



УДК 691.421:666.3/.7

Д. Р. НИКОЛАЕВ, аспирант кафедры строительного материаловедения¹,
ст. специалист отдела управления проектами²; **Б. А. ЕФИМОВ**, канд. техн.
наук, доц., доц. кафедры строительного материаловедения

СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕГКИХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет».

Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

²АО «ШУКО Интернационал Москва».

Тел.: (968) 064-62-98, (917) 532-30-99; эл. почта: nikolaev.daniil.2002@yandex.ru,
boris.alexandr.efimov@gmail.com

Ключевые слова: керамический кирпич, суглинок, измельченное пеностекло,
коэффициенты структуры.

*Легкие керамические материалы относятся к теплоизоляционно-
конструкционным и позволяют формировать конструкции, имеющие
удовлетворительные прочностные характеристики и сравнительно низкую
теплопроводность. Характеристики таких материалов могут оцениваться
коэффициентами структуры по плотности, прочности и теплопроводности, которые
определяют в лабораторных условиях. Решение задач по оптимизации характеристик и
повышения эксплуатационных качеств материала возможно с помощью коэффициентов
структуры и объединенного оптимизационного критерия.*

*Целью работы было изучение возможности применения коэффициентов
структуры для оценки и оптимизации свойств керамических теплоизоляционно-
конструкционных материалов на основе измельченного пеностекла. В результате
разработаны основы методики оптимизации свойств материалов и определены
коэффициенты структуры по прочности $12,4 \cdot 10^3$; по теплопроводности $65,1 \cdot 10^6$ и
оптимизационный коэффициент 16,4, которым соответствуют оптимальные
прочность при сжатии 13,8 МПа и теплопроводность $0,115 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$.*

Введение

Керамические стеновые материалы применяются уже 4 тысячелетия и
положительно зарекомендовали себя по эксплуатационным характеристикам.
Особенностями этих материалов являются относительно высокая средняя
плотность и теплопроводность. Разумное снижение, при сохранении прочностных
и эксплуатационных показателей, плотности и теплопроводности является весьма
актуальной задачей. Перспективным является также получение
теплоизоляционно-конструкционных керамических материалов и изделий:
кирпича и блоков различного формата [1–3].

Конструкционно-теплоизоляционные материалы объединяют материалы
различной природы, имеющие марку по средней плотности от $D400$ до $D1200$ и
класс по прочности на сжатие от $B2,5$ до $B10$. Эти материалы совмещают
удовлетворительные прочностные характеристики, позволяющие их использовать
в самонесущих или несущих строительных конструкциях, и относительно
невысокую теплопроводность, что позволяет формировать на их основе и с



минимальным включением эффективного утеплителя, изоляционные оболочки теплоэффективных зданий.

Снижение средней плотности керамических материалов и их теплопроводности осуществляется различными рецептурными и технологическими приемами. Во-первых, повышение пустотности керамических изделий (кирпича и камней) позволяет значительно снижать среднюю плотность изделия и, кроме того, повышать технологичность их сушки и обжига. Во-вторых, применение выгорающих добавок способствует снижению средней плотности керамического черепка и повышению равномерности обжига изделий. В-третьих, это формирование ячеистой структуры керамического черепка [4–6].

Ячеистая структура в технологии ячеистой керамики может формироваться одним из трех способов: за счет вспучивания керамической массы, за счет смешения глинистой композиции с пенами с последующей сушкой и обжигом, а также за счет введения легких мелких заполнителей, что является наиболее технологичным. Наиболее перспективным и технологичным (с позиций сушки и обжига) является использование мелких заполнителей [7–9].

В качестве таких заполнителей могут применяться золы, измельченные шлаки, вспученный перлит или вермикулит, алюмосиликатные микросферы, а также измельченный пеностекловый щебень. Основные свойства таких материалов определяют структуры этих материалов, а для оценки их свойств используют коэффициенты качества и структуры [10–12].

Целью исследований, изложенных в статье, было изучение возможности применения коэффициентов структуры для оценки и оптимизации свойств керамических теплоизоляционно-конструкционных материалов на основе измельченного пеностекла.

