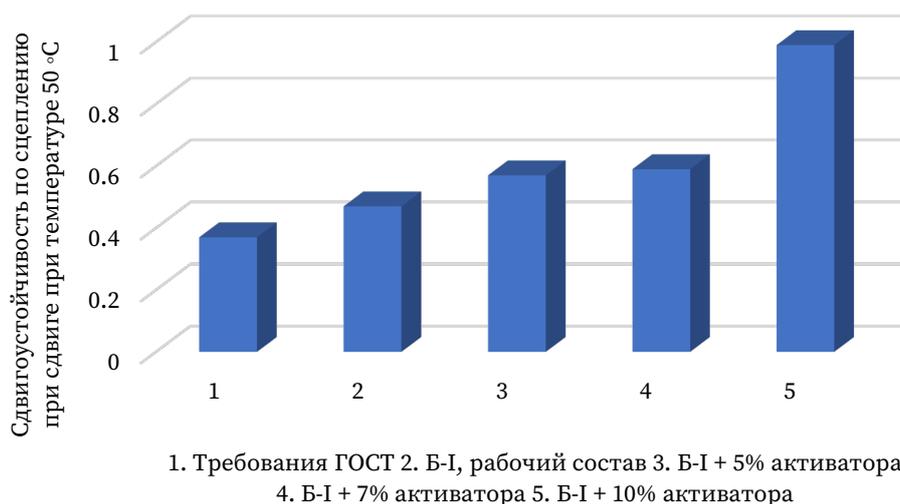
Table 3. Test results of type B grade 1 asphalt concrete mixtures in the presence of modifying additive

№ п/п	Наименование показателя	Ед. измер.	Требования ГОСТ 9128-2013	Б-1, рабочий состав	Б-1+5% добавки	Б-1+7% добавки	Б-1+10% добавки
1	Плотность	г·см <sup>-3</sup>	–	2.54	2.54	2.53	2.52
2	Водонасыщение	%	1.5 – 4.0	2.4	2.2	2.5	<b>3.4</b>
3	Предел прочности при сжатии и температуре 0°C	МПа	Не более 11.0	9.9	10.0	8.8	<b>12.5</b>
4	Предел прочности при сжатии и температуре 20°C	МПа	Не менее 2.5	4.7	4.2	4.1	6.7
5	Предел прочности при сжатии и температуре 50°C	МПа	Не менее 1.2	2.5	2.0	1.6	3.7
6	Предел прочности при сжатии и температуре 20°C (водонасыщенные образцы)	МПа	–	5.0	4.6	5.0	6.3
7	Водостойкость	–	Не менее 0.90	1.06	0,91	<b>1.25</b>	0.94
8	Водостойкость при длительном водонасыщении	–	Не менее 0.85	0.86	–	<b>1.21</b>	–
9	Трещиностойкость по пределу прочности на растяжение при расколе при температуре 0°C и скорости деформирования 50 мм·мин <sup>-1</sup>	МПа	3.5-6.0	4.1	3.8	4.2	5.1
10	Сдвигоустойчивость: – по коэффициенту внутреннего трения	–	Не менее 0.81	0.91	0.89	0.91	0.87
	– по сцеплению при сдвиге и температуре 50°C	МПа	Не менее 0.37	0.47	0.57	<b>0.59</b>	<b>0.99</b>
11	Сцепление вяжущего с минеральной частью смеси	–	Не менее ¾ поверхности остается покрытой пленкой вяжущего	Выдерживают все составы, при этом:			
				2 место	1 место		
12	Сцепление битумного вяжущего со щебнем	баллы	2-5	3	5	<b>5</b>	5



**Рис. 3.** Зависимость водостойкости асфальтобетона от дозировки добавки-модификатора

**Fig. 3.** Dependence of asphalt concrete water resistance on the dosage of modifier additive



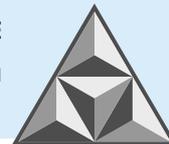
**Рис. 4.** Зависимость сдвигоустойчивости асфальтобетона по сцеплению при сдвиге от дозировки добавки; температура среды 50°C

**Fig. 4.** Shear bond resistance of asphalt concrete as a function of additive dosage; ambient temperature 50°C

Экспериментально доказано, что введение модифицирующей добавки оказывает наибольшее влияние на показатели водостойкости и сдвигоустойчивости асфальтобетона при длительном насыщении. Указанные характеристики образцов значительно улучшаются. Этот факт можно объяснить повышением адгезии битума к минеральным компонентам асфальтобетона.

Поскольку качественные характеристики асфальтобетонной смеси зависят от множества физико-химических факторов (температура и давление при получении композиционного строительного материала, дисперсность компонентов и др.), на сегодняшний день логическое объяснение получила только часть результатов, связанных с включением в состав МТС указанной модифицирующей добавки.

При этом анализ рис. 3, 4 выявил, что высокие дозировки модифицирующей добавки ( $\geq 10\%$ ), с учетом показателя прочности, являются нежелательными. Рекомендуемое количество осадка обезжелезивания питьевой воды пос. Некрасовское (Ярославская обл.) в составе МТС находится на уровне 7 мас%.



В работе предлагается также техническое новшество [11], обеспечивающее повышение качества асфальтобетонных покрытий. Так, в известной схеме (см. рис. 1) целесообразно использовать емкость, снабженную распределительной гребенкой и позволяющую проводить обработку модифицирующей добавкой минеральных материалов в холодном состоянии.

## ВЫВОДЫ

1. Показана возможность использования отхода обезжелезивания питьевой воды пос. Некрасовское (Ярославская обл.) в качестве модифицирующей добавки-активатора в материалы для транспортного строительства, в частности, для улучшения адгезии битума к минеральной части асфальтобетона.

2. Выявлено, что введение 7 мас% модифицирующей добавки к минеральным компонентам в холодном состоянии способствует увеличению водостойкости и сдвигоустойчивости асфальтобетона, при этом качество сцепления компонентов МТС составляет 5 баллов.

Небольшие трансформации традиционной схемы производства асфальтобетона позволяют реализовать данный процесс на практике.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Котов С.В., Тимофеева Г.В., Леванова С.В. и др.** Дорожные битумы с модифицирующими добавками // *Химия и технология топлив и масел*. 2003. № 3. С. 52-53.
2. **Razgovorov P., Ignatyev A., Gotovtsev V., Vlasova E.** Using Granulate Composites with Calcined Phosphogypsum and PET Additive in Asphalt: *Mat. Sci. Forum*. 2021. Vol. 1049. P. 257-265.
3. **Игнатъев А.А., Разговоров П.Б., Готовцев В.М.** Структурообразование и потребительские свойства гранулированных асфальтобетонных смесей с включением фосфогипса и вторичного полиэтилентерефталата // *Строительство и реконструкция*. 2023. № 1 (105). С. 123-132.
4. Использование подземных вод [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/215.html> (дата обращения 22.03.2023);
5. **Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М.** Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: Наука, 2004. 676 с.
6. **Золотова Е.Ф., Асс Г.Ю.** Очистка воды от железа, фтора, марганца и сероводорода. М.: Стройиздат, 1975. 176 с.
7. Химическая энциклопедия: в 5 т.: Т. 1. М.: Сов. энциклопедия, 1988. 623 с.
8. СНиП 2.04.02-84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. М.: Стройиздат, 1986. С изм. № 1 (утв. Приказом Минрегиона России от 29.12.2011 № 635/14) (ред. от 30.12.2015).
9. **Головин В.Л.** Проблемы очистки подземных вод от устойчивых форм железа // *Мелиорация и водное хозяйство*. 2003. № 6. С. 39-41.
10. **Янин Е.П.** Осадок железосодержащих подземных питьевых вод (образование, особенности, проблемы утилизации) // *Научные и технические аспекты охраны окружающей среды*. 2008. № 4. С. 26-57.
11. Пат. 2732176 РФ. Способ приготовления асфальтобетонной смеси / **Тимрот С.Д., Ежов А.А., Задворнов И.М., Лаврентьева М.В., Заварин О.Е.** Заявл. 21.05.2019. Оpubл. 14.09.2020. Бюл. № 26.

Поступила в редакцию 15.02.2024

Одобрена после рецензирования 17.05.2024

Принята к опубликованию 10.06.2024



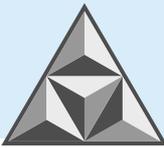
## REFERENCES

1. **Kotov, S.V., Timofeeva, G.V. & Levanova, S.V. et al.** (2003) "Road bitumens with modifying additives", *Chemistry and technology of fuels and oils [Khimiya i tekhnologiya topliv i masel]*, (3), pp. 52-53 (in Russian).
2. **Razgovorov, P., Ignatyev, A. & Gotovtsev, V. & Vlasova, E.** (2021) Using Granulate Composites with Calcined Phosphogypsum and PET Additive in Asphaltting, *Mat. Sci. Forum*, (1049), pp. 257-265.
3. **Ignatyev, A.A., Razgovorov, P.B. & Gotovtsev, V.M.** (2023) "Structure Formation and Consumer Properties of Granular Asphalt-Concrete Mixtures with Phosphogypsum Inclusion and Secondary Polyethylene Terephthalate", *Building and Reconstruction [Stroitel'stvo i rekonstruksiya]*, 1(105), pp. 123-132 (in Russian).
4. The use of groundwater. Available at: <https://nationalatlas.ru/tom2/215.html> (accessed 22.03.2013) (in Russian).
5. **Krainov, S.R., Ryzhenko, B.N. & Shvets, V.M.** (2004) *Geochemistry of groundwater. Theoretical, applied and environmental aspects*. M.: Nauka (in Russian).
6. **Zolotova, E.F. & Ass, G.Yu.** (1975) *Purification of water from iron, fluorine, manganese and hydrogen sulfide*. M.: Stroyizdat (in Russian).
7. Chemical encyclopedia: In 5 volumes: vol. 1. M.: Soviet Encyclopedia, 1988 (in Russian).
8. SNiP 2.04.02-84. Water supply. Outdoor networks and structures. M.: Stroyizdat, 1986. With amendment no. 1 (approved by the Order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation dated 12/29/2011 No. 635/14) (ed. on 30.12.2015) (in Russian).
9. **Golovin, V.L.** (2003) Problems of groundwater purification from stable forms of iron, *Melioration and water management [Melioratsiya i vodnoe khozyajstvo]*, (6), pp. 39-41(in Russian).
10. **Yanin, E.P.** (2008) Sediment of iron-containing underground drinking waters (formation, features, problems of utilization), *Scientific and technical aspects of environmental protection – Working Environment*, (4), pp. 26-57 (in Russian).
11. **Timrot, S.D., Yezhov, A.A., Zadvornov, I.M., Lavrentieva, M.V. & Zavarin, O.E.** Method of preparation of asphalt concrete mixture. Pat. 2732176 Russia. 2020.

