

## Оптимизация свойств легких керамических изделий с применением статистических методов

Алексей Дмитриевич Жуков<sup>1,5</sup> , Даниил Романович Николаев<sup>1</sup> , Петр Михайлович Жук<sup>2</sup> , Андрей Александрович Медведев<sup>1,4</sup> , Борис Александрович Ефимов<sup>1</sup> , Екатерина Юрьевна Боброва<sup>1,3\*</sup> 

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация

<sup>2</sup> Московский архитектурный институт, Москва, 107031, Москва, ул. Рождественка, 11, стр. 2, Российская Федерация

<sup>3</sup> Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, 109028, Москва, Покровский бул., 11, стр. 10, Российская Федерация

<sup>4</sup> Московский геологоразведочный университет, Москва, 117485, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, Российская Федерация

<sup>5</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, 127238, Москва, Локомотивный пр., 21, Российская Федерация

\* Автор, ответственный за переписку: e-mail: mla-gasis@mail.ru

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Повышение эффективности керамического кирпича и камней связано со снижением средней плотности изделий и соответствующей теплопроводностью. Одним из возможных путей является поризация структуры керамического изделия с помощью выгорающих добавок или введения специальных пен при приготовлении керамической смеси. Другая возможность связана с введением в структуру особо легких заполнителей и, в частности, дробленого пеностекла. Целью исследований являлась разработка методики определения и оптимизации рецептур легкого керамического кирпича, основанная на нормативных требованиях по прочностным характеристикам, плотности и теплопроводности. **Методы и материалы.** В качестве сырья использовались суглинок средней пластичности и флюсующий компонент (тонкомолотый бой стекла), а также измельченный пеностеклянный щебень. Свойства образцов определялись по нормативным методикам, при планировании и обработке результатов эксперимента использовались статистические и цифровые методы. **Результаты.** Установлено, что оптимальными являются сушка при 80 °С и влажности воздуха 55% и обжиг в интервале температур 900–950 °С при условии введения флюсующего компонента. Установлено, что оптимальными являются значения факторов: средняя плотность пеностекла 150 кг/м<sup>3</sup>; расход пеностекла 30 кг/м<sup>3</sup>; оптимальный размер частиц измельченного пеностекла 0,68–0,69 мм; содержание флюсующей добавки (плавня) 8,3–8,4% от массы глины. Этим значениям соответствуют: средняя плотность 1320–1360 кг/м<sup>3</sup>; прочность на сжатие 15–16 МПа; теплопроводность 0,15–0,16 Вт/(м·°С); марка по морозостойкости: F35. **Обсуждение.** Применение цифровых методов позволило установить характер влияния варьируемых факторов на свойства материала: его прочность, плотность и теплопроводность, что было подтверждено при проверке адекватности моделей как в сериях активного эксперимента, так и при исследовании структуры материала. **Заключение.** Разработаны основы методики прогнозирования свойств керамических изделий и подбора его состава с помощью цифровых методов, сформированы требования по оптимизации свойств изделий из пеностекла, а также по расходам пеностекла и флюсующего компонента. Полученные материалы вполне соответствуют требованиям к изделиям. Легкий кирпич является конструктивно-теплоизоляционным и может использоваться как стеновой материал.






**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** керамический кирпич, дробленое пеностекло, бой стекла, цифровая оптимизация, статистическое планирование

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Исследования проводились в рамках реализации научно-исследовательской работы по теме ФНИ РААСН № 3.1.2.1 «Развитие теоретических основ получения особолегких неорганических строительных материалов и исследование влияния пористой структуры на их теплофизические и акустические характеристики», выполняемой по заданию Минстрой России. Исследования проводились на экспериментальной базе ЗАО РОКВУЛ. Часть исследований выполнена в НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».

### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Жуков А.Д., Николаев Д.Р., Жук П.М., Медведев А.А., Ефимов Б.А., Боброва Е.Ю. Оптимизация свойств легких керамических изделий с применением статистических методов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):149–158. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-149-158>. – EDN: WQVXIC.

# Optimization of the properties of lightweight ceramic products using statistical methods

Alexey D. Zhukov<sup>1,5</sup> , Daniil R. Nikolaev<sup>1</sup> , Petr M. Zhuk<sup>2</sup> , Andrey A. Medvedev<sup>1,4</sup> , Boris A. Efimov<sup>1</sup> , Bobrova Ekaterina Yu. Bobrova<sup>1,3\*</sup> 

<sup>1</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, Russian Federation

<sup>2</sup> Moscow Institute of Architecture, 107031, Moscow, St. Nativacka, 11, pp. 2, Russian Federation

<sup>3</sup> National Research University "Higher School of Economics", 109028, Moscow, Pokrovsky Blvd., 11 pp. 10, Russian Federation

<sup>4</sup> Russian Geologic Exploration University, 117485, Moscow, ul. Mikluho-Maclaiya, 23, Russian Federation

<sup>5</sup> Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, 127238, Moscow, Lokomotivny Proezd, 21, Russian Federation