Условия проведения эксперимента

Основным сырьем являлись: суглинок, измельченное пеностекло, молотый стеклосбой (флюсующий компонент). *Суглинок* имел число пластичности 12–19 и являлся умеренно пластичным и малочувствительным к сушке. Содержание оксидов SiO_2 и Al_2O_3 соответственно 52–53 % и 11–12 %; потери при прокаливании 7–8 %. *Пеностекловый щебень* имел насыпную плотностью от 120 кг/м³ до 150 кг/м³; истинную плотность 2180 кг/м³; водопоглощение по объему 2,7–4,4 %; теплопроводность в сухом состоянии 0,08 Вт/(м·°C); приращение теплопроводности на 1 % влажности – 0,001 Вт/(м·°C %). В качестве *флюсующего компонента* использовался тонкомолотый бой бутылочного или оконного стекла.

Образцы изготавливались размеров 50х50х50 мм. Сушка осуществлялась в лабораторном сушильном шкафу при температуре 60–70 °C и относительной влажности среды 55–60 %; срок сушки – 12 час. Обжиг изделий осуществляли в муфельной печи при расчетной температуре 900–1050 °C. Режим обжига: поднятие температуры от 18 до 100 °C – 15 мин., выдержка при 100 °C – 10 мин., поднятие температуры до 650 °C – 120 мин., выдержка при температуре 650 °C – 60 мин., поднятие температуры до расчетной – 120 мин., выдержка при расчетной температуре – 120 мин.; естественное остывание в печи.

Эксперимент и результаты

Показатели свойств обожженных керамических образцов определялись по методикам ГОСТ 530-2012 (табл. 1, столбцы 2–4). Зная показатели свойств: прочность при сжатии (R , МПа), теплопроводность (λ , Вт/(м·K)) и среднюю



плотность материала (ρ , кг/м³), определяли коэффициенты структуры по прочности ($K_{СП}$) и по теплопроводности ($K_{СТ}$):

$$K_{СП} = \frac{R}{(\rho - 116)^{1,12}} \text{ и } K_{СТ} = \frac{\lambda - 0,026}{\rho^{1,12}}.$$

Коэффициенты структуры позволяют оценить качество структуры материала. Для ограждающих конструкций выбирают материал с наибольшим коэффициентом структуры по прочности и наименьшим коэффициентом структуры по теплопроводности, или используется объединенный оптимизационный критерий:

$$K_{ОПТ} = \frac{K_{СП}}{K_{СТ}} = \frac{R}{(\lambda - 0,026)(\rho - 116)^{1,12}}.$$

Основной задачей эксперимента было определение характеристик легкого кирпича в зависимости от расхода и свойств пеностекла. Условия эксперимента приведены в табл. 1, а результаты в табл. 2.

Таблица 1

Характеристики легкого заполнителя (измельченного пеностекла)

№ образца	Характеристики и расход пеностекла		
	Средняя плотность, кг/м ³	Расход, кг/м ³	Средний размер частиц, мм
1	2	3	4
1	160	44	0,7
2	80	44	0,7
3	160	28	0,7
4	80	28	0,7
5	160	44	0,3
6	80	44	0,3
7	160	28	0,3
8	80	28	0,3
9	120	36	0,5

Каждый эксперимент проводился 5 раз ($n = 5$); для исключения влияния случайных факторов использовалась рандомизация опытов. Средние значения результатов представлены в столбцах 2–4 табл. 1. Результаты расчета коэффициентов структуры и оптимизационного критерия приведены в столбцах 5–7 табл. 2.

Таблица 2

Характеристики легких керамических изделий

№ образца	Экспериментальные значения			Коэффициенты		
	Прочность, МПа	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/(м·К)	$K_{СП} \cdot 10^3$	$K_{СТ} \cdot 10^6$	$K_{ОПТ}$
1	2	3	4	4	5	6
1	13,8	1362	0,115	10,7	65,1	16,4
2	12,6	1324	0,152	9,4	93,2	10,1
3	16,9	1455	0,146	12,4	80,5	15,4
4	14,1	1336	0,162	10,3	99,8	10,3
5	12,3	1326	0,120	9,2	68,5	13,4
6	11,1	1284	0,152	9,1	96,3	9,4
7	15,3	1448	0,143	10,7	79,1	13,5
8	12,6	1336	0,160	9,3	98,3	9,5
9	13,6	1372	0,140	9,8	81,1	12,1