Received 15.02.2024

Approved after reviewing 17.05.2024

Accepted 10.06.2024



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.7./8

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-62-75

# Особенности строительного контроля компонентов и конструкции полимерных зон деформационных швов мостовых сооружений

**В.И. Мартинсон<sup>1</sup>, Ш.Н. Валиев<sup>2</sup>, А.В. Кочетков<sup>1,\*</sup>**

**<sup>1</sup>Владимир Леонидович Мартинсон, Андрей Викторович Кочетков**

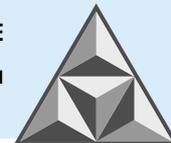
ФАУ «РОСДОРНИИ», Москва, Российская Федерация

*89166914669@mail.ru, soni.81@mail.ru\**

**<sup>2</sup>Шерали Назаралиевич Валиев**

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва,  
Российская Федерация

*vshn2014@gmail.com*



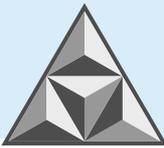
*Авторское обследование переходных зон деформационных швов эксплуатируемых мостовых сооружений, устроенных с применением полимербетона, выявило отсутствие нормативных требований на уровне документов национальной системы стандартизации. Подтверждена возможность идентификации состава вяжущего при организации строительного контроля поставляемой продукции требованиям проектной документации, а также определения продуктов химической реакции при твердении полимербетона в переходной зоне деформационных швов мостовых сооружений. Для получения полимербетонной смеси использована жидкая эпоксидная смола низкой вязкости на основе бисфенола с включением отвердителя аминного типа. После смешивания компонентов получается состав, который отверждается и связывается с минеральным заполнителем, обеспечивая изделию высокую прочность, водонепроницаемость, износостойкость и хорошую адгезию к различным основаниям. Полученный материал для мостовых сооружений безопасен для окружающей среды, не вступает в реакцию с различными агентами. Метод инфракрасной спектроскопии позволяет идентифицировать исходные вещества и продукты реакции с вероятностью совпадения 70-97%.*

**Ключевые слова:** мостовые сооружения, полимерные зоны, деформационные швы, контроль качества, инфракрасная спектроскопия, идентификация

**Для цитирования:**

Мартинсон В.И., Валиев Ш.Н., Кочетков А.В. Особенности строительного контроля компонентов и конструкции полимерных зон деформационных швов мостовых сооружений // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 2. С. 62-75.  
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5160/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-62-75



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-62-75

# Construction control of components and design of polymer zones of bridge expansion joints

**V.I. Martinson<sup>1</sup>, Sh.N. Valiev<sup>2</sup>, A.V. Kochetkov<sup>1,\*</sup>**

**<sup>1</sup>Vladimir L. Martinson, Andrey V. Kochetkov**

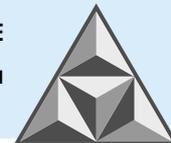
Russian Road Research Institute "ROSDORNII", Moscow, Russia

*89166914669@mail.ru, soni.81@mail.ru\**

**<sup>2</sup>Sherali N. Valiev**

Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University, Moscow, Russia

*vshn2014@gmail.com*



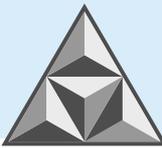
*The article considers the construction control peculiarities of components and design of transition polymer zones of bridge structures expansion joints. The authors have examined the transition zones of expansion joints of in-use bridge structures constructed with polymer concrete. The study revealed the lack of regulatory requirements at the national standardization system documents level. The authors confirmed the possibility of binder composition identification at the organisation of construction control of supplied products in accordance with the requirements of design documentation. The authors also confirmed the possibility of determining the products of chemical reaction during curing of polymer concrete in the transition zone of bridge expansion joints. The authors used a low viscosity liquid epoxy resin based on bisphenol with the inclusion of an amine-type hardener to produce a polymer-concrete mixture. When the components are mixed, a composition is obtained that cures and, when bound to mineral aggregate, provides the product with high strength, water resistance, wear resistance and good adhesion to various substrates. The material obtained for bridge constructions is safe for the environment and does not react with various agents. The method of infrared spectroscopy allows identifying the initial substances and reaction products with the probability of coincidence from 70 to 97%.*

**Keywords:** bridge structures, polymer zones, expansion joints, quality control, infrared spectroscopy, identification

**For citation:**

Martinson, V.I., Valiev, Sh.N. & Kochetkov, A.V. (2024) Construction control of components and design of polymer zones of bridge expansion joints, *Smart Composite in Construction*, 5(2), pp. 62-75.  
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5160/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-62-75



## ВВЕДЕНИЕ

С целью повышения эксплуатационных свойств деформационных швов, связанных с повышением ровности проезжей части в пришовной зоне, повышения надежности мостового полотна и снижения уровня общих строительных издержек устраивают переходные зоны [1-4]. В настоящей работе рассматриваются особенности строительного контроля компонентов в конструкции переходных зон из полимербетона [5-8].

Основное назначение переходной зоны – обеспечение плавного изменения жесткости дорожной одежды при переходе с покрытия на подходах ко шву на конструкции деформационного шва [9-11]. В качестве материала переходной зоны используют полимербетон на основе реакционно-способных смол холодного отверждения с минеральным заполнителем. При этом ровность покрытия в зоне примыкания к конструкциям деформационного шва достигается применением литых смесей.

Основные физико-механические показатели полимербетона переходной зоны (прочность и др.) превышают аналогичные показатели асфальтобетонов более чем в 10 раз [8].

Согласно ОДМ 218.2.002-2009 «Методические рекомендации по применению современных материалов в сопряжении дорожной одежды с деформационными швами мостовых сооружений», при движении по одной полосе  $\geq 5$  тыс. автомобилей/сут. в примыкании покрытия к деформационному шву (металлу или бетону) следует устраивать переходной участок шириной 30-50 см по всей длине шва. При этом верхний слой покрытия выполняют из более прочного материала – полимерасфальтобетона или мастично-щебеночной смеси.

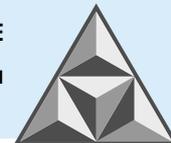
Анализ зарубежных источников [11-17] отражает достигнутый научно-технический уровень строительного контроля. В частности, требования к материалу переходных зон определены зарубежными нормами – европейским стандартом ETAG 032 «Руководство по разработке технических свидетельств на деформационные швы для автодорожных мостов. Части 1-8», британским стандартом DMRB V.2 S.3 P.6 BD 33/94 «Руководство по проектированию для дорог и мостов. Том 2. Секция 3. Часть 6. BD 33/94. Деформационные швы для автодорожных мостов», австрийским стандартом RVS/RVE 15.04.51 «Мосты. Конструкции для мостов. Деформационные швы».

Однако обследование переходных зон деформационных швов мостовых сооружений, устроенных с применением полимербетона, выявило отсутствие нормативных требований на уровне документов национальной системы стандартизации. Устройство зон с нарушениями требований безопасности дорожного движения не позволяет, в частности, обеспечить малозумный проезд транспортных средств. На рис. 1 показано, что гладкая поверхность не обладает текстурой макрошероховатости; также выявлена неодинаковая глубина колеи на переходной зоне полос наката.



**Рис. 1.** Повреждения переходных зон деформационных швов эксплуатируемых мостовых сооружений

**Fig. 1.** Damage to transition zones of expansion joints of in-use bridge structures



Результаты обследования подтвердили недостаточную адгезию материала переходных швов и ездового полотна мостового сооружения, а также неоднородность принимаемых технических решений по содержанию и ремонту переходных зон и сопряжений их с другими элементами сооружения.

По своей структуре материал переходных зон принципиально отличается от асфальтобетона. В нем отсутствуют поры, он не требует уплотнения и формирования каркаса укаткой, характеризуется холодным режимом отверждения реакционной двухкомпонентной смеси (для асфальтобетона используют «горячую» технологию). Говоря о полимербетонах, мы подразумеваем, прежде всего, наличие переходных зон с использованием химически синтезированных веществ с воспроизводимыми химическими, физическими и механическими показателями. Проверка соответствия показателей на месте производства работ представляется избыточной; достаточно идентификации компонентов и конструкции переходных зон деформационных швов мостовых сооружений.

На практике установлены случаи отклонения применяемых дорожных материалов по вине подрядных организаций или поставщиков. Это обусловлено требованиями заказчиков к материалам, указанным только в проектной документации. В свою очередь, добросовестное исполнение проекта производства работ по устройству переходных зон из полимерных материалов холодного отверждения исключает риски отклонения по показателям качества.

Следует отметить, что применение химически синтезированных вяжущих преследует цель снижения риска недостижения качественных характеристик конструктивных элементов мостовых сооружений, возникающего ввиду уменьшения влияния долевого разброса компонентов на соответствующие показатели.

Ранее [9] авторами установлено влияние разброса долей составляющих смесей противогололедных материалов на риск совершения дорожно-транспортных происшествий. В аналогичном ключе поставлена задача – установить влияние вариативности гранулометрического состава заполнителей на свойства полимербетона.

В таком виде цель работы и научная проблема сформулированы впервые.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Проведена отработка метода идентификации материалов и получаемых из них конструкций на примере материала марки ВЕТОFLEX® – двухкомпонентного бетона холодного отверждения, разработанного для анкеровки и создания переходных зон деформационных швов мостовых и надземных сооружений, подвергаемых транспортным нагрузкам. Материал воспринимает предельно допустимую нагрузку после отверждения в течение 12-24 ч. Поверхностный слой подходит для мостовых сооружений: он устойчив к износу и действию кислот, растворов солей, масел и бензина, хорошо сцепляется со сталью и бетоном, обладает пластично-эластичными свойствами в широком диапазоне температур при относительно малом коэффициенте упругости. По сравнению с эпоксидными смолами и цементом, материал менее хрупок, что позволяет при его использовании избежать поперечных трещин в пришовной зоне.

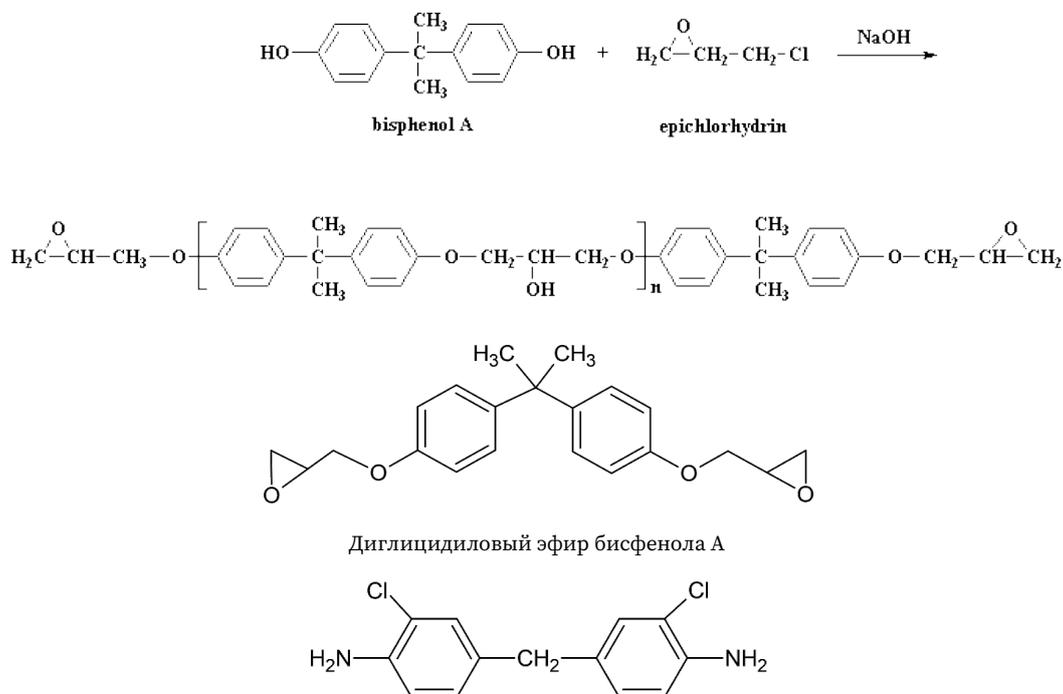
В СТО 41986898-02-2024 «Конструкция сопряжений дорожной одежды мостовых конструкций с деформационными швами с металлическими окаймлениями из полимербетона «Бетофлекс». Правила устройства» отражены требования к минеральным материалам и характеристикам вяжущего. Однако методы идентификации химического состава вяжущего не приводятся. В то же время их разработка необходима для решения задач нормирования и совершенствования методов контроля качества путем идентификации



компонентов в конструкции переходных полимерных зон деформационных швов мостовых сооружений.