\* Corresponding author: e-mail: mla-gasis@mail.ru

## ABSTRACT

**Introduction.** Improving the efficiency of ceramic bricks and blocks involves reducing their average density and corresponding thermal conductivity. One possible approach is to introduce porosity into the ceramic structure using burnable additives or specialized foams during the preparation of the ceramic mixture. Another option is incorporating ultra-lightweight aggregates, particularly crushed foam glass. The aim of this study was to develop a method for determining and optimizing the formulations of lightweight ceramic bricks based on regulatory requirements for strength characteristics, density, and thermal conductivity. **Methods and materials.** The raw materials used included medium-plasticity loam, a fluxing component (finely ground glass waste), and crushed foam glass gravel. The properties of the samples were assessed using standardized methods, while statistical and digital techniques were employed for experimental planning and data processing. **Results.** It was found that the optimal conditions include drying at 80 °C and 55% air humidity, followed by firing at 900–950 °C with the introduction of a fluxing component. The optimal values of the factors were determined as follows: foam glass density: 150 kg/m<sup>3</sup>; foam glass consumption: 30 kg/m<sup>3</sup>; optimal particle size of crushed foam glass: 0.68–0.69 mm; fluxing additive content: 8.3–8.4% of the clay mass. These parameters correspond to the following material properties: Average density: 1320–1360 kg/m<sup>3</sup>; Compressive strength: 15–16 MPa; Thermal conductivity: 0.15–0.16 W/(m·°C); Frost resistance grade: F35. **Discussion.** The use of digital methods revealed the influence of variable factors on the material's properties (strength, density, and thermal conductivity), which was confirmed through model validation in active experiment series and structural analysis of the material. **Conclusion.** This research has established a methodological framework for predicting the properties of ceramic products and optimizing their composition using digital methods. Requirements for optimizing the properties of foam glass based products were determined, including guidelines for the consumption of foam glass and fluxing agents. The resulting materials fully comply with the relevant standards for such products. The lightweight brick exhibits both structural and thermal insulation properties, making it suitable for use as a wall material.

**KEYWORDS:** ceramic brick, crushed foam glass, glass waste, digital optimization, statistical planning

**ACKNOWLEDGMENTS:** The research was carried out as part of the research work on the topic of the Federal Research Institute of the Russian Academy of Natural Sciences No. 3.1.2.1 "Development of the theoretical foundations for the production of particularly light inorganic building materials and the study of the effect of porous structure on their thermophysical and acoustic characteristics", carried out on behalf of the Ministry of Construction of Russia. The research was conducted at the experimental base of JSC ROCWOOL. Part of the research was carried out at the National Research Moscow State University of Civil Engineering as part of the implementation of the University's Development Program "PRIORITY 2030". Project 3.1 "Scientific breakthrough in the construction industry — new technologies, new materials, new methods".

## FOR CITATION:

Zhukov A.D., Nikolaev D.R., Zhuk P.M., Medvedev A.A., Yefimov B.A., Bobrova E.Yu. Optimization of the properties of lightweight ceramic products using statistical methods. *Nanotechnologies in construction*. 2026;18(2):149–158. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-149-158>. – EDN: WQVXIC.

## ВВЕДЕНИЕ

Керамические изделия применяются в строительстве в течение тысячелетий. В конце XX века, с принятием новых теплотехнических норм, керамические стеновые изделия перестали удовлетворять требо-

ваниям по теплопроводности, а кладки — по термическому сопротивлению. Отметим, что кладка кирпичной стены в 2–2,5 кирпича вполне удовлетворяла требованиям комфортности, но новые нормативы оказались недостижимыми для стен из полнотелого кирпича. В связи с этим для большинства регионов

были рекомендованы слоистые кладки, включающие эффективные теплоизоляционные элементы: плитные изделия на основе каменной ваты или экструзионного пенополистирола, при этом стоимость строительства значительно возрастала [1–3].

Принятое направление на повышение энергетической эффективности дало стимул развитию технологий керамических изделий, имеющих меньшую плотность при сохранении уровня прочностных характеристик и морозостойкости материалов: пустотных изделий и поризованной стеновой керамики. Изделия легкой керамики имели меньшую теплопроводность, что повышало их теплотехнические характеристики и меньшую массу, что снижало нагрузку на фундамент [4–6]. Получение легких (теплоизоляционно-конструкционных) стеновых материалов могло осуществляться несколькими способами. Во-первых, за счет повышения пустотности изделий до некоторого предела. Во-вторых, за счет поризации изделия на стадиях формования, сушки, обжига. Третий (комбинированный) способ объединял два первых [7–9].

Формирование высокопористого керамического черепка может осуществляться по методу выгорающих добавок, за счет введения древесных опилок или отсева пенополистирола. Вторым по значимости способом является увеличение пористости керамического кирпича за счет создания ячеистой структуры в процессе газообразования или смешения со специальными пенами [10–12]. Как разновидность этого способа может быть рассмотрено получение керамических аэрогелей [13, 14]. Сложности для материалов этой группы обусловлены необходимостью создания специальных пен, а также мягких режимов сушки, то есть при невысоких температурах и скоростях теплоносителя. В противном случае существовала опасность неравномерной усадки и оседания или растрескивания керамического сырца.

Решение проблемы получения легких материалов при сохранении качественных характеристик возможно за счет введения в их состав на стадии приготовления смесей легких наполнителей. В качестве подобного легкого заполнителя могут использоваться гранулированные горнопромышленные отходы различного вида [15, 16], а также отходы тепловых электростанций [17, 18]. Перспективные результаты получены за счет применения особо легких микросфер различной природы [19–21]. В качестве высокопористых заполнителей могут применяться вспученный вермикулит и вспученный перлитовый песок. Перлитовый песок имеет высокое водопоглощение, что значительно увеличивает длительность сушки полуфабриката. Некоторыми исследователями отмечена целесообразность применения обжигового пеностекла [22–24]. Плитное пеностекло

в промышленных масштабах в РФ не производится, но выпускается пеностекольный щебень, целесообразность применения которого обусловлена его относительно невысоким водопоглощением и сопоставимостью характеристик с керамическим черепком.

Технология керамических изделий включает технологические переделы подготовки сырья, формования, сушки и обжига [25–27]. Продолжительность сушки изделий зависит от свойств глиняной смеси, относительной влажности теплоносителя, размера, вида и конфигурации изделия, температурного режима сушки, конструктивных особенностей сушильных устройств. Продолжительность сушки изделий колеблется в промышленных сушилах или сушильных сараях от 2 до 20 сут., а в лабораторных сушильных шкафах от 6 до 48 ч. Температурный режим обжига кирпича и эффективных керамических камней условно разделяется на четыре периода: досушки (температура до 200 °С), подогрева (700–800 °С), собственно обжига (900–1050 °С), остывания (охлаждения до 40–50 °С). В случае использования измельченного пеностекла важным является коррекция температуры спекания керамического черепка, которая может осуществляться за счет введения плавной, в том числе тонкомолотого стеклобоя [28–30].

