

УДК 691.421

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 67.09.31

Научная специальность ВАК: 2.1.5 Строительные материалы и изделия (технические науки)

EDN mokfvn

DOI 10.62980/2076-0655-2026-466-474

## ЛЕГКИЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДРОБЛЕННОГО ПЕНОСТЕКЛА

Николаев Д.Р.<sup>1</sup>, Жуков А.Д.<sup>1,2</sup>, Медведев А.А.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО "Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе"

### АННОТАЦИЯ

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 особолегких заполнителей и, в частности, дробленого пеностекла. В статье приводятся результаты реализации данной технологии и цифровых экспериментов, устанавливающих взаимосвязь между рецептурными характеристиками и свойствами обожжённого керамического материала. Использование цифровых методик позволяет значительно сократить время и материальные расходы при проведении натурных экспериментов, а также использовать методики оценки достоверности получаемых результатов. В результате эксперимента и обработки его результатов получена номограмма с помощью которой стало возможным решение как прогностической задачи (прогнозирования свойств изделий), так и задачи подбора состава исходных глиняных смесей. Образцы обожжённые при температуре 1000–1005 °С имели среднюю плотность 1300 кг/м<sup>3</sup>; предел прочности при сжатии 14,5 МПа; теплопроводность 0,16 Вт/(м·°С). Легкий кирпич может быть использован в теплоэффективных кладках стен, но применение его в фундаментах не рекомендуется.

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

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Николаев Д.Р., Жуков А.Д., Медведев А.А. Легкие керамические изделия с применением дробленого пеностекла // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 5. – С. 466–474. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-466-474>, EDN mokfvn

Type of article - scientific article

OECD 2.01 Civil engineering

FA CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY

EDN mokfvn

DOI 10.62980/2076-0655-2026-466-474

## LIGHTWEIGHT CERAMIC PRODUCTS USING CRUSHED FOAM GLASS

Nikolaev D.R.<sup>1</sup>, Zhukov A.D.<sup>1,2</sup>, Medvedev A.A.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University

<sup>2</sup> Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences

<sup>3</sup> Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting"

### ABSTRACT

Improving the efficiency of ceramic bricks and stones is associated with a reduction in the average density of the products and their corresponding thermal conductivity. One possible approach is to create pores in the ceramic structure using burnout additives or by introducing special foams during the preparation of the ceramic mixture. Another possibility involves introducing ultra-lightweight aggregates, such as crushed foam glass, into the structure. The article presents the results of the implementation of this technology and digital experiments that establish the relationship between the recipe characteristics and the properties of the fired ceramic material. The use of digital methods allows us to significantly reduce the time and material costs of conducting field experiments, as well as to use methods for assessing the reliability of the results obtained. As a result of the experiment and processing of its results, a nomogram was obtained with the help of which it became possible to solve both the prognostic problem (predicting the properties of products) and the problem of selecting the composition of the initial clay mixtures. Samples fired at 1000–1005 °C had an average density of 1300 kg/m<sup>3</sup>; compressive strength of 14.5 MPa; thermal conductivity of 0.16 W/(m·°C). Lightweight brick can be used in thermally efficient masonry walls, but its use in foundations is not recommended.

**KEY WORDS:** ceramic brick, crushed foam glass, digital optimization, statistical planning.

**FOR CITATION:** Nikolaev D.R., Zhukov A.D., Medvedev A.A. Lightweight ceramic products using crushed foam glass // Engineering and Technology of Silicates. – 2025. Vol. – 32, No5. – Pp. 466 – 474. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-466-474>, EDN mokfvn

## ВВЕДЕНИЕ

Обжиговые изделия на основе глин применяются в строительстве в течении тысячелетий. В Россию технология обжиговых керамических материалов и технология строительства из них пришли из Византии. До настоящего времени сохранились фрагменты керамической кладки в Десятинной церкви и действующая с VI века церковь в Керчи. Технологии развивались и одновременно происходило расширение возможностей применения керамического кирпича. Наиболее значимые постройки — это орденский замок Мариенбург и стены российских городов и крепостей, в том числе и стены Московского Кремля. В жилищном строительстве керамический кирпич зарекомендовал себя как прочный, долговечный и морозостойкий и негорючий материал, поэтому уже с XIV века и до наших дней он является одним из наиболее применяемых строительных материалов.

Серьезной проблемой керамического кирпича, которая стала заметной после принятия в конце XX века новых теплотехнических норм стала его сравнительно высокая теплопроводность и соответствующая ей средняя плотность. Отметим, что кладка кирпичной стены в 2-2,5 кирпича вполне удовлетворяла требований комфортности, но с учетом новых требований по термическому сопротивлению стен, установленный нормы оказались недостижимыми для стен из полнотелого кирпича [1, 2].

Для решения этой проблемы существуют три возможности. Во-первых, это повышение пустотности изделий до некоторого предела и не в ущерб прочностным характеристикам. Во-вторых, это поризация полнотелого кирпича. В-третьих, комбинированный способ, объединяющий два первых.

Увеличение пористости керамического кирпича может осуществляться несколькими способами. Классическим из них является способ выгорающих добавок, основанный на введении в глиняные смеси компонентов, которые выгорают в процессе обжига. Основными модификациями этого способа стали методы введения древесных опилок или отсева пенополистирола. Первый оказался неэффективным, в том числе и в виду высокой зольности древесины. Второй способ оказался нерентабельным в связи со снижением выхода отсева по причине внедрения современных и безотходных технологий гранулированного полистирола.