На физико-химический анализ в аналитическую химическую лабораторию поступили (по данным заказчика) два компонента – эпихлоргидрин и бисфенол.

Формулы применяемых компонентов полимербетона:



Продукт взаимодействия солянокислого о-хлоранилина с формальдегидом – 3,3'-дихлор-4,4'-диаминодифенилметан (модифицированный отвердитель аминного типа)

Образец из полимербетона ВЕТОFLEX представлен ниже (см. рис. 2).

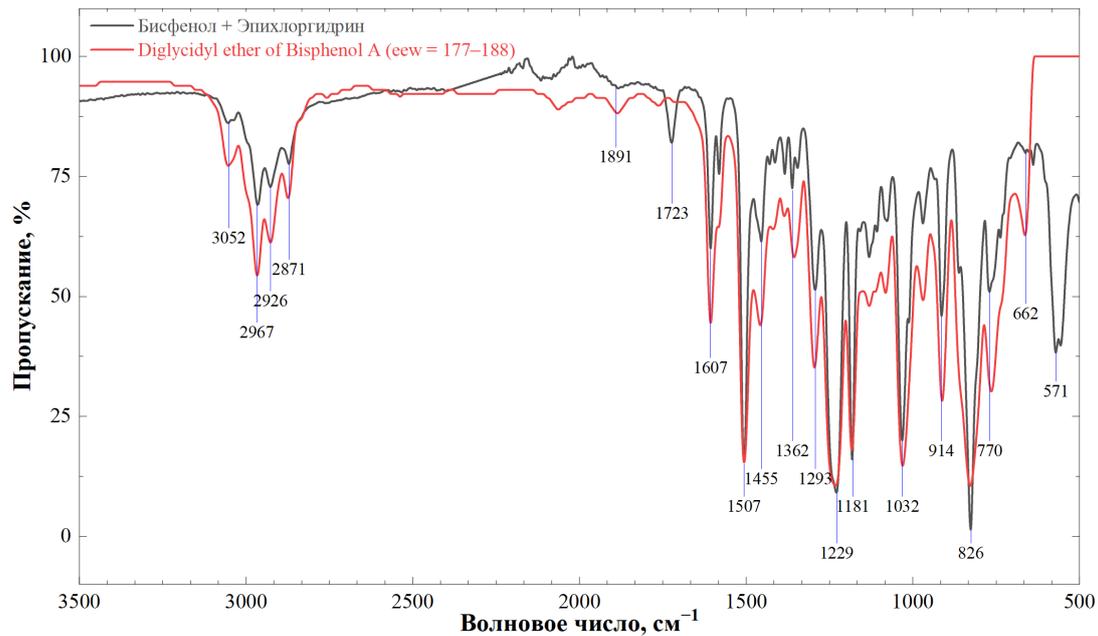


**Рис. 2.** Образец из полимербетона ВЕТОFLEX холодного отверждения  
**Fig. 2.** BETOFLEX cold-cured polymer concrete sample

Идентификацию соединений производили на ИК-Фурье спектрометре ФТ-801 (ООО НПФ «СИМЕКС», Россия) с использованием приставки нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Такой спектрометр предназначен для регистрации спектров поглощения твердых, жидких и газообразных веществ в ближней и средней инфракрасной области с последующей их идентификацией, а также качественного и количественного анализа смесей нескольких компонентов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследований получены спектры ИК-НПВО химических соединений № 1-3 (рис. 3-6, табл. 1-3).



**Рис. 3.** Инфракрасный спектр соединения № 1 (черный) в сравнении с библиотечным спектром диглицидилового эфира бисфенола А (красный). Вероятность совпадения – более 97%

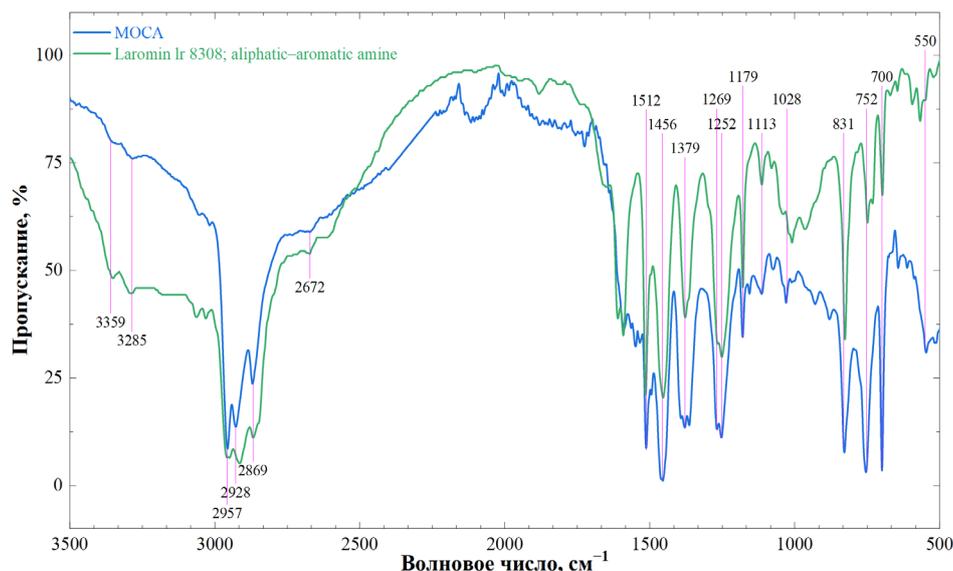
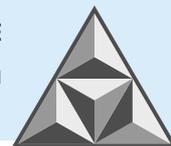
**Fig. 3.** Infrared spectrum of compound No. 1 (black) and comparison with the library spectrum of diglycidyl ether of bisphenol A (red). The match probability is over 97%

**Таблица 1.** Расшифровка полос пропускания соединения № 1

**Table 1.** Decoding of bandwidths of connection No. 1

Полоса, см <sup>-1</sup>	Структура	Тип колебаний, связь	Зависимые полосы, см <sup>-1</sup>
3052	RCH=CH <sub>2</sub>	Валентные, =C-H	914
3052	Ar-H	Валентные, Ar-H	826 → 770
2967	RCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	Валентные, C-H	2871 → 1455 → 1362
2871	RCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	Валентные, C-H	2967 → 1455 → 1362
2871	-CH <sub>3</sub>	Валентные, -CH <sub>3</sub>	2967
2871	RCO-OH	Димер OH	1723 → 1293
1723	RCHO	Валентные, C=O	н/д
1607	Ar	Валентные, C=C	н/д
1507	C-O	Асимм. валентные, C-O	1362
1455	RCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	Валентные, CH <sub>2</sub> и CH <sub>3</sub>	2967 → 2871 → 1362
1455	C-C в кольце	Валентные, C-C в кольце	3052 → 1067
1362	C-H	Маятниковое, C-H	1455
1293	RCO-OH	Валентные, C-O	2871 (OH-димер)
1229	Ar-O-R	Валентные, C-O	826 → 770
1229	CH <sub>2</sub> Cl	Веерн. внеплоскостн., -CH <sub>2</sub> Cl	1181 → 826 → 770
1181	CH <sub>2</sub> Cl	Веерн. внеплоскостн., -CH <sub>2</sub> Cl	1229 → 826 → 770
1032	RCO-OH	Валентные, C-O	2871 (OH-димер)
914	RCH=CH <sub>2</sub>	Внеплоскостн., =CH	3052
826	RCH=CH <sub>2</sub>	Внеплоскостн., =CH	3052
826	R-Cl	Валентные, C-Cl	1229 → 1181 → 770
770	R-Cl	Валентные, C-Cl	1229 → 1181 → 826
662	Полоса относится к тройной связи углерод - углерод, в данном случае возможно наличие примесных соединений в исследуемом образце		
571	Связь характерна для R - Br, но бромидов в рассматриваемом соединении нет; возможно наличие примесных соединений в исследуемом образце		

Примечание к табл. 1: Ar – ароматический углеводород, R – радикал; Асимм. валентные – асимметрические валентные колебания; Веерн. внеплоскостн. – веерные внеплоскостные деформационные колебания; Внеплоскостн. – внеплоскостные колебания; н/д – данные отсутствуют.



**Рис. 4.** Инфракрасный спектр соединения № 2 (синий) в сравнении с библиотечным спектром алифатического-ароматического амина (зеленый). Вероятность совпадения – более 92%

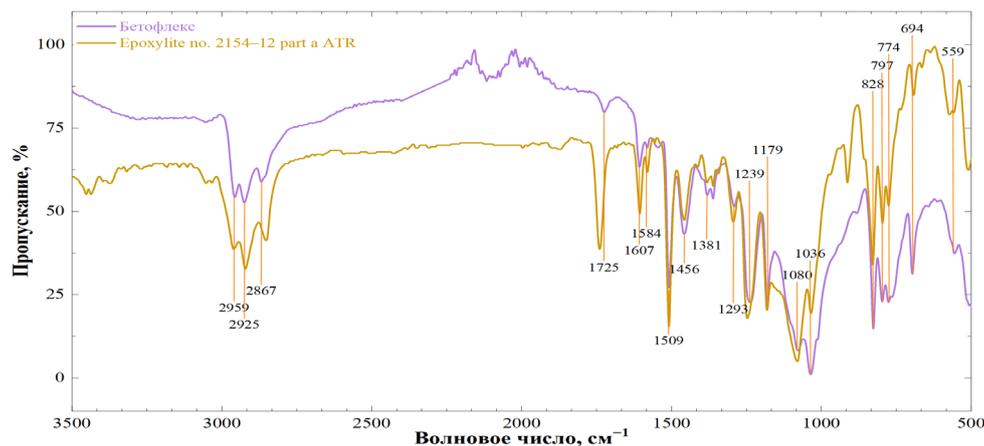
**Fig. 4.** Infrared spectrum of compound No. 2 (blue) and comparison with the library spectrum of an aliphatic-aromatic amine (green). The match probability is over 92%