С учетом данных анализа рецептур и технологий теплоизоляционно-конструкционных изделий строительной керамики сформулирована цель исследований: разработка методики определения и оптимизации рецептур легкого керамического кирпича, которая основана на нормативных требованиях по прочностным характеристикам, плотности и теплопроводности изделий.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Основными компонентами смеси для изготовления легкого керамического кирпича являются: суглинок, дробленое пеностекло, молотый стеклобой; для коррекции температуры спекания используют тонкомолотые отходы стекла (флюсующий компонент), по своему составу близкие к сырью для производства пеностекла. Подготовка сырьевых материалов осуществлялась согласно общепринятой технологии. Формование керамического кирпича осуществлялось пластическим способом, формовочная влажность массы 22–24%.

Суглинок имеет крупнодисперсную структуру, комковатую текстуру. Легко поддается дроблению, хорошо размокает в воде. Суглинок относится к группе умеренно пластичного сырья (число пластичности 12–19), малочувствительного к сушке. Суглинок является полиминеральным сырьем. Содержание оксидов SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> соответственно 52–53% и 11–12%; потери при прокаливании 7–8%. Глинистое веще-

## СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

ство представлено каолинитом (6–15%), монтмориллонитом (10–18%), гидрослюдой (5–12%) в качестве примеси присутствует кварц.

Пеностекло – это обжиговый материал средней плотностью от 80 кг/м<sup>3</sup> до 200 кг/м<sup>3</sup>. Для получения теплоизоляционного пеностекла чаще всего применяют стекломассы, по химическому составу близкие к алюмомагнезиальному оконному стеклу. Эти стекла содержат % по массе: SiO<sub>2</sub> 72–73; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,5–1; MgO 3,5–4; CaO 6–6,5; Na<sub>2</sub>O 15,5–15,5; SO<sub>3</sub> 0,3–0,5. Стеклольные шихты могут спекаться в температурных пределах: от 600 до 1000 °С. Насыпная плотность щебня из пеностекла 130–170 кг/м<sup>3</sup>; истинная плотность – 2180 кг/м<sup>3</sup>; водопоглощение по объему 2,7–4,4%. Теплопроводность в сухом состоянии составляет 0,08 Вт/(м·°С); приращение теплопроводности на 1% влажности – 0,001 Вт/(м·°С).

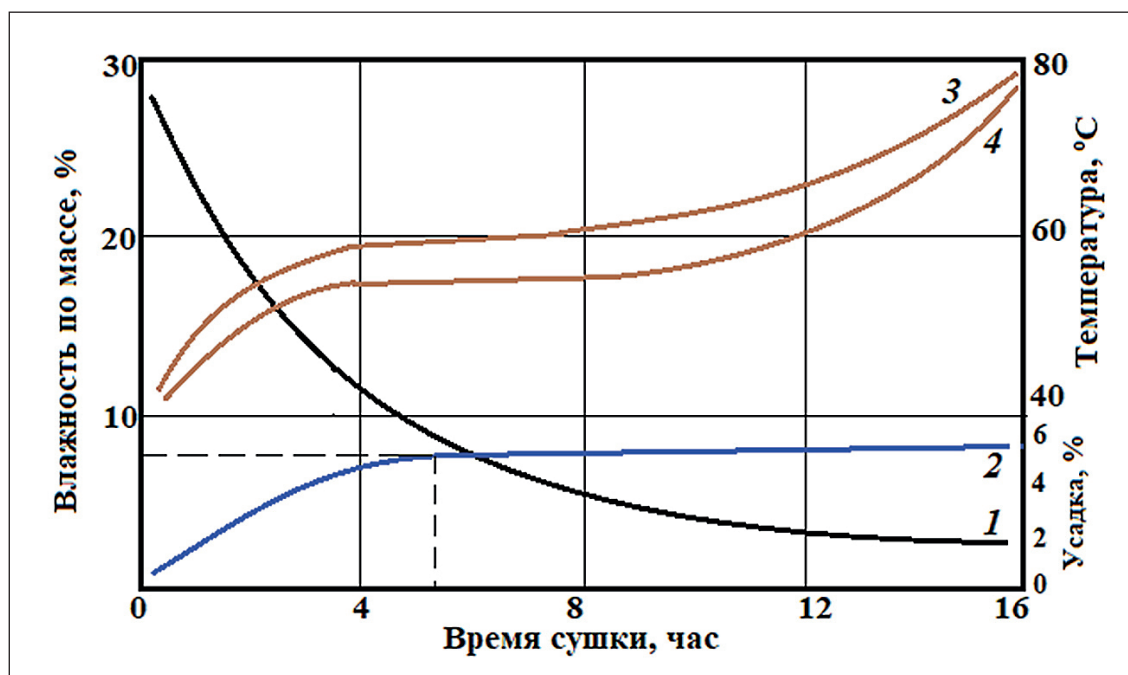
Реализация поставленной цели основывалась на решении следующих задач. Во-первых, необходимо было изучить закономерности сушки проектируемых изделий. Во-вторых, с применением статистических методик изучить влияние рецептурных параметров на свойства изделий. В-третьих, с использованием цифровых методов разработать методику оптимизации состава легкого керамического кирпича.

Теоретически процесс сушки характеризуется тремя периодами: нагревом, постоянной и падающей скоростями сушки. В реальных изделиях за счет геометрического фактора и в условиях контакта те-

плоносителя с изделием в пяти плоскостях (одна ложка плоскость прилегает к поддону) период постоянной скорости сушки может быть слабо выраженным.