Вторым по значимости способом является увеличение пористости керамического кирпича за счет создания ячеистой структуры. Поризация газообразованием оказалась малоэффективной, а смешение керамических смесей со стойкими пенами позволило получить ряд положительных результатов [3, 4]. Это сделало возможным получение группы пенокерамических материалов как теплоизоляционных, так и теплоизоляционно-конструкционных. Сложности для материалов этой группы обуславливались необходимостью создания специальных пен, а также мягких режимов сушки, то есть при невысоких температурах и скоростях теплоносителя [5, 6]. В противном случае существовала опасность неравномерной усадки и оседания или растрескивание керамического сырца. Введение в состав глиняных пеномасс легких наполнителей, например тонкодисперсных сферических частиц позволяет как снизить время сушки, так и повысить прочность за счет армирующего эффекта. Формовочная смесь армировалась дополнительно тонкодисперсными волокнами. В качестве подобных наполнителей использовались зольные микросферы, диатомит и другие подобные им

## INTRODUCTION

Clay-based fired products have been used in construction for thousands of years. The technology of firing ceramic materials and the technology of construction from them came to Russia from Byzantium. Fragments of ceramic masonry in the Church of the Tithes and a church in Kerch, which has been in operation since the 6th century, have survived to this day. Technologies have developed and at the same time the possibilities for using ceramic bricks have expanded. The most significant buildings are the Order's castle of Marienburg and the walls of Russian cities and fortresses, including the walls of the Moscow Kremlin. In housing construction, ceramic brick has proven itself as a strong, durable, frost-resistant and non-flammable material, which is why, from the 14th century to the present day, it has been one of the most widely used building materials.

A serious problem with ceramic bricks, which became noticeable after the adoption of new thermal engineering standards at the end of the 20th century, was their relatively high thermal conductivity and corresponding average density. It should be noted that laying a brick wall of 2-2.5 bricks fully satisfied the requirements of comfort, but taking into account the new requirements for the thermal resistance of walls, the established standards turned out to be unattainable for walls made of solid brick [1, 2].

There are three possible solutions to this problem. First, increasing the void content of the bricks to a certain limit without compromising their strength. Second, porosity of solid bricks. Third, a combined method combining the first two.

Increasing the porosity of ceramic bricks can be accomplished in several ways. The classic of these is the method of burnout additives, based on the introduction of components into clay mixtures that burn out during the firing process. The main modifications of this method were the methods of introducing wood sawdust or polystyrene foam screenings. The first one turned out to be ineffective, including due to the high ash content of the wood. The second method turned out to be unprofitable due to the decrease in the output of screenings due to the introduction of modern and waste-free technologies of granulated polystyrene.

The second most important method is to increase the porosity of ceramic bricks by creating a cellular structure. Porization by gas formation turned out to be ineffective, and mixing ceramic mixtures with stable foams made it possible to obtain a number of positive results [3, 4]. This made it possible to obtain a group of foam ceramic materials, both thermal insulation and thermal insulation-structural. The difficulties for materials in this group were caused by the need to create special foams, as well as soft drying modes, that is, at low temperatures and coolant speeds [5, 6]. Otherwise, there was a risk of uneven shrinkage and subsidence or cracking of the ceramic adobe. The introduction of lightweight fillers, such as finely dispersed spherical particles, into the composition of clay foams allows for both a reduction in drying time and an increase in strength due to the reinforcing effect. The molding mixture was additionally reinforced with finely dispersed fibers. Ash microspheres, diatomite, and other similar substances were used as such fillers. The products are fired for 26-28 hours at a maximum temperature of 1100°C [7, 8].

вещества. Обжиг изделий осуществляется в течение 26-28 часов при максимальной температуре 1100 °С [7, 8].

Получение изделий повышенной пустотности осуществлялось параллельно с увеличением их объема. Вместо одинарного кирпича делали полуторный или двойной, а дальнейшее совершенствование технологии сделало возможным изготовление керамических камней. Неплохие результаты были получены в результате объединения технологии многопустотных камней с пенным способом (рис. 1) [9, 10].

The production of products with increased emptiness was carried out in parallel with the increase in their volume. Instead of single bricks, they made one-and-a-half or double bricks, and further improvements in technology made it possible to produce ceramic stones. Good results were obtained by combining the technology of hollow stones with the foam method (Fig. 1) [9, 10].

## РИСУНОК 1

### КЕРАМИЧЕСКИЕ КАМНИ [9.10]:

a – пустотный;

б – пустотно-пористый

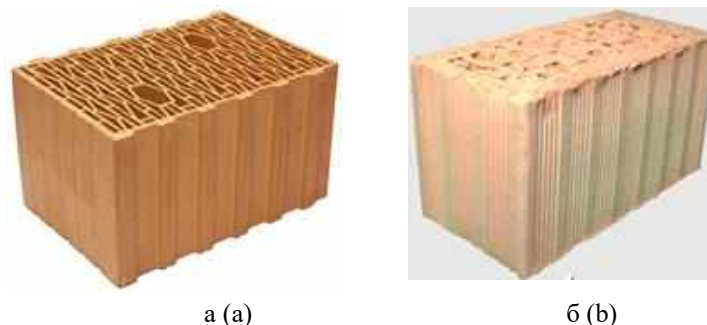


Figure 1

### Ceramic stones [9.10]:

a – hollow;

b – hollow-porous

Легкие керамические камни зарекомендовали себя как материал, который имеет множество полезных свойств. Они очень прочные, являются хорошим теплоизолятором и могут быть использованы в самых разных сферах человеческой деятельности. Проблемой в этом случае стала технология монтажа стен. Во-первых, вес одного керамического камня не позволял его размещать в кладке также легко как одинарный или полуторный облегченный кирпич. Во-вторых, в пустоты мог проваливаться кладочный раствор, что с одной стороны приводило к его повышенному расходу, а с другой — снижало термическое сопротивление конструкции за счет частичного заполнения пустот раствором.