**Таблица 2.** Расшифровка основных полос соединения № 2 в инфракрасном спектре

**Table 2.** Decoding of the main bands of compound No. 2 in the infrared spectrum

Полоса, см <sup>-1</sup>	Структура	Тип колебаний, связь	Зависимые полосы, см <sup>-1</sup>
3359	N-H	н/д	н/д
3285	N-H	н/д	н/д
2957	RCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	Валентные, CH	2869 → 1456 → 1379
2928	-CH <sub>2</sub> -	-CH <sub>2</sub> -	н/д
2869	RCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	Валентные, CH	2957 → 1456 → 1379
1600	C-C в кольце	Валентные, C-C в кольце	1456
1512	N-O	Ассим. валентные, N-O	1379 → 1290
Зависит от метода получения компонента 2, но, возможно, не все группы NO были восстановлены по реакции: RNO <sub>2</sub> + 3H <sub>2</sub> → RNH <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O			
1456	C-C в кольце	Валентные, C-C в кольце	1600
1456	RCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	Валентные, CH <sub>2</sub> и CH <sub>3</sub>	2957 → 2869 → 1379
1379	RCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	Валентные, CH <sub>2</sub> и CH <sub>3</sub>	2957 → 2869 → 1456
1252	ArNH <sub>2</sub>	Валентные Ar-N	831 → 752 → 700
1252	CH <sub>2</sub> -Cl	Веерн. внеплоскостн., -CH <sub>2</sub> Cl	1179 → 831 → 752
1179	CH <sub>2</sub> -Cl	Веерн. внеплоскостн., -CH <sub>2</sub> Cl	1252 → 831 → 752
1113	н/д	н/д	н/д
1028	RCO-OH	Валентные, C-O	2869 (димер OH)
831	R-Cl	Валентные, C-Cl	1252 → 1179 → 752
831	para-Ar	Внеплоскостн., C-H	1600 → 1456 → 752
752	ortho-Ar	Внеплоскостн., C-H	1600 → 1456 → 831
752	R-Cl	Валентные, C-Cl	1252 → 1179 → 831
700	Ar	Внеплоскостн., C-H	1252 → 831

Также исследован образец трехкомпонентного полимербетона ВЕТОFLEX с вяжущим на основе компонентов А, В и минерального заполнителя. Компонент А представляет собой высокомолекулярный продукт реакции эпихлоргидрина и бисфенола А в смеси с пластифицирующим агентом.



**Рис. 5.** Инфракрасный спектр соединения № 3 (фиолетовый) в сопоставлении с соединением EpoxyLite (горчичный цвет). Вероятность совпадения – более 80%

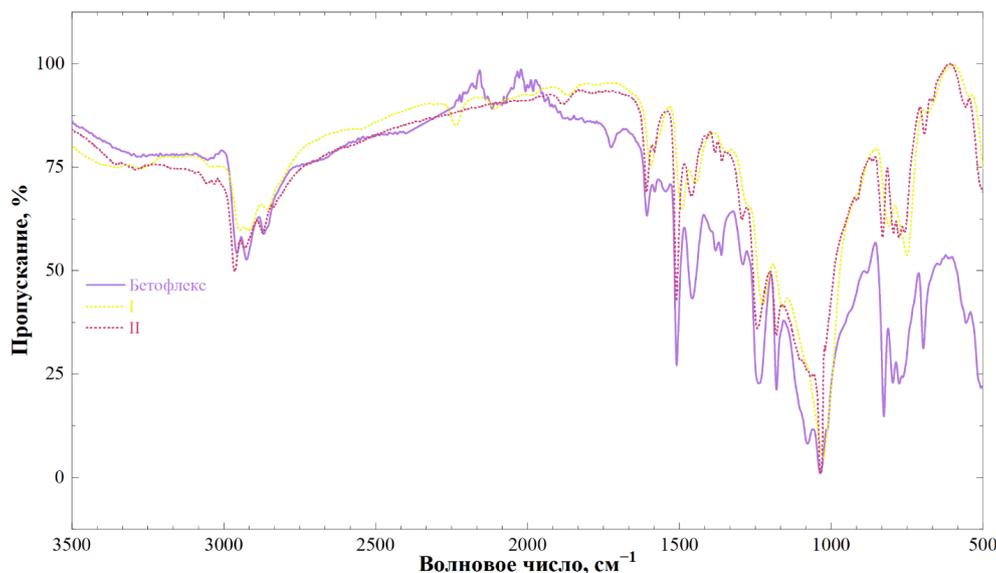
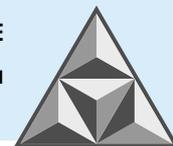
**Fig. 5.** Infrared spectrum of compound No. 3 (purple) and comparison with EpoxyLite compound (mustard colour). The match probability is over 80%

**Таблица 3.** Расшифровка полос соединения № 3 в инфракрасном спектре

**Table 3.** Decoding of the main bands of compound No. 3 in the infrared spectrum

Полоса, см <sup>-1</sup>	Имеется в соединении	Структура	Тип колебаний, связь	Зависимые полосы, см <sup>-1</sup>
2959	А	RCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	Валентные, СН	2867 → 1456 → 1381
2925	А, Б	-CH <sub>2</sub> -	-CH <sub>2</sub> -	н/д
2867	А, Б	RCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	Валентные, СН	2959 → 1456 → 1381
1725	А	RCHO	Валентные, С=О	н/д
1607	А, Б	Ar	Валентные, С=C	н/д
1607	А, Б	С-С в Ar	Валентные, С-С в кольце	1456
1584	-	R-NH <sub>2</sub>	Плоскостное, R-NH <sub>2</sub>	1036 → 797
1509	А, Б	N-O	Ассим. валентные, N-O	1290
1456	А, Б	RCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	Валентные, CH <sub>2</sub> и CH <sub>3</sub>	2959 → 2867 → 1381
1456	А, Б	С-С в Ar	Валентные, С-С в кольце	1607
1381	Б	RCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	Валентные, CH <sub>2</sub> и CH <sub>3</sub>	2957 → 2869 → 1456
1293	А	RCO-OH	Валентные, С-О	2867 (димер ОН)
1239	А	Ar-O-R	Валентные, С-О	828 → 774
1239	А	CH <sub>2</sub> Cl	Веерн. внеплоскостн., -CH <sub>2</sub> Cl	1179 → 828 → 774
1179	А, Б	CH <sub>2</sub> -Cl	Веерн. внеплоскостн., -CH <sub>2</sub> Cl	1239 → 828 → 774
1080	А, Б	R-O-R	Валентные, С-О	н/д
1036	А, Б	RCO-OH	Валентные, С-О	2867 (димер ОН)
1036	Б	RNH <sub>2</sub>	Валентные, С-N	1584 → 797
828	А, Б	RCH=CH <sub>2</sub>	Внеплоскостн., =CH	н/д
828	А, Б	para-Ar	Внеплоскостн., С-H	1607 → 1456 → 752
828	А, Б	R-Cl	Валентные, С-Cl	1239 → 1179 → 797
797	-	R-Cl	Валентные, С-Cl	1239 → 1179 → 774
797	-	R-NH <sub>2</sub>	Веерн. внеплоскостн., R-NH <sub>2</sub>	1584 → 1036
774	-	R-Cl	Валентные, С-Cl	1179 → 828 → 797
694	-	R-NH <sub>2</sub>	Веерн. внеплоскостн., R-NH <sub>2</sub>	н/д

Он состоит из смеси эпоксидных смол холодного отверждения, согласно ТУ 20.16.40-001-41986898-2023.



**Рис. 6.** Инфракрасный спектр соединения № 3 (сиреневый) и сравнение

с другими (пунктир), полученными объединением частей спектров соединений:

I (желтый) –  $0.33 \times [\text{easypoxy k-20 (cured)}] + 0.38 \times [\text{Methyl-d3 sulfoxide Dimethyl sulfoxide-d6}] + 0.19 \times [\text{Ken-React Lica 38}]$ ;

II (бирюзовый) –  $0.36 \times [\text{easypoxy k-20 (cured)}] + 0.28 \times [\text{Butyl Acid Phosphate}]$ . Вероятность совпадения – более 70%

**Fig. 6.** Infrared spectrum of compound No. 3 (lilac) and comparison

with others (dashed) obtained by combining parts of the compounds:

I spectra (yellow) –  $0.33 \times [\text{easypoxy k-20 (cured)}] + 0.38 \times [\text{Methyl-d3 sulfoxide Dimethyl sulfoxide-d6}] + 0.19 \times [\text{Ken-React Lica 38}]$ ;

II (turquoise) –  $0.36 \times [\text{easypoxy k-20 (cured)}] + 0.28 \times [\text{Butyl Acid Phosphate}]$ . The match probability is over 70%

Компонент *Б* представляет собой модифицированное соединение аминного типа (ТУ 20.16.54-002-41986898-2023), которое применяется как отвердитель жидкого эпоксидного вяжущего.

Минеральный наполнитель *В* представляет собой смесь нерудных материалов (песок, щебень, кварцевая мука) различных фракций, взятых в определенных пропорциях по ТУ 08.12.12-003-41986898-2023.

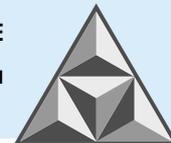
После смешивания компонентов *А* и *Б* получается состав, который в результате химической реакции является связующим для минерального наполнителя, обеспечивая изделию высокую прочность, водонепроницаемость и износостойкость.

Согласно проведенным исследованиям, жидкая эпоксидная смола низкой вязкости на основе бисфенола А после смешения с аминным отвердителем участвует в быстрой реакции отверждения, связывая минеральный наполнитель в монолитную конструкцию с высокими эксплуатационными свойствами, пригодными для использования в производстве мостовых сооружений. Установлено минимальное влияние примесей в исходных компонентах на результат идентификации их химического состава. Вероятность совпадения для компонентов вяжущего полимербетона никогда не была ниже отметки 92%.

Вероятность совпадения инфракрасного спектра образца полимербетона при сравнении его с другими спектрами, полученными объединением частей ИК спектров, составила более 70%.

## ВЫВОДЫ

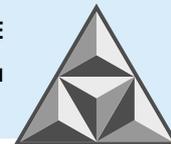
1. Обследование переходных зон деформационных швов мостовых сооружений, устроенных с применением полимербетона, выявило отсутствие нормативных требований к ним на уровне национальной системы стандартизации.