Общая динамика процесса сушки приведена на рис. 1. Усадка изделий по длине и ширине не велика, поэтому следует считать, что изделия имеют ограниченную чувствительность к сушке. Зависимость продолжительности сушки от температуры и скорости теплоносителя позволяет применять более жесткие режимы по сравнению с пенокерамикой. Начальная температура теплоносителя, с одной стороны, интенсифицирует процесс сушки, а с другой, оказывает влияние на качество изделий. При температуре теплоносителя до 80 °С усадка образцов не превышает 6%, и изделия сохраняют высокое качество.

Образцы изготавливались размерами 50×50×50 мм. Сушка осуществлялась в лабораторном сушильном шкафу при температуре 80 °С и относительной влажности среды 50–55%; срок сушки – 12 час. Обжиг изделий осуществляли в муфельной печи при расчетной температуре 900–950 °С. Режим обжига: поднятие температуры от 18 до 100 °С – 15 мин, выдержка при 100 °С – 10 мин, поднятие температуры до 650 °С – 120 мин, выдержка при температуре 650 °С – 60 мин, поднятие температуры до расчетной 120 мин, выдержка при расчетной температуре – 120 мин; естественное остывание в печи.



**Рис. 1.** Сушки керамических образцов на пеностекле (характеристики теплоносителя: температура 80 °С, относительная влажность 40 %): 1 – кривая сушки; 2 – сушильная усадка; 3, 4 – температура верх и середины образца

Основной методологии исследования влияния характеристики пеностекла и флюсующего компонента на свойства изделий были цифровые методики планирования и обработки результатов эксперимента [31, 32], а также метод аналитической оптимизации, разработанный в НИУ МГСУ и опробованный при решении рецептурных и технологических задач для многих видов строительных материалов [33, 34].

В качестве варьируемых факторов приняты характеристики измельченного пеностекла: средняя плотность ( $X_1$ ), расход ( $X_2$ ) и средний размер частиц ( $X_3$ ), а также расход тонкоголового боя стекла как флюсующего компонента ( $X_4$ ). В качестве функций отклика – прочность изделия при сжатии ( $Y_1$ , МПа), его средняя плотность ( $Y_2$ , кг/м<sup>3</sup>) и теплопроводность в сухом состоянии ( $Y_3 = \lambda \cdot 10^{-3}$  Вт/(м·°С)). Значения функций отклика определялись по методикам ГОСТ 530-2012.

После проведения предварительных серий экспериментов были определены оптимальные условия тепловой обработки и установлены интервалы варьирования факторов. Условия эксперимента представлены в табл. 1. В эксперименте была принята полная квадратичная матрица D-оптимального плана. В каждой строке плана опыт повторялся 5 раз ( $n = 5$ ). Для снижения вероятности влияния помех и неучтенных факторов использовался метод рандомизации последовательности опытов.

Уравнения регрессии получены в результате обработки экспериментальных данных, которая осуществлялась в программе Statistika. Проверка значимости коэффициентов проводилась по величине доверительных интервалов по прочности и по плотности материала. Величина доверительного интервала определялась по критерию Стьюдента для 5 опытов и дисперсии параллельных опытов. Доверительные интервалы ( $\Delta b$ ) составили по прочности – 0,2 МПа, по средней плотности – 9 кг/м<sup>3</sup>, по теплопроводности – 9 кг/м<sup>3</sup>, по теплопроводности – 0,004 Вт/(м·°С). Коэффициенты уравнений регрессии, меньшие по абсолютной величине соответствующих значений доверительных интервалов, рассматривались как незначимые и приравнивались к 0.

**Таблица 1.** Условия трехфакторного эксперимента

Наименование фактора	Символ $X_i$	Среднее значение фактора, $\bar{X}_i$	Интервал варьирования, $\Delta X_i$	Значения фактора на уровнях	
				-1	+1
Средняя плотность пеностекла, кг/м <sup>3</sup> ( $\rho_n$ )	$X_1$	120	40	80	160
Расход пеностекла, кг/м <sup>3</sup> ( $P_n$ )	$X_2$	36	8	28	44
Средний размер частиц пеностекла, мм ( $d_n$ )	$X_3$	0,5	0,2	0,3	0,7
Содержание флюсующего компонента, % ( $C_\phi$ )	$X_4$	10	2	8	12

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам активного эксперимента получены базовые уравнения регрессии. Проверка значимости коэффициентов проводилась по величине доверительных интервалов по прочности и по плотности материала. Величина доверительного интервала определялась по критерию Стьюдента (t-критерия) для 5 опытов ( $n = 5$ ) и дисперсии параллельных опытов. Доверительные интервалы ( $\Delta b$ ) составили по прочности – 0,2 МПа, по средней плотности – 9 кг/м<sup>3</sup>, по теплопроводности – 9 кг/м<sup>3</sup>, по теплопроводности – 0,004 Вт/(м·°С). Коэффициенты уравнений регрессии, меньшие по абсолютной величине соответствующих значений доверительных интервалов, рассматривались как незначимые и приравнивались к 0.