Одним из направлений решения проблем получения изделий относительно низкой плотностью и теплопроводностью при сохранении прочностных и эксплуатационных характеристик могло стать введение легких заполнителей в керамические смеси. Рассматривались различные варианты и приемлемым стало применением вспученного перлитового песка, что позволило сформировать еще одно технологическое направление – технологию перлитокерамических изделий. Перлитовый песок обладает очень высокой и открытой пористостью, что предполагало использованием смесей с повышенным водосодержащим, а следовательно, и длительную сушку сырья [11, 12].

Поиск альтернативных видов заполнителей осуществлялся как в направлениях использования природных пористых материалов (что не привело к положительным результатам), так и в направлениях использования промышленных продуктов или промышленных отходов. В связи с этим на наш взгляд было изучение возможности использования дробленого пеностеклянного щебня, применение которого в настоящее время адаптируется в качестве легкого заполнителя для цементных или бесцементных бетонов [13].

Поризация структуры широко применяется при получении строительных материалов различного назначения [14-18].

Lightweight ceramic stones have proven themselves to be a material with many beneficial properties. They are very durable, are good thermal insulators and can be used in a wide variety of areas of human activity. The problem in this case was the technology of wall installation. Firstly, the weight of one ceramic stone did not allow it to be placed in the masonry as easily as a single or one and a half lightweight brick. Secondly, the mortar could fall into the voids, which, on the one hand, led to its increased consumption, and on the other, reduced the thermal resistance of the structure due to the partial filling of the voids with mortar.

One of the directions for solving the problem of obtaining products with relatively low density and thermal conductivity while maintaining strength and performance characteristics could be the introduction of lightweight fillers into ceramic mixtures. Various options were considered and the use of expanded perlite sand became acceptable, which made it possible to form another technological direction – the technology of perlite ceramic products. Perlite sand has a very high and open porosity, which required the use of mixtures with increased water content and, consequently, long-term drying of the raw material [11, 12].

The search for alternative types of fillers was carried out both in the areas of using natural porous materials (which did not lead to positive results), and in the areas of using industrial products or industrial waste. In this regard, in our opinion, the possibility of using crushed foam glass aggregate, the use of which is currently being adapted as a lightweight filler for cement or cement-free concrete, was studied [13].

Porization of the structure is widely used in the production of building materials for various purposes [14-18].

Thus, based on the results of the above review, a number of conclusions can be drawn:

- firstly, building ceramic products retain their position as one of the most widely used materials.

Таким образом, по результатам приведенного обзора можно сделать ряд заключений:

- во-первых, изделия строительной керамики сохраняют свой положение как одного из наиболее применяемых материалов.

- во-вторых, в случае их применения как стенового материала необходимо снижать их плотность и теплопроводность при сохранении эксплуатационных характеристик.

- в-третьих, наиболее перспективным является использование легкого заполнителя, который позволит сохранить основные характеристик производственного процесса и позволит изготавливать изделия на том же оборудовании при условии сохранения материалом эксплуатационных характеристик при снижении теплопроводность и средней плотности.

**Целью исследований**, изложенных в статье, стало проведение исследований по разработке рецептур и технологии пеностекольных керамических материалов.

### **Методы исследований**

Основой методологии исследований были цифровые методики планирования и обработки результатов эксперимента, а также метод аналитической оптимизации, разработанный в НИУ МГСУ. Концепция аналитической оптимизации [19,20] основана на двух положениях. Во-первых, полученная математическая модель (в виде полинома) соответствует реальному процессу, т.е. описывает его с определенной точностью. Во-вторых, математическая модель является алгебраической нелинейной функцией нескольких переменных, которая может быть использована для выполнения всевозможных операций с аппаратом математического анализа.

Следующие этапы включают в себя интерпретацию полученного оптимизированного полинома (аналитическая, физическая и графическая) с целью проверки или подтверждения расчетных результатов. Далее осуществляется формирование алгоритма технологического процесса с использованием оптимизированных функций и составлением программ для ЭВМ.

Применение в качестве наполнителя измельченного (дробленого) пеностекольного щебня. Не только изменяет условия тепло- и массопереноса при сушке, но и влияет как на свойства материала, так и на режимы обжига легких керамических изделий. Как показывают результаты по оптимизации параметров переменного режима сушки, высокое качество изделий получено при ограничивающим сроке сушки 16 ч. Дробленый пеностекольный щебень полностью совместим с керамическим черепком (в том числе по показателям спекаемости и температурных деформаций) и имеет невысокую среднюю плотность (80 – 140 кг/м<sup>3</sup>).

Технологические параметры обжига легкого керамического сырца непосредственно связаны с составом сырца и исходных керамических смесей, что и было учтено при формировании плана эксперимента.