2. Принципиальное отличие вяжущих для полимербетонов заключается в применении химически синтезированных веществ с заранее установленной формулой и воспроизводимыми химическими, физическими и механическими свойствами. На практике подтверждена возможность применения спектрального метода для идентификации состава вяжущего при организации строительного контроля поставляемой продукции в соответствии с требованиями проектной документации, а также определения продуктов, образующихся при твердении полимербетона в переходной зоне деформационных швов мостовых сооружений.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Валиев Ш.Н., Каменских А.Н., Петрович И.Г., Журавлев П.А.** Полимерные напыляемые материалы для устройства гидроизоляции мостовых сооружений. М.: ООО «Строинформиздат», 2022. 187 с.
2. **Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Валиев Ш.Н., Жаденова С.В.** Систематизация и сравнительный анализ различных типов гидроизоляции, применяемых на автодорожных мостовых сооружениях // *Интернет-журн. «Науковедение»*. 2013. № 5. Идент. ном. ст.: 56ТВН513.
3. **Овчинников И.Г., Кочетков А.В., Макаров В.Н., Овсянников С.В.** Новые материалы и изделия в мостостроении. М., 2008. 80 с.
4. **Янковский Л.В., Кочетков А.В., Трофименко Ю.А.** Методика выбора материала для устройства шероховатых слоев дорожного покрытия // *Науч. вестник Воронеж. ГАСУ. Сер.: Строительство и архитектура*. 2015. № 1(37). С. 99-111.
5. **Янковский Л.В., Кокодева Н.Е., Трофименко Ю.А., Валиев Ш.Н., Шашков И.Г.** Применение цифрового микроскопа при мониторинге пешеходных покрытий мостовых сооружений // *Строительные материалы*. 2015. № 10. С. 75-79.
6. **Овчинников И.Г., Макаров В.Н., Илюшкин В.А., Овчинников И.И., Овсянников С.В.** Инновационные технологии устройства мостового полотна на современных мостовых сооружениях. Саратов: ИЦ «Рата». 2008. 204 с.
7. **Корнеев А.Д., Борков П.В., Бондарев А.Б., Прозорова Л.А.** Прогнозирование циклической долговечности полимербетонов в элементах конструкций транспортных сооружений // *Вестник Волгоград. гос арх.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архитектура*. 2011. № 21(40). С. 72-77. EDN NDZJHH.
8. **Бондарев Б.А., Борков П.В., Комаров П.В., Бондарев А.Б.** Экспериментальные исследования циклической долговечности полимерных композиционных материалов // *Современные проблемы науки и образования*. 2012. № 6. С. 136. EDN TODMCJ.
9. **Аржанухина С.П., Гарибов Р.Б., Кочетков А.В., Янковский Л.В., Глухов Т.А. и др.** Выбор требований к противогололедным материалам для зимнего содержания автомобильных дорог мегаполиса // *Вода: химия и экология*. 2013. № 4(58). С. 106-115.
10. **Di Yu, Wensheng W., Yongchun Ch., Yafeng G.** Laboratory investigation on the properties of asphalt mixtures modified with double-adding admixtures and sensitivity analysis // *Journ. Traffic and Transport. Eng. (English Edition)*. 2016. Vol. 3, no. 5. P. 412-426. DOI: 10.1016/j.jtte.2016.09.002.
11. **Yongchun Cheng, Di Yu, Guojin Tan and Chunfeng Zhu.** Low-Temperature Performance and Damage Constitutive Model of Eco-Friendly Basalt Fiber-Diatomite-Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles // *Materials*. 2018. Vol. 11, no 11. P. 2148. DOI: 10.3390/ma11112148.
12. **Celauro C., Praticò F.** Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 170. P. 245-253. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.058
13. **Yafeng G., Haipeng Bi, Chunyu L., Shurong Wang.** Microstructure Analysis of Modified Asphalt Mixtures under Freeze-Thaw Cycles Based on CT Scanning Technology // *Appl. Sci.* 2018. Vol 8, no 11. P. 2191. DOI: 10.3390/app8112191.
14. **Xiao Q., Aiqin Sh., Yinchuan G., Zhennan Li.** Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers // *Construction and Building Materials* 2018. Vol. 159. P. 508-516. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012.
15. **Yafeng G., Haipeng Bi, Zhenhong T., Guojin T.** Pavement Performance Investigation of Nano-TiO<sub>2</sub>/CaCO<sub>3</sub> and Basalt Fiber Composite Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles // *Appl. Sci.* 2018. Vol. 8, no 12. P. 2581. DOI: 10.3390/app8122581.



16. **Bondarev B.A.** An Outlook on the Application of Glass-Reinforced Plastic and Polymer Concrete Components in Bridge Construction / B. A. Bondarev, P. V. Borkov, A. B. Bondarev // 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016), Chelyabinsk, 19-20 мая 2016 года. Chelyabinsk: Elsevier Ltd, 2016. P. 1617-1622. DOI 10.1016/j.proeng.2016.07.139. EDN XFHSIX.
17. **Kaldas E.A.** Sillatekkide asfaltkatendid (Asphalt pavements on bridge decks). EAPA arvamusraport. 2013.
18. Testing of properties and constructability considerations of EVA-based sprayed membranes for waterproofing of tunnels / Holter, Karl Gunnar // «SEE Tunnel: Promoting Tunneling in SEE Regio» ITA WTC. 2015. Congress and 41st General Assembly, May 22-28.

Поступила в редакцию 01.04.2024

Одобрена после рецензирования 03.06.2024

Принята к опубликованию 10.06.2024

## REFERENCES

1. **Kamenskikh, A.N., Valiev, Sh.N., Petrovich, I.G. & Zhuravlev, P.A.** (2022) Polimernye napylyaemye materialy dlya ustroystva gidroizolyatsii mostovyh sooruzhenij [Polymeric sprayed materials for waterproofing of bridge structures]. Moscow: Stroinformizdat (in Russian).
2. **Ovchinnikov, I.I., Ovchinnikov, I.G., Valiev, Sh.N. & Zhadenova, S.V.** (2013) Systematization and comparative analysis of various types of waterproofing used on road bridge structures, *Internet-zhurn. «Naukovedenie»*, (5) [online]. Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/56tvn513> (in Russian).
3. **Ovchinnikov, I.G., Kochetkov, A.V., Makarov, V.N. & Ovsyannikov, S.V.** (2008) Novye materialy i izdeliya v mostostroenii [New materials and products in bridge construction]. Moscow: INFORMAVTODOR (in Russian).
4. **Yankovsky, L.V., Kochetkov, A.V. & Trofimenko, Yu.A.** (2015) Methodology of material selection for the device of rough layers of road pavement, *Nauch. vestnik Voronezh. GASU. Ser.: Stroitel'stvo i arkhitektura [Scientific Bulletin of Voronezh. VSUACE. Ser.: Construction and Architecture]*, 1(37), pp. 99-111 (in Russian).
5. **Yankovsky, L.V., Kokodeeva, N.E., Trofimenko, Yu.A., Valiev, Sh.N. & Shashkov, I.G.** (2015) The use of a digital microscope when monitoring macro-roughness of pavements of pedestrian bridge structures, *Stroitel'nye materialy [Construction materials]*, (10), pp. 75-79 (in Russian).
6. **Ovchinnikov, I.G., Makarov, V.N., Ilyushkin, V.A., Ovchinnikov, I.I. & Ovsyannikov, S.V.** (2008) Innovatsionnye tekhnologii ustroystva mostovogo polotna na sovremennyh mostovyh sooruzheniyakh [Innovative technologies of bridge deck construction on modern bridge structures]. Rata, Saratov (in Russian).
7. **Korneev, A.D., Borkov, P.V., Bondarev, A.B. & Prozorova, L.A.** (2011) Forecasting of cyclic durability polymerconcrete in elements of designs of transport constructions, *Vestnik Volgograd. gos. arkh.-stroyit. un-ta. Ser.: Stroitel'stvo i arkhitektura [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Ser.: Construction and Architecture]*, 21(40), pp. 72-77 (in Russian).
8. **Bondarev, B.A., Borkov, P.V., Komarov, P.V. & Bondarev A.B.** (2012) Experimental studies of cyclic durability of polymer composite materials, *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya [Modern problems of science and education]*, (6), p. 136 (in Russian).
9. **Arzhanukhina, S.P., Garibov, R.B., Kochetkov, A.V., Yankovsky, L.V. & Glukhov, T.A. et al.** (2013) Selection of demands on de-icing agents for metropolis roads, *Voda: khimiya i ekologiya [Water: Chemistry and Ecology]*, 4(58), pp. 106-115 (in Russian).
10. **Di, Yu, Wensheng, W., Yongchun, Ch. & Yafeng, G.** (2016) Laboratory investigation on the properties of asphalt mixtures modified with double-adding admixtures and sensitivity analysis, *Journ. Traffic and Transport. Eng. (English Edition)*, 3(5), pp 412-426. DOI: 10.1016/j.jtte.2016.09.002.
11. **Yongchun, Cheng, Di, Yu, Guojin, Tan & Chunfeng, Zhu** (2018). Low-Temperature Performance and Damage Constitutive Model of Eco-Friendly Basalt Fiber-Diatomite-Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles Materials. DOI: 10.3390/ma11112148.
12. **Celauro, C. & Praticò F.** (2018) Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses, *Construction and Building Materials*, 170, pp 245-253. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.058

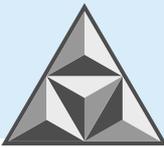


13. **Yafeng, G., Haipeng, Bi & Chunyu, L.** Shurong Wang (2018) Microstructure Analysis of Modified Asphalt Mixtures under Freeze-Thaw Cycles Based on CT Scanning Technology, *Appl. Sci.*, 8(11), p. 2191. DOI: 10.3390/app8112191.
14. **Xiao, Q., Aiqin, Sh., Yinchuan, G. & Zhennan, Li.** (2018) Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers, *Construction and Building Materials*, 159, pp 508-516. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012.
15. **Yafeng, G., Haipeng, Bi, Zhenhong, T. & Guojin, T.** (2018) Pavement Performance Investigation of Nano-TiO<sub>2</sub>/CaCO<sub>3</sub> and Basalt Fiber Composite Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles, *Appl. Sci.*, 8(12), p. 2581. DOI: 10.3390/app8122581.
16. **Bondarev, B.A., Borkov, P.V. & Bondarev, A.B.** (2016) An Outlook on the Application of Glass-Reinforced Plastic and Polymer Concrete Components in Bridge Construction. 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016), Chelyabinsk, Elsevier Ltd, pp. 1617-1622. DOI 10.1016/j.proeng.2016.07.139.
17. **Kaldas, Eestindanud Aleksander** (2013) Sillatekkide asfaltkatendid (Asphalt pavements on bridge decks). EAPA arvamustraport.
18. **Holter, Karl Gunnar** (2015) Testing of properties and constructability considerations of EVA-based sprayed membranes for waterproofing of tunnels. «SEE Tunnel: Promoting Tunneling in SEE Regio» ITA WTC 2015 Congress and 41st General Assembly.