Базовые уравнения регрессии получены в интервалах изменения варьируемых факторов (табл. 1) для прочности и средней плотности и теплопроводности:

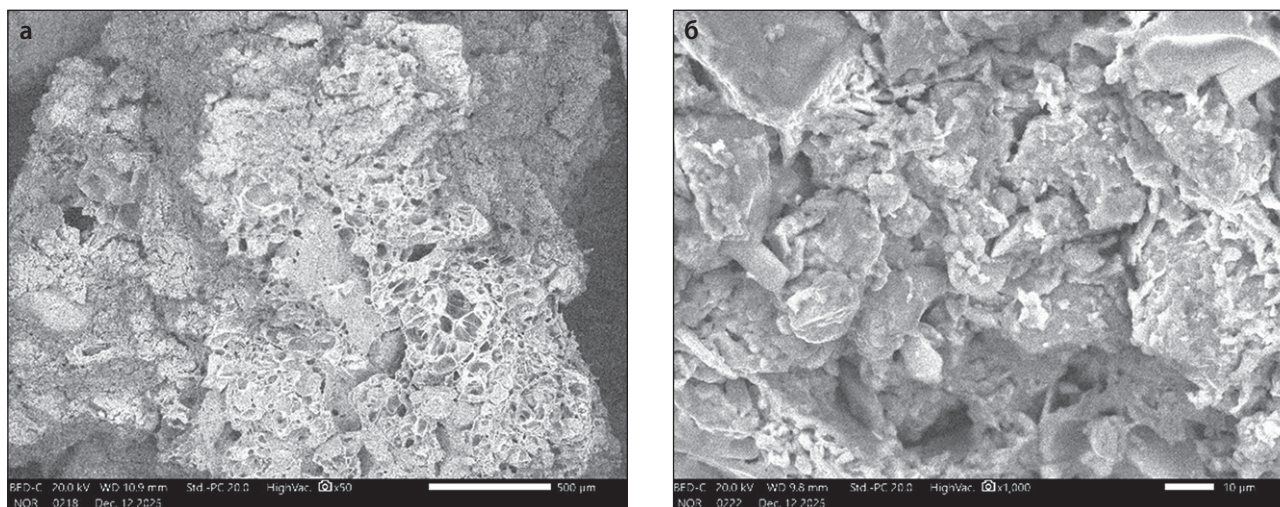
$$Y_1 = 13,6 + 0,8X_1 - 1,7X_2 + 0,7X_3 + 0,5X_4 + 0,6X_2X_3 - 0,4X_3^2 - 0,3X_4^2; \quad (1)$$

$$Y_2 = 1378 + 18X_1 - 51X_2 + 14X_3 + 8X_2X_3; \quad (2)$$

$$Y_3 = 144 + 14X_1 - 7X_2 + 4X_1X_2. \quad (3)$$

Оценка адекватности на начальном уровне проводилась сравнением расчетных и экспериментальных значений критерия Фишера (F-критерия) и далее в результате реализации контрольных серий активного эксперимента.

Анализ базовых уравнений регрессии показывает, что наибольшее влияние на прочность оказывают характеристики пеностекла (коэффициенты при  $X_1$  и  $X_2$ ) и его расход (коэффициент при  $X_3$ ), а также парное влияние расхода пеностекла и размера его частиц (коэффициент при  $X_2X_3$ ). Значимым также является содержание флюсующего компонента (коэффициент при  $X_4$ ). Характер подобного влияния можно объяснить структурой получаемого материала (рис. 2). Корректирующее действие молотого



**Рис. 2.** Структура материала (а) и керамического черепка (б) при увеличении: а – в 50 раз; б – в 1000 раз

стеклобоя как флюсующего компонента, снижающего температуру спекания керамического черепка, что делает возможным спекание частиц пеностекла с керамической матрицей без разрушения (расплавления) частиц пеностекла и сохранения ими пористой структуры обожженного материала. Средняя плотность материала и его теплопроводность определяются характеристиками и расходом дробленого пеностекла (полиномы 2 и 3).

Значения коэффициентов полинома 1 позволяют сделать вывод об экстремальном влиянии размера частиц пеностекла и расхода флюсующего компонента на прочность изделия (коэффициенты при  $X_3^2$  и  $X_4^2$ , равные соответственно  $-0,4$  и  $-0,3$ ). С учетом того, что проверка полиномов (1–3) по F-критерию показала их адекватность и как статистических полиномов, и как алгебраических моделей, то для их изучения возможно применение методов алгебраического анализа нелинейных функций четырех переменных. Это делает возможным и целесообразным применение метода аналитической оптимизации.

### Оптимизация по фактору $X_3$ (средний размер частиц пеностекла)

1. Определяем частную производную функции  $Y_1(X_1, X_2, X_3, X_4)$  по переменной  $X_3$ , приравниваем результат 0 и находим оптимальное значение среднего размера частиц пеностекла ( $d_{II}$ ):

$$\partial Y_1 / \partial X_3 = 0,7 - 0,8X_3 \Rightarrow X_3 = 7/8 = 0,88.$$

Натуральную величину оптимального размера части пеностекла определяем, используя данные таблицы 1:

$$d_{II} = 0,5 + 0,88 \times 0,2 = 0,68 - 0,69 \text{ мм.}$$

2. Определяем частную производную функции  $Y_1(X_1, X_2, X_3)$  по переменной  $X_4$ , приравниваем результат 0 и находим оптимальное значение расхода флюсующего компонента ( $P_{ф}$ ):

$$\partial Y_1 / \partial X_4 = 0,5 - 0,6X_4 \Rightarrow X_4 = 5/6 = 0,83.$$

Натуральную величину расхода флюсующего компонента (плавня) определяем, используя данные таблицы 1:

$$P_{фк} = 10 + 0,83 \times 2 = 8,3 - 8,4\% \text{ от массы глины.}$$

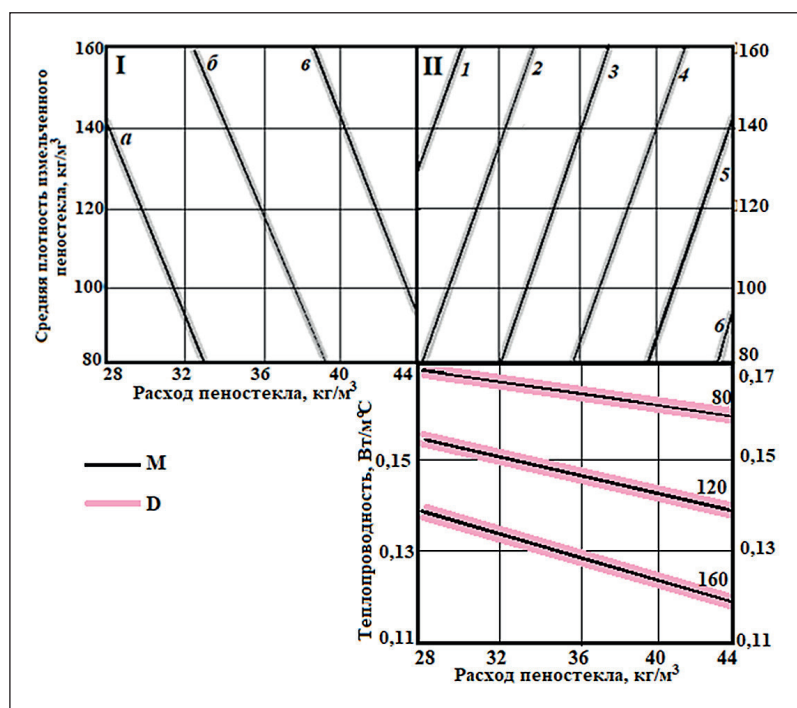
3. Осуществляем оптимизацию алгебраических полиномов (1–3) по оптимальным размерам частиц пеностекла и по содержанию плавня и получаем оптимизированные модели:

$$Y_1 = 14,1 + 0,8X_1 - 1,2X_2; \quad (4)$$

$$Y_2 = 1390 + 18X_1 - 37X_2; \quad (5)$$

$$Y_3 = 144 - 14X_1 - 7X_2 - 4X_1X_2. \quad (6)$$

Зависимости (формулы 4–6) стали основой для формирования номограммы (рис. 3). Варьируемыми факторами являются средняя плотность и расход пеностекла; средний размер частиц пеностекла и содержание флюсующего компонента имеют фиксированные значения, полученные в результате оптимизации. В секторах номограммы устанавливается взаимосвязь между функцией отклика и варьируемыми факторами: в секторе I – для средней плотности обожженных керамических изделий; в секторе II – для прочности на сжатие; в секторе III – для теплопроводности. Средний размер частиц пеностекла  $0,68-0,69$  мм; содержание флюсующего компонента (плавня) =  $8,3-8,4\%$  от массы глины.



**Рис. 3.** Номограмма для прогнозирования параметров и подбор состава изделий при оптимальном размере частиц пеностекла, равном 0,68–0,69 мм, и содержании плавня 8,3–8,4% от массы глины. Средняя плотность, кг/м<sup>3</sup>: а – 1320; б – 1360; в – 1400. Прочность при сжатии, МПа: 1 – 18; 2 – 17; 3 – 16; 4 – 15; 5 – 14; 6 – 13; Средняя плотность пеностекла, кг/м<sup>3</sup>: 80, 120, 160; М – среднее значение результата (математическое ожидание); D – отклонение от среднего значения

Определялось среднее значение результата (математическое ожидание), а отклонение от среднего (разброс результатов или дисконт) принимался приближенным к нормальному распределению (распределению Гаусса). С помощью номограммы (рис. 3) прямая задача цифрового моделирования (прогнозировании свойств изделий по задаваемым значениям варьируемых факторов) решается графически. Обратная задача (определение оптимальных значений факторов) решается аналитически и в результате реализации контрольных серий эксперимента.

В соответствии с прогнозами свойств изделий, полученными из номограммы (рис. 3), были проведены контрольные формовки (контрольный активный эксперимент), результаты которого представлены в таблице 2. Варьировались средняя плотность и расход пеностекла; размер частиц пеностекла и содержание плавня принимались на оптимальном уровне. В качестве параметра оценки была принята прочность образцов на сжатие.

Контрольные серии натурального эксперимента позволили сформулировать следующие выводы. Во-первых, средняя ошибка, то есть разница между расчетными и экспериментальными значениями, не превышает 1,6%, что подтверждает адекватность модели и достоверность полученных результатов. Во-вторых, наилучшие прочностные показатели соответствуют условиям эксперимента № 7; расчетная прочность, полученная из уравнения (4) – 15,9 МПа, экспериментальная – 16,1 МПа;  $\Delta = 1,3\%$ .

Оптимальными приняты следующие значения факторов, варьируемых в эксперименте: средняя

плотность пеностекла 150 кг/м<sup>3</sup>; расход пеностекла 30 кг/м<sup>3</sup>; оптимальный размер частиц измельченного пеностекла, равный 0,68–0,69 мм; содержание флюсующей добавки (плавня) 8,3–8,4% от массы глины. Этим значениям соответствуют следующие характеристики образцов: средняя плотность 1320–1360 кг/м<sup>3</sup>; прочность на сжатие 15–16 МПа; теплопроводность 0,15–0,16 Вт/(м·°C). Отдельно определялась марка по морозостойкости: F35.

Полученные в лабораторных условиях образцы по своим свойствам вполне соответствуют требованиям, предъявляемым к конструктивно-теплоизоляционным материалам. Следующим этапом исследований будет апробация в условиях действующего производства, а также разработка рекомендаций по применению изделий легкой керамики, а также изучение возможности теплоизоляционно-конструкционных керамических изделий меньшей плотности. Легкий кирпич может быть использован в кладках стен, но применение его в фундаментах не рекомендуется. Возможно изготовление керамических изделий как полнотельными, так и с пустотами, а также изготовление модульного керамического кирпича и крупноформатных керамических камней.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

Использование цифровых методик при планировании эксперимента и обработке его результатов позволяет значительно сократить материалоемкость и объемы исследований без ущерба для получаемых результатов. При этом является обязательной про-

Таблица 2. Результаты контрольного эксперимента

№ опыта	Условия эксперимента		Прочность на сжатие, МПа		Ошибка Δ, %
	Средняя плотность пеностекла, кг/м <sup>3</sup>	Расход пеностекла, кг/м <sup>3</sup>	Расчётная	Экспериментальная	
1	150	42	13,7	13,5	1,5
2	120	42	13,0	13,2	1,5
3	90	429	12,3	12,5	1,6
4	150	36	14,8	14,6	1,4
5	120	36	14,1	14,4	2,2
6	90	36	13,4	13,6	1,5
7	150	30	15,9	16,1	1,3
8	120	30	15,2	15,0	1,4
9	90	30	14,5	14,2	2,1
			Средняя Δ, %		1,6

верка полученных данных в контрольном натурном эксперименте.