Оптимизация состава керамической смеси с учетом свойств наполнителя проводилась с помощью цифровых методов в трехфакторном эксперименте. В качестве варьируемых факторов приняты:

- средняя плотность измельченного пеностекла ( $X_1$ );
- расход измельченного пеностекла ( $X_2$ );
- средний размер частиц пеностекла ( $X_3$ ).

В качестве функций отклика – прочность изделия при сжатии ( $Y_1$ ) и его средняя плотность ( $Y_2$ ).

- secondly, if they are used as wall material, it is necessary to reduce their density and thermal conductivity while maintaining their performance characteristics.

- thirdly, the most promising is the use of lightweight filler, which will preserve the main characteristics of the production process and allow the manufacture of products on the same equipment, provided that the material maintains its performance characteristics while reducing thermal conductivity and average density.

**The aim of the research** presented in the article was to conduct research on the development of formulations and technology for foam glass ceramic materials.

### **Research methods**

The research methodology was based on digital methods for planning and processing experimental results, as well as the analytical optimization method developed at the National Research University Moscow State University of Civil Engineering. The concept of analytical optimization [19,20] is based on two provisions. Firstly, the resulting mathematical model (in the form of a polynomial) corresponds to the real process, i.e. describes it with a certain accuracy. Secondly, the mathematical model is an algebraic nonlinear function of several variables, which can be used to perform all kinds of operations with the apparatus of mathematical analysis.

The next steps include the interpretation of the obtained optimized polynomial (analytical, physical and graphical) in order to verify or confirm the calculated results. Next, the algorithm for the technological process is formed using optimized functions and the creation of computer programs.

The use of crushed (crushed) foam glass aggregate as a filler not only alters heat and mass transfer conditions during drying but also influences both the material properties and the firing conditions for lightweight ceramic products. As the results of optimizing the parameters of the variable drying mode show, high quality products were obtained with a drying time limit of 16 hours. Crushed foam glass rubble is completely compatible with ceramic shards (including in terms of sintering properties and temperature deformations) and has a low average density (80–140 kg/m<sup>3</sup>).

The technological parameters for firing light ceramic green bricks are directly related to the composition of the green bricks and the initial ceramic mixtures, which was taken into account when developing the experimental plan.

Optimization of the ceramic mixture composition, taking into account the filler properties, was conducted using digital methods in a three-factor experiment. The following factors were used as variable factors:

- average density of crushed foam glass ( $X_1$ );
- consumption of crushed foam glass ( $X_2$ );
- average particle size of foam glass ( $X_3$ ).

The response functions are the compressive strength of the product ( $U_1$ ) and its average density ( $U_2$ ).

The adequacy of the models was tested using Fisher's criterion; the significance of the coefficients of the regression equations was tested by comparison with the

Адекватность моделей проверялась по критерию Фишера; значимость коэффициентов уравнений регрессии – путем сравнения с доверительным интервалом, определяемом по критерию Стьюдента и дисперсии параллельных опытов.

Сушка образцов 50x50x50 мм проводилась в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре 90 °С при скорости теплоносителя 4 м/с. Длительность сушки составляла 6 часов. Обжиг образцов осуществлялся в лабораторной печи при температуре 1000–1005 °С. Условия эксперимента представлены в таблице 1.

confidence interval determined using Student's t-test and the variance of parallel experiments.

Drying of 50x50x50 mm samples was carried out in a drying oven to constant weight at a temperature of 90 °C with a coolant velocity of 4 m/s. The drying time was 6 hours. The samples were fired in a laboratory furnace at a temperature of 1000–1005 °C. The experimental conditions are presented in Table 1.

**ТАБЛИЦА 1 УСЛОВИЯ ТРЕХФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**  
**Table 1 Conditions of the three-factor experiment**

Наименование фактора Name of the factor	Символ Symbol $X_i$	Среднее значение фактора, Average value of the factor $\bar{X}_i$	Интервал варьирования, Variation interval $\Delta X_i$	Значения фактора на уровнях Factor values at levels	
				-1	+1
Средняя плотность измельченного пеностекла, кг/м <sup>3</sup> Average density of crushed foam glass, kg/m <sup>3</sup>	$X_1$	120	40	80	160
Расход измельченного пеностекла, кг/м <sup>3</sup> Consumption of crushed foam glass, kg/m <sup>3</sup>	$X_2$	36	8	28	44
Средний размер частиц пеностекла, мм Average particle size of foam glass, mm	$X_3$	0,5	0,2	0,3	0,7

**Результаты и их обсуждение**

Были получены уравнения регрессии. После проверки значимости коэффициентов (с доверительным интервалом для прочности 0,2 МПа и средней плотности 9 кг/м<sup>3</sup>) были получены следующие математические модели:

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

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

Мониторинг вычисления регрессии разрешает сделать следующие выводы. На прочность при сжатии (полином 1) наибольшее влияние оказывает расход измельченного пеностекла (коэффициент при  $X_2$ ). Так как прочность пеностекла ниже прочности керамического черепка, то увеличение расхода пеностекла обуславливает снижение прочности. Увеличение плотности пеностекла предполагает также увеличение его прочности, что положительно сказывается на функции отклика (коэффициент при  $X_1$ ). Влияние среднего размера частиц пеностекла влияет на прочность обожжённого образца неоднозначно. При увеличении размеров частиц до определенного значения прочность растет (коэффициент при  $X_3$ ), а при больших значениях начинает снижаться (коэффициент при  $X_3^2$ ). Это может быть связано с плотностью упаковки частиц пеностекла в керамической матрице.