*Received 01.04.2024*

*Approved after reviewing 03.06.2024*

*Accepted 10.06.2024*



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.03

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-76-87

# Водные объекты в архитектурном и социокультурном пространстве города (на примере средневекового Дербента)

**М.Н. Кюребекова**

**Мадина Нусратовна Кюребекова**

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

*kyurebekovamn@ystu.ru*



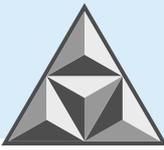
*Дербент – южный и древнейший город России. Проведенные раскопки подтверждают 5000-летнюю историю города, который с 2003 года входит в список Всемирного наследия ЮНЕСКО. Являясь «музеем под открытым небом», он имеет множество архитектурных объектов, которые до конца еще не исследованы. Целью исследования является анализ объектов, связанных с водными ресурсами средневекового Дербента, и оценка их значимости в отношении организации социокультурного пространства. Большое внимание уделено описанию городских водных объектов, сохранившихся до наших дней. Рассмотрение водных объектов показывает, что архитектурный стиль и материалы, использованные для строительства, создали единую городскую среду и явились частью организационного планирования застройки города.*

**Ключевые слова:** средневековый Дербент, архитектурная среда, социокультурное пространство, водные объекты, хамам, водоразборные фонтаны

**Для цитирования:**

Кюребекова М.Н. Водные объекты в архитектурном и социокультурном пространстве города (на примере средневекового Дербента) // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 2. С. 76-87. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5160/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-76-87



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-76-87

# Water facilities in the architectural and socio-cultural space of the city (on the example of medieval Derbent)

**M.N. Kyurebekova**

**Madina N. Kyurebekova**

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

*kyurebekovamn@ystu.ru*



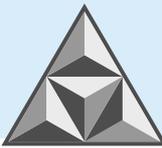
*Derbent is the southernmost and the most ancient city of Russia. Extensive archaeological studies confirm the 5,000-year history of the city, which has been a UNESCO World Heritage Site since 2003. Being an 'open-air museum', it has many architectural objects that have not yet been fully explored. The article analyses historical and cultural sources. The purpose of the paper is to analyse the objects related to water resources of medieval Derbent and to identify their significance in relation to the organisation of socio-cultural space. The author pays much attention to the description of urban water bodies that have survived to the present day. The water facilities examined show that the architectural style and materials used for construction created a unified urban environment and were part of the organisational planning of the city's development.*

**Keywords:** medieval Derbent, architectural environment, socio-cultural space, water facilities, hamam, water fountains

**For citation:**

Kyurebekova, M.N. (2024) Water facilities in the architectural and socio-cultural space of the city (on the example of medieval Derbent), Smart Composite in Construction, 5(2), pp. 76-87. Available at: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5160/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-76-87



## ВВЕДЕНИЕ

Вода – природный компонент городской среды. Тысячелетиями она требовалась для выживания человечества, веками велась непримиримая борьба за выход к водным ресурсам – морям, рекам, озерам и родникам. Возникновение поселений в непосредственной близости к воде объясняется необходимостью поддерживать саму жизнь человека, а также осуществлять повседневную работу. Водные ресурсы стали одним из важнейших аспектов бытия человека. Таким образом, центральное положение источников воды в архитектурном пространстве – развитом жилом доме, общественном и культовом комплексе и человеческом поселении [1] – создает возможность творческого осмысления исторического опыта возведения городов и применения этого опыта при реализации современных архитектурных концепций.

### *Вода – градообразующий фактор*

В средневековых городах, в зависимости от ландшафта местности, источниками воды служили:

1. Реки и ручьи; многие города строились на берегах рек или у истоков ручьев, что обеспечивало обитателям доступ к пресной воде;
2. Колодцы и скважины; для обеспечения запаса воды в городе требовались подземные источники;
3. Искусственные водоемы – пруды или каналы; служили для хранения и распределения воды;
4. Специальные сооружения; их необходимость связывается с транспортировкой воды на большие расстояния от источников;
5. Сооружения для сбора дождевой воды; использовались для утоления жажды домашних животных и птиц, орошения и других целей.

Здесь представлены основные источники воды для средневековых городов, а их использование для конкретных целей зависело от местных условий и технологических возможностей.

Расположение города Дербента – достаточно сложное: с одной стороны – западное побережье Каспийского моря, с другой – горы Большого Кавказа. Проход между ними представлен 3 км равнины, который позже получил название «Дербентский проход». О стратегическом расположении Дербента писали многие ученые и поэты – с древних времен и до наших дней. Хотелось бы отдельно отметить двух исследователей, отразивших реальную картину жизни средневекового Дербента: С.О. Хан-Магомедов, член Российской академии архитектуры и строительных наук, а также профессор А.А. Кудрявцев, собравший и представивший уникальные данные археологических исследований. По глубокому убеждению этих ученых, архитектура городского пространства Дербента изначально выстраивалась с «привязкой» к водным ресурсам местности.

Обеспечение города водой являлось непростой задачей, так как реки поблизости отсутствовали. Поэтому завоеватели Дербента большое внимание уделяли проблеме запасов пресной воды в черте города. Стратегическое расположение требовало строения водохранилищ.

«Древний городской водопровод Дербента снабжался водой из горных источников, расположенных в ущелье западнее цитадели. Около этих источников были сооружены



резервуары, из которых вода самотеком направлялась в город по подземным каналам, представляющим собой каменные желоба, перекрытые каменными плитами» [2]. Желоба применяли двух видов: закрытые подземные – для питьевой воды; открытые – для направления воды. Эти сооружения часто украшали рельефами, изображающими различные сцены и включающими символы, что обеспечивало не только функциональность, но и представлялось как украшение. По желобам вода поступала во дворцовые (на территории цитадели) и городские водохранилища. Затем она стекала по водоразборным фонтанам, расположенным по всему городу, обеспечивая население необходимым питьем (рис. 1).



**Рис. 1.** Фрагменты водоснабжения города

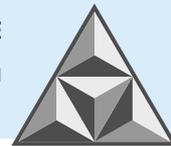
**Fig. 1.** Fragments of the city's water supply

Персо-таджикский писатель Балами (X в.), сообщая об источниках воды в Дербенте, употребляет следующие специальные арабоязычные термины: *хоуз* – водоем, пруд; *жай* (жей) – водохранилище; *чаимэ* – ключ, родник; *аб* – вода [3]. Водные объекты – родники, фонтаны, водохранилища использовались в архитектурной среде города для придания уникальности и красоты ландшафту.

Вокруг фонтана располагалась площадка из того же материала, что и основные строения города, и это способствовало созданию единого архитектурного стиля. Указанное обстоятельство подтверждает наличие единого плана города.

#### *Водохранилища и водоразборные фонтаны*

Важную роль в архитектуре городов средневековья играли фонтаны и водохранилища, обеспечивая экологическое равновесие, а также создавая привлекательные городские пространства. Уже в VIII столетии проблема водоснабжения города решилась путем строительства водохранилищ. До наших дней сохранились четыре водохранилища, два из которых были выстроены в черте города под землей (рис. 2) и использовались для удовлетворения повседневных нужд горожан.



**Рис. 2.** Подземные городские водохранилища  
**Fig. 2.** Underground urban reservoirs

В цитадели сохранились два подземных водохранилища (функционировали в VI – XVII вв.) крестово-купольной и округлой формы, которые обслуживали дворец (рис. 3) .



**Рис. 3.** Водохранилища цитадели  
**Fig. 3.** Citadel's reservoirs

Водоразборные фонтаны Дербента – это исторические и архитектурные памятники. За время существования города только в черте города насчитывалось четырнадцать водосборных фонтанов-булагов («родник, ключ» – в переводе с тюрк.). Булаг – традиционный для Дербента элемент архитектуры, водоразборный фонтан, который был необходим горожанам для питья и других нужд. Он являлся не только источником чистой питьевой воды, но и тем социально-активным местом, где поили горожане домашнюю скотину, встречались и обсуждали новости.



До наших дней дошли два действующих фонтана-булага, расположенных в старой части города. Сооружение «Кала-булаг» («родник цитадели» – в переводе с тюрк.) датируется XVII-XIX вв. [4]. Фонтан и ныне находится на территории крепости, в жаркий день радуя посетителей прохладной родниковой водой. Архитектурное строение включает углубление в арочной нише и встроенную фигуру в виде каменного льва (рис. 4).



**Рис. 4.** Фонтан «Кала-булаг»

**Fig. 4.** The Kala-bulag fountain

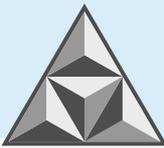
«Городские фонтаны Дербента (связанные водопроводом) сооружались в виде подпорной стенки (оформленной арочными нишами), в которой устроены выводные трубы. Перед фонтаном – замощенная каменная площадка, обычно приподнятая над поверхностью земли. Вода из фонтана стекает в открытый каменный резервуар, а затем поступает в оросительные и канализационные каналы» [2].

Другой фонтан-булаг – «Шехсалах» (шейх Салах) построен в начале XVIII в. Архитектурное пространство для удобства посетителей оформлено особым образом: здесь выложены каменные дорожки, установлены скамейки, посажены деревья. О древности фонтана напоминают арабские и персидские надписи, содержащие информацию о создании и проведении ремонтных работ на протяжении всего периода его существования (рис. 5).



**Рис. 5.** Фонтан «Шехсалах»

**Fig. 5.** The Shehsalah fountain



Вокруг фонтана создается атмосфера умиротворения и спокойствия; посетители в тени деревьев имеют возможность насладиться природой и чистой водой. И сегодня эти древние фонтаны Дербента продолжают восхищать своей красотой и величием, являясь важными объектами исторического наследия.

#### *Хамамы средневекового Дербента*

Особую группу архитектурных памятников средневекового Дербента составляют бани (хамамы). К настоящему времени сохранилось пять таких строений. Возведение и перестройка четырех из них может быть отнесена к периоду XV-XVII столетий [5]. Хамамы представляли сводчато-купольные архитектурные сооружения с углублением в землю [6], имели отопление (горячее и холодное отделения), а также бассейн. Выстроенные из местного ракушечника, хамамы отличались друг от друга только размерами (рис. 6).



**Рис. 6.** Восточные бани Дербента  
**Fig. 6.** Eastern baths of Derbent

Эти сооружения играли важную роль в создании комфортной городской среды и формировании социокультурного пространства. Например, в некоторых хамамах существовали специальные отделения для спортивных упражнений, которые называли «зорхана» [7].

Для Дербента, через который проходило множество торговых путей, хамамы выполняли значимую функцию как для гостей, так и жителей города, и располагались вблизи базаров, торговых площадей. Хамамы символизировали экономическое развитие и богатство городских жителей. В общем и целом, они решали важную задачу в жизни средневекового города, объединяя людей, обеспечивая им здоровье и гигиену, а также демонстрировали процветание и культурное разнообразие городской общины.

#### *Водные объекты в социокультурном пространстве города*

Дербент как средневековый город с организационной застройкой, учитывающий расположение водных объектов, имел следующие особенности: расположение вблизи моря;



обустройство порта; оборонительные сооружения вблизи водных объектов. Эта тройственная особенность застройки логически объяснима:

1. Город строился на берегу Каспийского моря для удобства судоходства и обеспечения жителей рыбой как одним из важнейших источников питания;
2. Дербент – город-порт включал специально обустроенный район «Дубары», где разгружались и загружались товары; здесь также располагались торговые склады и рынки;
3. Город был защищен оборонительными стенами и башнями; один из входов на городскую территорию находился со стороны моря, что обеспечивало дополнительное преимущество перед агрессором.

Организационная застройка города, с учетом устройства водных объектов, определяла его развитие, удобство проживания, защиту от внешних угроз и развитие торговли и экономики.