По результатам исследований оптимальными приняты следующие значения факторов, варьируемых в эксперименте: средняя плотность пеностекла 150 кг/м<sup>3</sup>; расход пеностекла 30 кг/м<sup>3</sup>; оптимальный размер частиц измельченного пеностекла, равный 0,68–0,69 мм; содержания флюсующей добавки (плавня) 8,3–8,4% от массы глины. Этим значениям соответствуют следующие характеристики образцов: средняя плотность 1320–1360 кг/м<sup>3</sup>; прочность на сжатие 15–16 МПа; теплопроводность

0,15–0,16 Вт/(м·°С); марка по морозостойкости: F35.

В результате исследований разработаны основы методики прогнозирования свойств керамических изделий, сформированы требования по оптимизации свойств пеностекла, а также по расходам пеностекла и флюсующего компонента. Полученные материалы вполне соответствуют требованиям к конструкционно-теплоизоляционным изделиям. Легкий кирпич на основе пеностекла может быть использован в теплоэффективных кладках стен. Применение легкого кирпича в фундаментах не рекомендуется.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гагарин В.Г. Макроэкономические аспекты обоснования энергосберегающих мероприятий при повышении теплозащиты ограждающих конструкций зданий. *Строительные материалы*. 2010;3:8–16.
2. Лесовик В.С., Гридчин А.М., Алфимова Н.И. *Строительные материалы и изделия: учеб. пособ. по направлению 270100 «Строительство» Белгород: Изд-во БГТУ*. 2011;222 с. ISBN: 978-5-361-00161-3. EDN: QNPZOB
3. Рубцов О.И., Боброва Е.Ю., Жуков А.Д., Зиновьева Е.А. Керамический кирпич, камни и полнокирпичные стены *Строительные материалы*. 2019; 9:8–13. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-8-13> EDN: FAPNHW
4. Завадский В.Ф., Путьро Н.Б. Поризованная строительная керамика. – Новосибирск: Сибстрин, 2005. – 100 с. ISBN: 5-7795-0279-X. EDN: QNEAUV
5. Hammel E.C., Ighodaro O.L.R., Okoli O.I. Processing and properties of advanced porous ceramics: An application-based review. *Ceramics International*. 2014;40(10):15351–15370. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.06.095>
6. Kiani S., Jafarzadeh M. Glass Ceramic Foams from Alkali-Activated Vitrified Bottom Ash and Waste Glasses. *Applied Sciences*. 2020. <https://doi.org/10.3390/app10165714>
7. Кудрявцев П.Г. Основные пути создания пористых композиционных материалов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2020;12(5):256–269. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-5-256-269>. – EDN: АКJMVА
8. Li H., Li C., Wu L. et al. In-situ synthesis and properties of porous cordierite ceramics with adjustable pore structure. *Ceramics International*. 2020;46(10):14808–14815. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.005>
9. Кудрявцев П.Г. Состав и структура пористых термостойких неорганических композиционных материалов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2018;10(4):75–100. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-75-100>. – EDN: ХWХTRB
10. Синицин Д.А., Шаяхметов У.Ш., Рахимова О.Н., Халиков Р.М., Недосеко И.В. Наноструктурированная пенокерамика строительного назначения: технология производства и применения. *Нанотехнологии в строительстве*. 2021;13(4):213–221. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221>. – EDN: WАQMDB