Средняя плотность легкого керамического материала (полином 2) в наибольшей степени зависит от расхода измельченного пеностекла (коэффициент при  $X_2$ ), так как плотность пеностекла ниже плотности керамической матрицы; при этом при увеличении плотности пеностекла плотность материала возрастает (коэффициент при  $X_2$ ). При увеличении размеров частиц пеностекла прочность незначительно, но возрастает (коэффициент при  $X_3$ ), что

**Results and discussion**

Regression equations were obtained. After checking the significance of the coefficients (with a confidence interval for strength of 0.2 MPa and an average density of 9 kg/m<sup>3</sup>), the following mathematical models were obtained:

Monitoring the regression calculations allows us to draw the following conclusions. The consumption of crushed foam glass (coefficient at  $X_2$ ) has the greatest influence on the compressive strength (polynomial 1). Since the strength of foam glass is lower than the strength of ceramic shards, an increase in the consumption of foam glass leads to a decrease in strength. An increase in the density of foam glass also implies an increase in its strength, which has a positive effect on the response function (coefficient at  $X_1$ ). The influence of the average particle size of foam glass on the strength of the fired sample is ambiguous. As particle size increases to a certain value, strength increases (coefficient at  $X_3$ ), but at larger values, it begins to decrease (coefficient at  $X_3^2$ ). This may be due to the packing density of the foam glass particles in the ceramic matrix.

The average density of a lightweight ceramic material (polynomial 2) depends to the greatest extent on the consumption of crushed foam glass (coefficient of  $X_2$ ), since the density of foam glass is lower than the density of the ceramic matrix; however, with an increase in the density of foam glass, the density of the material increases (coefficient of  $X_2$ ). With an increase in the size of foam glass particles, the strength increases slightly (coefficient at  $X_3$ ), which is explained by the higher density of highly crushed foam glass particles.

объясняется большей плотностью сильно измельченных частиц пеностекла.

Изготовленные по проведенной технологии керамические камни приобретают усредненные показатели теплопроводности не более 0,16 Вт/(м·К) и могут быть использованы при выполнении высокоэффективной кладки кирпичных стен.

### Аналитическая оптимизация результатов активного эксперимента

Квадратичные зависимости по фактору  $X_3$  (средний размер частиц пеностекла). Зависимости (1 и 2) являются как моделями, адекватно описывающими функции отклика, так и алгебраическими полиномами, что делает целесообразным применение метода аналитической оптимизации.

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

1). Определяем частную производную функции  $Y_1(X_1, X_2, X_3)$ , приравняем результат 0 и определяем оптимальное значение среднего размера частиц пеностекла ( $dп$ ):

$$\partial Y_1 / \partial Y_2 = 0,7 - 0,8X_3 \rightarrow X_3 = 7/8 = 0,88$$

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

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

2). Получаем модели, оптимизированные по оптимальному размеру частиц пеностекла и по температуре обжига:

$$Y_1 = 14,9 + 0,8X_1 - 1,0X_2 \quad (3)$$

$$Y_2 = 1404 + 18X_1 - 41X_2 \quad (4)$$

Графическая интерпретация оптимизированных зависимостей (3 и 4) дала возможность сформировать номограмму (рис. 2). Позволяющую прогнозировать свойства изделий, а также осуществлять подбор состава керамических смесей для изготовления легких керамических изделий.

### РИСУНОК 2

#### НОМОГРАММА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ И ПОДБОР СОСТАВА ИЗДЕЛИЙ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ РАЗМЕРЕ ЧАСТИЦ РАЗМЕЛЬЧЕННОГО ПЕНОСТЕКЛА (0,68-0,69 мм)

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

Figure 2

Nomogram for predicting parameters and selecting product composition with the optimal particle size of crushed foam glass (0.68-0.69 mm).

Average density, kg/m<sup>3</sup>: a – 1320; b – 1360; c – 1400. Compressive strength, MPa: 1 – 18; 2 – 17; 3 – 16; 4 – 15; 5 – 14; 6 – 13

Ceramic stones produced using the technology developed have average thermal conductivity values of no more than 0.16 W/(m·K) and can be used in highly efficient brickwork.

### Analytical optimization of active experiment results

Quadratic dependencies for factor  $X_3$  (average particle size of foam glass). Dependencies (1 and 2) are both models that adequately describe the response functions and algebraic polynomials, making it appropriate to use the analytical optimization method.