Средневековый город представлял собой крупный центр культуры. Городская структура отличалась разделением на районы – кварталы ремесленников, торговцев, знатных людей и др. В центре города выстраивали мечети, рыночные площади и улицы, которые служили для торговли и проведения общественных собраний. В архитектурном плане город представлял собой крепость с защитными стенами и башнями, а внутри крепости располагались здания, построенные из камня, добываемого в непосредственной близости [8]. Улицы были кривыми и узкими, вымощенными каменными дорожками. Город представлял все необходимые условия для ремесленного производства и торговли и предполагал заселение кварталов, в которых развивались определенные виды производственной деятельности, имелись кузницы, мастерские и лавки. Мечети служили для организации религиозной и образовательной жизни города (образование получали в школах при мечети). Общественная жизнь в основном ограничивалась стенами города. Горожане, встречаясь на рынках, площадях, мечетях, хамамах и булагах, обсуждали новости, осуществляли обмен товарами, участвовали в различных церемониях и праздниках. Эти особенности способствовали формированию в Дербенте уникального социокультурного пространства и культуры.

Социокультурное пространство средневекового Дербента интегративно, многогранно и разнородно, поскольку сочетало все аспекты развития. В каждом городе такое пространство имеет характерные черты, поскольку наполняющие его элементы находятся в различных вариациях отношений и взаимосвязей и определяют специфику места [9, 10]. Оценивая значимые места в городском пространстве Дербента, важно еще раз отметить водоразборные фонтаны, которые придавали городу уникальный архитектурный облик. Фонтаны-булаги в наше время становятся символами городов, отражая их уникальность и историю. Ведь они и сегодня являются центром городской жизни, предоставляя людям возможность насладиться красотой окружающего мира.

В свою очередь, водный объект хамам как место для общения и социализации людей различных социальных классов служил социальным и культурным институтом средневекового города. Здесь проходили встречи, беседы, обсуждения политических событий, осуществлялись крупные торговые сделки и т.д. В женских хамамах проводились важные обрядовые ритуалы (например, гигиенические процедуры невесты).

Таким образом, рассматриваемые водные объекты средневекового Дербента представляют собой значимый компонент архитектурной и социокультурной системы, олицетворяющий множество аспектов человеческой жизни, формирующий и выражающий человеческие ценности, традиции и обычаи.



## ВЫВОДЫ

Представлены аспекты влияния водных объектов на архитектурное и социокультурное пространство средневекового Дербента:

– вода рассматривается как символ чистоты, обновления и возрождения; древние города используют воду в качестве символа в гербах и флагах; в частности, Каспийское море как достояние и символ отражено в гербе Дербента;

– вода, море послужили основанием для застройки исторического района города; в частности, создание района Дубары в Дербенте связано с развитием рыбного промысла;

– вода есть ключевой элемент организации экосистемы средневекового города; кроме того, построенные водохранилища и фонтаны позволили организовать городское пространство;

– вода внесла вклад в формирование городских традиций; водоразборные фонтаны и хамамы Дербента служили местами, где проводились обряды и зарождались обычаи.

Таким образом, водные объекты средневекового Дербента способствовали формированию атмосферы и характера города, развитию общества, определяли качество жизни горожан. И сегодня они продолжают выполнять ведущие функции в организации архитектурного и социокультурного пространства, оказывая мощное влияние на его развитие и структуру.

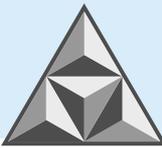
## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Павлов Н.Л.** Источник воды как смысловой центр архитектурного пространства // АМІТ. 2017. №2 (39). Режим доступа: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/istochnik-vody-kak-smyslovoy-tsentr-arhitekturnogo-prostranstva> (дата обращения 15.03.2023)
2. **Хан-Магомедов С.О.** Дербент. Горная Стена. Аулы Табасарана. М.: Искусство, 1979. 228 с.
3. **Шихсаидов А.Р.** Арабские источники IX-X вв. о Дагестане. Ат-Табари. История пророков и царей. Махачкала, 1971, РФ ИИЯЛ, 34803, 95 с.
4. Булаги Дербента // ГБУ РД «Дербентский музей заповедник» [Электронный ресурс]. 2024. Режим доступа: URL: <https://derbentmuseum.ru/news/bulagi-derbenta/> (дата обращения 22.03.2023).
5. **Кудрявцев А.А.** Мусульманский город Дагестана. Махачкала: Дагестан. кн. изд-во, 1994. 238 с.
6. **Гасанова М.Н.** Взаимодействие религиозного и светского в духовной культуре г. Дербента: специальность 09.00.13 "Философская антропология, философия культуры": дисс. ... канд. филос. наук / Гасанова М.Н. Махачкала, 2006.
7. **Иноземцева Е.И., Кидирниязов Д.С.** "Вечный город" на перекрестке цивилизаций и эпох: штрихи к исторической ретроспективе культурного наследия древнего Дербента как площадки межэтнического взаимодействия // Культурное наследие Северного Кавказа как ресурс межнационального согласия: сб науч. ст. по итогам междунар. науч. форума, с. Кабардинка, Геленджик, 10-13 октября 2019 года. М.: Институт наследия, 2021. С. 378-389.
8. **Кюребекова М.Н.** Архитектурная среда как смыслообразующий концепт города (на примере средневекового и современного Дербента) // Умные композиты в строительстве. 2023. Т. 4. №. 1. С. 81-90. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5045/view>
9. **Гаврилина Т.О.** Социокультурное пространство города: структура, функции // Вестник Сургутского государственного педагогического университета. 2019. № 2 (59). С. 196-205.
10. **Кюребекова М.Н.** Семиотическое пространство ворот в архитектуре Дербента // Умные композиты в строительстве. 2023. Т. 4. №. 4. С. 75-89. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5048/view>

Поступила в редакцию 15.03.2024

Одобрена после рецензирования 29.05.2024

Принята к опубликованию 13.06.2024



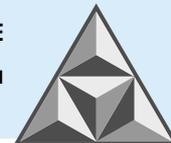
## REFERENCES

1. **Pavlov, N.L.** (2017). Water source as a semantic centre of architectural space. *AMIT*, 2 (39). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/istochnik-vody-kak-smyslovoy-tsentr-arhitekturnogo-prostranstva> (accessed 15.03.2023) (in Russian).
2. **Khan-Magomedov, S.O.** (1979) *Derbent. Mountain Wall. Auls of Tabasaran*. Moscow: Iskusstvo. 1979 (in Russian).
3. **Shikhsaidov, A.R.** (1971) Arab sources of IX-X centuries about Dagestan. *At-Tabari. History of prophets and kings*. Makhachkala, Russia (in Russian).
4. Bulagi of Derbent. *Derbent Museum Reserve* [online]. 2024. Available at: URL: <https://derbentmuseum.ru/news/bulagi-derbenta/> (accessed 22.03.2023).
5. **Kudryavtsev, A.A.** (1994). Muslim city of Dagestan. Dag. book publishing house, Makhachkala, Russia (in Russian).
6. **Gasanova, M.N.** (2006) Interaction of religious and secular in the spiritual culture of Derbent. Ph. D. Thesis. Makhachkala, Russia (in Russian).
7. **Inozemtseva, E.I. & Kidirniyazov, D.S.** (2019) 'Eternal city' at the crossroads of civilisations and epochs: touches to the historical retrospective of the cultural heritage of ancient Derbent as a site of interethnic interaction. *Kul'turnoe nasledie Severnogo Kavkaza kak resurs mezhnatsional'nogo soglasiya: sb. nauch. st. po itogam mezhdunar. nauch. foruma* [Cultural heritage of the North Caucasus as a resource of interethnic harmony: a collection of scientific articles based on the results of the international scientific forum], Heritage Institute, Kabardinka, Gelendzhik, 10-13 October 2019. Moscow: Institut naslediya, pp. 378-389 (in Russian).
8. **Kyurebekova, M.N.** (2023) Architectural environment as a concept of the city (on the example of medieval and modern Derbent), *Smart Composite in Construction*, 4(1), pp. 81-90 [online]. Available at: <https://ystu.editorum.ru/ru/nauka/issue/5045/view> (in Russian).
9. **Gavrilina, T.O.** (2019) Sociocultural space of the city: structure, functions. *Vestnik Surgutskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta* [Bulletin of Surgut State Pedagogical University]. 2(59), pp. 196-205 (in Russian).
10. **Kyurebekova, M.N.** (2023) Semiotic gate space in the architecture of Derbent, *Smart Composite in Construction*, 4(4), pp. 75-88. Available at: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5048/view> (accessed 10.02.2024) (in Russian).

Received 15.03.2024

Approved 29.05.2024

Accepted 13.06.2024



## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция строго придерживается норм и правил международной публикационной этики.

Правовую основу обеспечения публикационной этики составляют международные стандарты: положения II Всемирной конференции по вопросам соблюдения добросовестности научных исследований, положения Комитета по этике научных публикаций (The Committee on Publication Ethics – COPE) и нормы раздела «Авторское право» Гражданского кодекса РФ.

Представление статьи в журнал подразумевает следующее:

- работа не была опубликована в другом журнале;
- работа не находится на рассмотрении в другом журнале;
- все соавторы согласны с публикацией статьи;
- получено согласие (в явной или неявной форме) организации, на базе которой проведено исследование.

При представлении рукописи в журнал авторы должны убедиться, что все цитирования оформлены корректно, указаны заимствованные источники в подписях к рисункам и надписям к таблицам. Если таковые не приведены, предполагается, что рисунки и таблицы представляют собой плод авторской деятельности. Редакция осуществляет проверку статей на антиплагиат и отклоняет или возвращает авторам рукописи, если оригинальность текстов по результатам такой проверки не достигает 70-75 %.

### **Авторские права**

Авторы, направляющие свои работы в журнал, соглашаются со следующим:

1. Авторы сохраняют за собой авторские права на работу и предоставляют журналу право первой публикации.
2. Авторы сохраняют за собой право заключать отдельные контрактные договоренности, касающиеся неэксклюзивного распространения версии работы в опубликованном в журнале виде (например, размещение в институтском хранилище, публикация в книге), со ссылкой на оригинальную публикацию в данном журнале.

### **Приватность**

Имена и адреса электронной почты, введенные на сайте данного журнала, используются исключительно для достижения целей, совпадающих с миссией журнала; доступ к ним иных лиц и организаций для других целей не предоставляется.

### **Правила оформления статей для журнала «Умные композиты в строительстве» / «Smart Composite in Construction»**

В журнале «Умные композиты в строительстве / Smart Composite in Construction» печатаются работы преподавателей и сотрудников высших учебных заведений РФ, РАН, РААСН и других исследовательских организаций, работающих в сфере промышленного и гражданского строительства и архитектуры, в том числе – зарубежных.

### **Рубрики журнала**

- Строительные конструкции, здания и сооружения (технические)
- Строительные материалы и изделия (технические)
- Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические)



- Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (технические науки; архитектура)

#### **Статьи, направляемые в журнал, должны удовлетворять следующим требованиям:**

Статья должна соответствовать профилю и рубрикам журнала, обладать актуальностью, новизной, иметь прикладное значение (и/или теоретическое обоснование). Вопрос об опубликовании или отклонении статьи решает редакционная коллегия журнала, и ее решение является окончательным.