11. Shagataev S., Ibragimov T. *Preparation of Porous Ceramic Building Decoration Materials by Foaming Method and Research on Nanomechanical Properties*. Hindawi; 2022. <https://doi.org/10.1155/2023/9897809>
12. Long X., Deng Y. Glass-Ceramic Foams from Weak Alkali Activation and Gel-Casting of Waste Glass. *Fly Ash Mixtures*. PMC; 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12040588>
13. Байков И.Р., Смородова О.В., Трофимов А.Ю., Кузнецова Е.В. Экспериментальное исследование теплоизоляционных нано материалов на основе аэрогелей. *Нанотехнологии в строительстве*. 2019;11(4):462–477. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-4-462-477>. EDN: UJZLCI
14. Кукса П.Б., Акберов А.А. Высокопористые керамические изделия, полученные нетрадиционным способом. *Строительные материалы*. 2004;2:34–35. EDN: IBELZZ
15. Суворова О.В., Манакова Н.К. Утилизация горнопромышленных отходов Кольского полуострова с получением гранулированного пористого материала. *Экология промышленного производства*. 2014;1:2–5. EDN: RURMCV
16. Sushkevich, K., et al. *Heat-insulating porous material based on glauconite-containing sands and aleurites of the Novodvorskoye deposit of the Republic of Belarus*. Vestichem; 2021. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-4-463-471>
17. Пилипенко А.С., Каддо М.Б., Асаматдинов М.О., Турганбаев Б.Б. Теплая керамика на основе местного сырья Республики Каракалпакстан. *Строительные материалы*. 2022;11:86–91. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-86-91>. – EDN: CNAIGR
18. Homeishi F. *Foam Glass and Foam Materials Based on Ash-Slag Wastes from Thermal Power Plants*. Review. SpringerLink; 2019. <https://doi.org/10.1007/s10717-019-00162-x>
19. Колдомасова И.В., Козлов А.В., Каклюгин А.В. Крупноразмерные ячеистые керамические материалы с использованием алюмосиликатного микросферического наполнителя и минеральных волокон // «Строительство-2005»: Материалы междунар. науч.-практ. конф. Ростов-н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2005. С. 9–10.
20. Кудрявцев П.Г. Состав и структура пористых термостойких неорганических композиционных материалов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2018;10(4):75–100. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-75-100>. – EDN: XWXTRB
21. Сапелин А.Н. Сорбционные свойства стеновых материалов с применением микросфер. *Academia. Архитектура и строительство*. 2013;3:101-104. EDN: RHTVYB
22. Fomina O.A., Stolboushkin A.Y. Firing of cellular ceramics from granulated foam-glass. *Materials Science Forum*. 2020; 992 265-270. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.265>.
23. Жук П.М., Жуков А.Д. Нормативно-правовая база экологической экспертизы строительных материалов: перспективы совершенствования. *Экология и промышленность России*. 2018;22(4):52-57. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-4-52-57>. – EDN: YWJROQ
24. Hanifen N., Alshaaer M., Mijinyawa Y. Preparation and Characterization of Glass-Ceramic Foam from Clay-Rich Waste Diatomaceous Earth. *Materials*. 2022;15:4. <https://doi.org/10.3390/ma15041384>
25. Jianhua Zhao, Shuo Feng, John Grunewald, Frank Meissner, Jiehui Wanga Drying characteristics of two ca-pillary porous building materials: Calcium silicate and ceramic brick. *Building and Environment*. 2022;109006. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109006>
26. Станевич В.Т. Строительная керамика: учебное пособие / В.Т. Станевич. Павлодар : Керекү, 2008. 96 с. ISBN 9965-583-89-7
27. Горбунов Г.И., Жуков А.Д. Научные основы формирования структуры и свойств строительных материалов [Электронный ресурс] : монография. Электрон. дан. и прогр. (11 Мб). Москва: НИУ МГСУ, 2016. ISBN 978-5-7264-1318-1. EDN: XNAIDR
28. Borrelli A., D'Amore M. The role of glass waste in the production of ceramic-based products and other applications: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.185>
29. Столбоушкин А.Ю., Фомина О.А. Влияние температуры обжига на формирование структуры ячеистой керамики со стеклокристаллическим каркасом. *Строительные материалы*. 2019;4:20-26. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-20-26>. – EDN: RFHQDJ
30. Столбоушкин А.Ю., Истерин Е.В., Фомина О.А. Необходимость повышения эффективности керамических материалов с матричной структурой для наружных стен зданий. *Строительные материалы*. 2022;8:4–11. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-4-11>. – EDN: SKAFSX
31. Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Бессонов И.В., Медведев А.А., Демиссе Б.А. Применение статистических методов для решения задач строительного материаловедения. *Нанотехнологии в строительстве*. 2020;12(6):313–319. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319>. – EDN: OISNYO
32. Бессонов И.В., Жуков А.Д., Говряков И.С., Горбунова Э.А. Моделирование структуры высокопористых материалов. *Жилищное строительство*. 2024;6:36–42. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-6-36-42>. – EDN: PFEGZX
33. Бессонов И.В., Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Горбунова Э.А., Говряков И.С. Оптимизация свойств и структуры особолегких материалов с применением цифровых методов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(2):109-118. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-109-118>. – EDN: WXZIJJ
34. Жуков А.Д., Артеменко С.О., Жук П.М., Боброва Е.Ю., Медведев А.А. Малоэнергоемкое связующее для изделий на основе каменной ваты. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(4):377–388. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-4-377-388>. – EDN: BORGVT.

## СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Жуков Алексей Дмитриевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация; ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, 127238, Москва, Локомотивный пр., 21., Российская Федерация; член-корреспондент Российской инженерной академии, 125009, Москва, Газетный пер., 9, стр. 4, lj211@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0593-3259>

**Николаев Даниил Романович** – аспирант кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация; специалист отдела управления проектами компании «ШУКО Интернационал Москва», 141402, Химки, Ленинградская ул., вл. 39 с. 5, Российская Федерация, nikolaev.daniil.2002@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7216-7152>

**Жук Петр Михайлович** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Архитектурное материаловедение, Московский архитектурный институт, 107031, Москва, ул. Рождественка, 11, стр. 2, Российская Федерация, peter\_05@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6257-4710>

**Медведев Андрей Александрович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация; доцент кафедры геофизики, Российский геологоразведочный университет, 117485, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, Российская Федерация, medvedev747@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2930-2606>

**Ефимов Борис Александрович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, boris.alexandr.efimov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8438-6742>

**Боброва Екатерина Юрьевна** – кандидат экономических наук, доцент факультета городского и регионального развития, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 109028, Москва, Покровский бул., 11, стр. 10, Российская Федерация; доцент кафедры испытания сооружений, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация; член-корреспондент Российской инженерной академии, 125009, Москва, Газетный пер., 9, стр. 4, mla-gasis@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6541-4552>

## ВКЛАД АВТОРОВ:

**Жуков Алексей Дмитриевич** – научное руководство, разработка концепции исследования, написание исходного текста;

**Николаев Даниил Романович** – реализация эксперимента и обработка его результатов, в том числе с применением цифровых методик;

**Жук Петр Михайлович** – литературный обзор, промежуточные выводы, адаптация методологии к задачам исследования;

**Медведев Андрей Александрович** – разработка методологии моделирования и оптимизация цифровых решений;

**Ефимов Борис Александрович** – аналитическая обработка литературного обзора;

**Боброва Екатерина Юрьевна** – развитие методологии исследования, итоговые выводы, общая редакция и доработка текста.

## Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.03.2026; одобрена после рецензирования 08.04.2026; принята к публикации 12.04.2026.