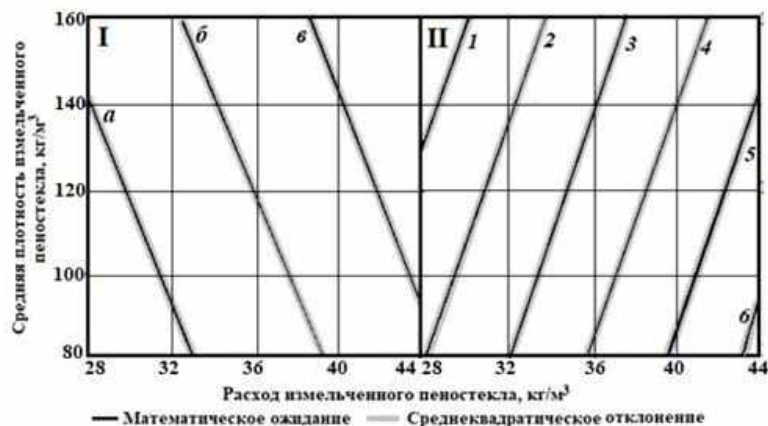
#### Optimization by factor $X_3$ (average particle size of foam glass)

1). We determine the partial derivative of the function  $Y_1(X_1, X_2, X_3)$ , equate the result to 0 and determine the optimal value of the average particle size of foam glass ( $dп$ ):

The natural size of the optimal size of a piece of foam glass is determined using the data in Table 1:

2). We obtain models optimized for the optimal size of foam glass particles and firing temperature:

Graphical interpretation of the optimized dependencies (3 and 4) made it possible to generate a nomogram (Fig. 2), which allows for predicting the properties of products, as well as selecting the composition of ceramic mixtures for the production of lightweight ceramic products.



Номограмма состоит из двух секторов. В секторе I устанавливается взаимосвязь между средней плотностью обожжённых изделий и средней плотностью, а также расходом измельченного пеностекляного щебня; в секторе II — устанавливается взаимосвязь между прочностью при сжатии обожжённых изделий и средней плотностью, а также расходом измельченного пеностекляного щебня.

Керамические образцы, изготовленные в соответствии с описанным выше методом (рис. 3), имеют среднюю теплопроводность менее  $0,16 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ . Марка по морозостойкости глиняного кирпича от F35. Легкий кирпич может быть использован в теплоэффективных кладках стенах, но применение его в фундаментах не рекомендуются. Изготавливаются керамические изделия могут как полнотелыми, так и с пустотами, возможно изготовление модульного керамического кирпича, а также крупноформатных керамических камней.

### РИСУНОК 3

#### ОБОЖЖЁННЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ОБРАЗЦЫ НА ОСНОВЕ ПЕНОСТЕКЛА.

Температура обжига  $1000\text{--}1005 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

Средняя плотность  $1300 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;

Предел прочности при сжатии  $14,5 \text{ МПа}$ .

Figure 3

Fired ceramic samples based on foam glass.

Firing temperature:  $1000\text{--}1005 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

Average density:  $1300 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;

Compressive strength:  $14.5 \text{ MPa}$ .



### Заключение

Использование цифровых методик позволяет значительно сократить время и материальные расходы при проведении натурных экспериментов, а также использовать методики оценки достоверности получаемых результатов. В результате эксперимента и обработки его результатов получена номограмма с помощью которой стало возможным решение как прогностической задачи (прогнозирование свойств изделий), так и задачи подбора состава исходных глиняных смесей.

Образцы обожженные при температуре  $1000\text{--}1005 \text{ }^\circ\text{C}$  имели среднюю плотность  $1300 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; предел прочности при сжатии  $14,5 \text{ МПа}$ ; теплопроводность  $0,16 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ .

Легкий кирпич может быть использован в теплоэффективных кладках стенах, но применение его в фундаментах не рекомендуются.

### Литература:

1. Рубцов О.И., Боброва Е.Ю., Жуков А.Д., Зиновьева Е.А. Керамический кирпич, камни и полнокирпичные стены // Строительные материалы. 2019. № 9. С. 8–13. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-8-13>
2. Korneyev A., Egorova E. Highly Efficient Glass Ceramic Thermal Insulation / E3S Web of Conferences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126301017>
3. Kiani S., Jafarzadeh M. Glass-Ceramic Foams from Alkali-Activated Vitrified Bottom Ash and Waste Glasses / MDPI Applied Sciences (2020). <https://doi.org/10.3390/app10165714>

The nomogram consists of two sectors. Sector I establishes the relationship between the average density of fired products and the average density, as well as the consumption of crushed foam glass aggregate; Sector II establishes the relationship between the compressive strength of fired products and the average density, as well as the consumption of crushed foam glass aggregate.

Ceramic samples manufactured using the method described above (Fig. 3) have an average thermal conductivity of less than  $0.16 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ . The frost resistance grade of clay bricks starts from F35. Lightweight bricks can be used in thermally efficient masonry walls, but their use in foundations is not recommended. Ceramic products can be manufactured as solid or hollow bricks; modular ceramic bricks and large-format ceramic stones are also possible.

### Conclusion

The use of digital methods allows for a significant reduction in the time and material costs of conducting field experiments, as well as the use of methods for assessing the reliability of the results obtained. As a result of the experiment and processing of its results, a nomogram was obtained, with the help of which it became possible to solve both the prognostic problem (predicting the properties of products) and the problem of selecting the composition of the initial clay mixtures.

Samples fired at a temperature of  $1000\text{--}1005 \text{ }^\circ\text{C}$  had an average density of  $1300 \text{ kg}/\text{m}^3$ ; compressive strength of  $14.5 \text{ MPa}$ ; thermal conductivity of  $0.16 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ .

Lightweight brick can be used in thermally efficient masonry walls, but its use in foundations is not recommended.