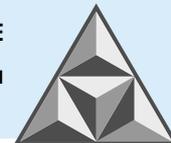
Статьи должны представлять сжатое, конкретное изложение результатов, без повторения одних и тех же данных в тексте, рисунках и таблицах.

Все представленные статьи должны быть набраны 12 кеглем, шрифт *Times New Roman*, интервал – 1.1. Поля: верхнее и нижнее – 3 см, левое и правое – 2.5 см. Абзацный отступ – 0.75 см. Объем статьи – 7-15 страниц, включая аннотацию и список литературы на русском и английском языках; число таблиц – не более 3, рисунков – не более 5-6, для обзорной статьи – не более 8, в том числе помеченных буквами *a, б* (курсив) и т.д. Рисунки, как и таблицы, подписи и заголовки к ним, а также примечания, размещаются по тексту статьи. В раздел «Обзорные статьи» принимаются материалы объемом от 20 до 30-35 страниц.

При оформлении статьи рекомендуется избегать употребления любых сокращений, кроме общепринятых. Первое упоминание сокращенного термина обязательно следует после его представления в полном виде. Рукописные вставки не допускаются. Кавычки оформляются «елочкой». Текст набирается без нумерации страниц.

#### **Структура статьи**

Первая страница рукописи оформляется шрифтом с размером 12 пт. На первой строке указывается тип статьи с выравниванием слева без абзацных отступов (Научная статья, Обзорная статья). На следующей строке проставляется индекс по универсальной десятичной классификации (УДК). После УДК пропускается одна строка и дается по центру **наименование работы** (полужирное начертание). Пропускается одна строка и приводятся **И.О. Фамилия** (полужирное начертание) каждого автора. После фамилии каждого автора надстрочным символом указывается сноска на аффилиацию в виде цифры. Если все авторы представляют одну и ту же организацию, цифровое обозначение аффилиации не указывается. Пропускается одна строка, начиная с первого надстрочного номера аффилиации, приводится полное Имя, Отчество, Фамилия автора (или авторов, если таковых, представляющих данную организацию, несколько), затем, на следующей строке – наименование организации (места работы), города, страны и электронный адрес (курсив) каждого автора из данной организации. Пропускается одна строка и приводится полное **Имя, Отчество, Фамилия** автора (или авторов) другой организации, а на следующей строке – наименование другой организации (места работы), города, страны и электронный адрес (курсив). Пропускается строка, размещается аннотация со слов «**Аннотация.**» (**Abstract.**) (**с точкой**). Текст аннотации должен включать 150-250 слов, выполненных курсивным нежирным начертанием, и завершается точкой. После аннотации и пропуска одной строки набирается «**Ключевые слова:**» (**Keywords:**) (**с двоеточием**) и приводится 6-10 словосочетаний с курсивным начертанием, без точки в конце. Через строку указывается автор, ответственный за переписку, и его электронная почта (курсивом). Все вышеописанные пункты следом приводятся на английском языке.



Благодарности организациям, научным руководителям и другим лицам, оказавшим помощь при написании статьи, приводятся после слова «**Благодарности:**». На английском языке слова благодарности приводятся после слова '**Acknowledgments:**'

Сведения о грантах и финансировании исследования при подготовке и публикации статьи могут быть приведены после слова «**Финансирование:**» (на английском языке – после слов '**Funding:**' или '**Financial Support:**').

На первой странице рукописи (если статья представлена на английском языке) все вышеописанные пункты приводятся только на английском языке.

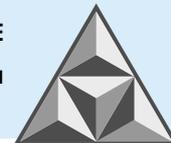
Основной текст научной статьи рекомендуется излагать согласно структуре IMRAD, содержащей следующие заголовки: Введение, Экспериментальная часть, Результаты и их обсуждение, Выводы, Список источников. Каждый заголовок приводится прописными буквами высотой 12 пт и выделяется одной пустой строкой перед ним и после него.

Рисунки оформляются внутри текста, перенос строк подписей на другую страницу не допускается. Подписи к рисункам приводятся сразу под графическим изображением. Подпись рисунка составляется из сокращения «**Рис.**» (или '**Fig.**' для статьи на английском языке или для перевода подписи), порядкового номера и отделенного точкой названия рисунка, при этом текст, кроме самого названия, выделяется полужирным начертанием. Следом в статье на русском языке приводится подпись рисунка на английском языке. Если рисунок состоит из нескольких частей, помеченных отдельными буквами, перенос любой части рисунка и примечания в виде буквы на другую страницу не рекомендуется. Рекомендуется уменьшение шрифта для подписи до 10 пт (допускается до 8 пт). Рисунки располагаются только после их упоминания (или перекрестной ссылки) в тексте статьи. Ссылка на каждый рисунок по тексту статьи приводится в обязательном порядке и приводится в скобках с сокращением «рис.» ('Fig.'), после которого указывается номер, например: (рис. 1) – при представлении работы на русском языке, (Fig. 1) – при представлении работы на английском языке.

Формулы рекомендуется оформлять внутри таблицы, состоящей из двух столбцов. В первом столбце приводится сама формула, оформленная редактором формул или в виде изображения. Во втором столбце шириной 1 см приводится порядковый номер формулы, заключенный в скобки при создании перекрестных ссылок в тексте. Если необходимость давать перекрестные ссылки отсутствует, второй столбец не создают. После формулы ставится запятая, когда приводится расшифровка символов формулы, или точка; порядковый номер формулы после запятой или точки располагается на этой же строке, с выравниванием по правому краю.

Для статейных таблиц приводится обозначение «**Таблица**» (или '**Table**' для статьи на английском языке), порядковый номер (без обозначения знака номера), а после точки дается наименование таблицы. Текст, кроме самого наименования таблицы выделяется полужирным начертанием. Следом в статье на русском языке приводится название таблицы на английском языке. Рекомендуется уменьшение шрифта в таблице до 10 пт (допускается до 8 пт). Таблицы располагаются только после их упоминания (или перекрестной ссылки) в тексте статьи. Упоминание приведенной таблицы по тексту статьи является обязательным и приводится в скобках, в которых дают обозначение, например: (табл. 1) – при представлении работы на русском языке, (Table 1) – при представлении работы на английском языке.

Статья заканчивается разделом «Список источников» (в статье на английском языке – разделом 'References'), шрифт Times New Roman, кегль 10 пт. Оптимальное количество цитированных источников от 15 до 20 (но не менее 10), при этом в список рекомендуется включить не менее 3 работ, представляющих журналы из ядра РИНЦ или входящих в базы



данных WoS/Scopus. В обзорных работах принимается не менее 40-50 ссылок на литературные источники. Под списком литературных источников приводятся надписи курсивом, каждая – с новой строки: «Поступила в редакцию», «Одобрена после рецензирования», «Принята к опубликованию».

### Формат

Редакция принимает тексты, сохраненные в форматах .doc. или .docx. Материалы, не соответствующие указанным требованиям и представленные в других форматах, не рассматриваются.

### Оформление литературных ссылок

Все затекстовые библиографические ссылки в статье на русском языке составляют по ГОСТ Р 7.0.5 и ГОСТ Р 7.0.100, в статье на английском языке – согласно международному стилю оформления Harvard.

Дополнительно в статье на русском языке приводят перечень затекстовых библиографических ссылок на латинице ('References'), согласно международному стилю оформления Harvard.

Издания, которые не переводятся, необходимо указать транслитерацией в соответствии с общепринятыми международными правилами, в конце каждого такого источника должна стоять пометка (in Russian) (см. <http://www.cas.org/expertise/cascontent/caplus/corejournals.html>).

Для журнальной статьи должны быть указаны фамилии и инициалы всех авторов, название статьи, сокращенное название журнала (если допускается, например: *Изв. вузов. Химия и хим. технология*) год, номер тома, номер или выпуск, диапазон страниц и DOI (при их наличии, в случае если цитируемая статья напечатана на русском языке).

Примеры оформления литературных источников (статьи, монографии, патенты на изобретение, интернет-данные) на русском и английском языках

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Трейбакс Е.А.** Использование уникальных свойств клееных деревянных панелей CLT в строительстве общественных зданий // *Инновации в науке*. 2017. № 10 (71). С. 68-69.
2. **Ammari M.S., Belhadj B., Bederina M., Ferhat A., Quéneudec M.** Contribution of hybrid fibers on the improvement of sand concrete properties: Barley straws treated with hot water and steel fibers // *Construction and building materials*. 2020. Vol. 233, no. 8. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.117374
3. **Титунин А.А., Зайцева К.В.** Проектирование и производство строительных материалов из древесины. Комплексный подход. Кострома: Изд-во Костром. гос. технол. ун-та, 2009. 185 с.
4. **Яргина З.Н.** Эстетика города. М.: Стройиздат, 1991. 365 с.
5. В России будет обеспечено широкое внедрение многоэтажного деревянного домостроения // *Минстрой России*: [сайт]. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/press/v-rossii-budet-obespecheno-shirokoe-vnedrenie-mnogoetazhnogo-derevyannogo-domostroeniya/> (дата обращения 10.10.2023).
6. Citation guides / Mendeley [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mendeley.com/guides/citation-guides/> (дата обращения: 05.04.2022).
7. Патент № 2667367 Российская Федерация, МПК В28С 5/00 (2006.01), В28С 9/02 (2006.01). Способ получения бетонной смеси с утилизацией ранее полученных остатков этой смеси: опубл. 19.09.2018 / Коган Артем Сергеевич.

*Поступила в редакцию*

*Одобрена после рецензирования*

*Принята к опубликованию*



## REFERENCES

1. **Treybaks, E.A.** (2017) Utilization of unique properties of glued wood CLT panels in the construction of public buildings, *Innovatsii v nauke*, 10(71), pp. 68-69 (in Russian).
2. **Ammari, M.S., Belhadj, B., Bederina, M., Ferhat, A. & Quéneudec, M.** (2020) Contribution of hybrid fibers on the improvement of sand concrete properties: Barley straws treated with hot water and steel fibers, *Construction and Building Materials*, 233(8). DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117374.
3. **Titunin, A.A. & Zaitseva, K.V.** (2009) *Design and production of construction materials of wood. Complex approach.* Kostroma: Izd-vo Kostrom. gos. tekhnol. un-ta (in Russian).
4. **Yargina, Z.N.** (1991) *Aesthetics of the city.* Moscow: Stroyizdat (in Russian).
5. Ministry of Construction of Russia. (2022) *Russia will ensure widespread introduction of multi-storey wooden house building* [online]. Available at: <https://minstroyrf.gov.ru/press/v-rossii-budet-obespecheno-shirokoe-vnedrenie-mnogoetazhnogo-derevyannogo-domostroeniya> (accessed 10.10.2023) (in Russian).
6. Citation Guides / Mendeley [online]. Available at: <https://www.mendeley.com/guides/citation-guides/> (accessed 05.04.2022).
7. **Ferrari, G., Surico, F., Brocchi, A., Banfi, E., Maltese, C. & Squinzi, M.** (2019) Method for recycling concrete, IT, Patent EP 2,468,695 A1.

*Received*

*Approved after reviewing*

*Accepted*

**УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ  
В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**  
SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION



**ТОМ 5, ВЫПУСК 2, 2024** | VOL. 5, ISSUE 2