### References

1. Rubtsov O.I., Bobrova E.Yu., Zhukov A.D., Zinovieva E.A. Ceramic brick, stones and solid brick walls // *Stroitel'nyye materialy*. 2019. No. 9. pp. 8–13. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-8-13>
2. Korneyev A., Egorova E. Highly Efficient Glass Ceramic Thermal Insulation / E3S Web of Conferences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126301017>
3. Kiani S., Jafarzadeh M. Glass-Ceramic Foams from Alkali-Activated Vitrified Bottom Ash and Waste Glasses / MDPI Applied Sciences (2020). <https://doi.org/10.3390/app10165714>
4. Aleksey Zhukov; Andrej Ushakov; Olimdzhon Rasulov;

4. Aleksey Zhukov; Andrej Ushakov; Olimdzhon Rasulov; Ekaterina Mihailik. A Heat-efficient ceramic products based on modified rice straw // AIP Conference Proceedings 2497, 040005 (2023) <https://doi.org/10.1063/5.0110394>
5. Пилипенко А.С., Каддо М.Б., Асаматдинов М.О., Турганбаев Б.Б. Теплая керамика на основе местного сырья Республики Каракалпакстан // Строительные материалы. 2022. № 11. С. 86–91. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-86-91>
6. Miao, X., et al. 3D Printing of Porous Ceramics for Enhanced Thermal Insulation Properties / PMC (2024). <https://doi.org/10.1002/adv.202412554>
7. Колдомасова И.В., Козлов А.В., Каклюгин А.В. Крупно-размерные 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.
8. 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. – Том 13, № 4. – С. 213–221. – <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221> .
9. Кудрявцев П.Г. Состав и структура пористых термостойких неорганических композиционных материалов // Нанотехнологии в строительстве. – 2018. – Том 10, № 4. – С. 75–100. – <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-75-100> .
10. Zhukov, A. D., Popov, I. I., Bessonov, I. V., & Chernukhin, S. P. (2021). Filled Heat Efficient Ceramics // *Key Engineering Materials*, May 2021 vol. 887, 493–498. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.887.493>
11. Завадский В.Ф., Путро Н.Б. Поризованная строительная керамика. – Новосибирск: Сибстрин, 2005. – 100 с.
12. Самедов, Ахмед Меджид Оглы, Самедов, А. М. Перлитокерамические изделия [науч. ред. канд. техн. наук А. И. Полинковская]. Москва. Стройиздат. 1985 г. 195 С.
13. Панченко, А. И. Пеностеклобетон с модифицированным гипсовым вяжущим: свойства, технология и применение / А. И. Панченко, В. А. Михайлов // *Вестник гражданских инженеров*. 2024. № 3(104). С. 71-78.
14. Математическое моделирование физико-химических процессов в пористых средах при решении задач создания нанокomпозиционных материалов и влагонаполнения / В. В. Кузина, С. В. Самченко, И. В. Козлова, А. Н. Кошев // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. – 2023. – Т. 15, № 4. – С. 298-309. – <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-298-309>. – EDN NIOSQQ.
15. Дворников, Р. М. Формирование ячеистой структуры поризованного арболита / Р. М. Дворников, С. В. Самченко // *Техника и технология силикатов*. – 2022. – Т. 29, № 1. – С. 82-91. – EDN KWN1QT.
16. Новиков Н.В. Влияние барит содержащей добавки на свойства ячеистых бетонов / Самченко С.В., Новиков Н.В. // *Техника и технология силикатов*. – 2022. – Т. 29, № 4, С. 335-341.
17. Хеирбеков, Р. А. Некоторые физико-химические аспекты формирования структуры композиционного шлакосиликатного поризованного арболитового материала / Р. А. Хеирбеков, С. В. Самченко // *Техника и технология силикатов*. – 2022. – Т. 29, № 4. – С. 379-390. – EDN JKBDQD.
18. Samchenko, S. V. Formation of Cellular Concrete Structures Based on Waste Glass and Liquid Glass / S. V. Samchenko, A. V. Korshunov // *Buildings*. – 2024. – Vol. 14, No. 1. – P. 17. – <https://doi.org/10.3390/buildings14010017> . – EDN WLXSWL.
19. Mukhammad-Basir Kodzoev, Sergey Isachenko, Ekaterina Bobrova, Boris Efimov and Igor Bessonov // *Ceramic prod-*
- Ekaterina Mihailik. A Heat-efficient ceramic products based on modified rice straw // AIP Conference Proceedings 2497, 040005 (2023) <https://doi.org/10.1063/5.0110394>
5. Pilipenko A.S., Kaddo M.B., Asamatdinov M.O., Turganbaev B.B. Warm ceramics based on local raw materials of the Republic of Karakalpakstan // *Stroitel'nyye materialy*. 2022. No. 11. P. 86–91. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-86-91>
6. Miao, X., et al. 3D Printing of Porous Ceramics for Enhanced Thermal Insulation Properties / PMC (2024). <https://doi.org/10.1002/adv.202412554>
7. Koldomasova I.V., Kozlov A.V., Kaklyugin A.V. Large-sized cellular ceramic materials using aluminosilicate microspherical filler and mineral fibers // "Construction-2005": Proc. of the international. scientific-practical. conf. - Rostov-on-Don: Rostov state construction university, 2005. - P. 9-10.
8. Sinityn D.A., Shayakhmetov U.Sh., Rakhimova O.N., Khalikov R.M., Nedoseko I.V. Nanostructured foam ceramics for construction purposes: production and application technology // *Nanotechnologies in Construction*. - 2021. - Vol. 13, No. 4. - P. 213–221. - <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221> .
9. Kudryavtsev P.G. Composition and structure of porous heat-resistant inorganic composite materials // *Nanotechnology in construction*. - 2018. - Vol. 10, No. 4. - P. 75-100. - <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-75-100>.
10. Zhukov, A. D., Popov, I. I., Bessonov, I. V., & Chernukhin, S. P. (2021). Filled Heat Efficient Ceramics // *Key Engineering Materials*, May 2021 vol. 887, 493–498. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.887.493>
11. Zavatskiy V.F., Putro N.B. Porous construction ceramics. – Novosibirsk: Sibstrin, 2005. – 100 p.
12. Samedov, Akhmed Majid Ogly, Samedov, A. M. Perlitoceramic products [scientific editor, Cand. of Technical Sciences A. I. Polinkovskaya]. Moscow. Stroyizdat. 1985. 195 p.
13. Panchenko, A. I. Foam glass concrete with modified gypsum binder: properties, technology and application / A. I. Panchenko, V. A. Mikhailov // *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2024. No. 3 (104). P. 71-78.
14. Mathematical modeling of physical and chemical processes in porous media in solving the problems of nanocomposite materials and water-filling / V. V. Kuzina, S. V. Samchenko, I. V. Kozlova, A. N. Koshev // *Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal*. – 2023. – Vol. 15, No. 4. – P. 298-309. – <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-4-298-309>. – EDN JROCSH.
15. Dvornikov, R. M. Formation of the cellular structure of porous arbolite / R. M. Dvornikov, S. V. Samchenko // *Engineering and technology of silicates*. - 2022. - Vol. 29, No. 1. - Pp. 82-91. - EDN KWN1QT.
16. Novikov N.V. Influence of barite-containing additives on the properties of cellular concrete / Samchenko S.V., Novikov N.V. // *Engineering and technology of silicates*. - 2022. - Vol. 29, No. 4, Pp. 335-341.
17. Kheirbekov, R. A. Some physicochemical aspects of the formation of the structure of composite slag-silicate porous arbolite material / R. A. Kheirbekov, S. V. Samchenko // *Engineering and technology of silicates*. - 2022. - Vol. 29, No. 4. - P. 379-390. - EDN JKBDQD.
18. Samchenko, S. V. Formation of Cellular Concrete Structures Based on Waste Glass and Liquid Glass / S. V. Samchenko, A. V. Korshunov // *Buildings*. – 2024. – Vol. 14, No. 1. – P. 17. – <https://doi.org/10.3390/buildings14010017> . – EDN WLXSWL.
19. Mukhammad-Basir Kodzoev, Sergey Isachenko, Ekaterina Bobrova, Boris Efimov and Igor Bessonov // *Ceramic prod-*

19. Mukhamad-Basir Kodzoev, Sergey Isachenko, Ekaterina Bobrova, Boris Efimov and Igor Bessonov // Ceramic products and energy-efficient systems 032006// FORM-2020. С. 23-26. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/3/032006>

20. 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: научный интернет-журнал». – 2020. – Том 12, № 6. – С. 313–319. – <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319>.

ucts and energy-efficient systems 032006// FORM-2020. С. 23-26. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/3/032006>

20. Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Bessonov I.V., Medvedev A.A., Demisse B.A. Application of statistical methods for solving problems of construction materials science // “Nanotechnology in construction: scientific online journal”. - 2020. - Vol. 12, No. 6. - P. 313–319. - <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319>.

**Николаев Даниил Романович** – аспирант кафедры строительного материаловедения Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), специалист отдела управления проектами, компании АО "ШУКО Интернационал Москва"  
E-mail: [nikolaev.daniil.2002@yandex.ru](mailto:nikolaev.daniil.2002@yandex.ru) (автор для связи)

**Nikolaev Daniil Romanovich** – postgraduate student of the Department of Construction Materials Science of the National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), specialist of the project management department of the company JSC SHUKO International Moscow  
E-mail: [nikolaev.daniil.2002@yandex.ru](mailto:nikolaev.daniil.2002@yandex.ru) (contact author)

**Жуков Алексей Дмитриевич** – доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), член-корреспондент Российской инженерной академии (РИА).  
E-mail: [lj211@yandex.ru](mailto:lj211@yandex.ru)

**Zhukov Aleksey Dmitrievich** – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Materials Science of the National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Leading Researcher of the Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAASN), Corresponding Member of the Russian Engineering Academy (RIA).  
E-mail: [lj211@yandex.ru](mailto:lj211@yandex.ru)

**Медведев Андрей Александрович** – доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), доцент кафедры геофизики Российского геологоразведочного университета (РГГРУ-МГРИ). E-mail: [medvedev747@yandex.ru](mailto:medvedev747@yandex.ru)

**Medvedev Andrey Aleksandrovich** – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics of the National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Associate Professor of the Department of Geophysics of the Russian Geological Prospecting University (RGGRU-MGRI).  
E-mail: [medvedev747@yandex.ru](mailto:medvedev747@yandex.ru)

**Вклад авторов:** Николаев Д.Р. – проведение экспериментов, обработка материала, написание статьи, Медведев А.А. – идея, обработка материала, написание статьи, Жуков А.Д. – идея, научное руководство, редактирование статьи.

**Contribution of the author:** Nikolaev D.R. – conducting experiments, processing material, writing the article, Medvedev A.A. – idea, processing material, writing the article, Zhukov A.D. – idea, scientific supervision, editing the article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.