Чем выше объединенный оптимизационный критерий, тем выше качество материала. Обработка экспериментальных данных показывает, что по объединенному оптимизационному критерию и по теплопроводности лучшие показатели у состава № 1: $K_{\text{опт}}=16,4$ и $K_{\text{ст}}=10,7 \cdot 10^3$ (табл. 1). Наибольший коэффициент структуры по прочности у состава № 3 ($K_{\text{сп}}=10,7 \cdot 10^3$). Оптимальные составы № 1 и № 3 – (табл. 1).

Важным для теплоизоляционно-конструкционных материалов является их теплопроводность. Значение коэффициента структуры по теплопроводности учитывает не только теплопроводность матрицы, но и другие особенности внутреннего строения, оказывающие влияние на свойства материала.

Сорбционное увлажнение и максимальное водонасыщение оказывает значительное влияние на теплопроводность материала в эксплуатационных условиях. Теплопроводность практически линейно зависит от влажности; при этом коэффициент приращения теплопроводности на 1 % влажности находится в пределах 2–3 %.

Областью применения легких керамических изделий могут быть конструкции несущих стен в зданиях до трех этажей с внешним штукатурным покрытием или с различными видами облицовок. Возможно применение в перегородках зданий с использованием железобетонных плит покрытий. Относительно низкая средняя плотность материала обуславливает снижение нагрузок на фундамент, что также свидетельствует в его пользу. Применение легких керамических изделий в конструкции фундамента не допускается.

Исследования выполнены в рамках реализации Программы развития НИУ МГСУ «ПРИОРИТЕТ 2030»; Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».

Заключение

Легкие керамические изделия на основе измельченного пеностекла как теплоизоляционно-конструкционный материал вполне соответствуют нормативным требованиям. Установлено, что по оптимизационному критерию наилучшие показатели получены для материала с характеристиками пеностекла: средняя плотность 160 кг/м^3 ; расход 44 кг/м^3 ; средний размер частиц 0,7 мм; оптимизационный критерий равен 16,4.

Областью применения легких керамических изделий могут быть конструкции несущих стен в зданиях до трех этажей с внешним штукатурным покрытием или с различными видами облицовок. Применение легких керамических изделий в конструкциях фундамента не допускается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гагарин, В. Г. Макроэкономические аспекты обоснования энергосберегающих мероприятий при повышении теплозащиты ограждающих конструкций зданий / В. Г. Гагарин // Строительные материалы. – 2010. – № 3. – С. 8–16.
2. Лесовик, В. С. Строительные материалы и изделия : учебное пособие по направлению 270100 «Строительство» / В. С. Лесовик, А. М. Гридчин, Н. И. Алфимова. – Белгород : Издательство БГТУ, 2011. – 222 с. – ISBN 978-5-361-00161-3.
3. Керамический кирпич, камни и полнокирпичные стены / О. И. Рубцов, Е. Ю. Боброва, А. Д. Жуков, Е. А. Зиновьева // Строительные материалы. – 2019. – № 9. – С. 8–13. – DOI 10.31659/0585-430X-2019-774-9-8-13.



4. Сапелин, А. Н. Сорбционные свойства стеновых материалов с применением микросфер / А. Н. Сапелин // Academia. Архитектура и строительство. – 2013. – № 3. – С. 101–104.
5. Иноземцев, А. С. Высокопрочные лёгкие бетоны : монография / А. С. Иноземцев, Е. В. Королев ; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2022. – 192 с. – ISBN 978-5-9227-1265-1.
6. Столбоушкин, А. Ю. Влияние температуры обжига на формирование структуры ячеистой керамики со стеклокристаллическим каркасом / А. Ю. Столбоушкин, О. А. Фомина // Строительные материалы. – 2019. – № 4. – С. 20–26.
7. Станевич, В. Т. Строительная керамика : учебное пособие / В. Т. Станевич. – Павлодар : Кереку, 2008. – 96 с. – ISBN 9965-583-89-7.
8. Горбунов, Г. И. Научные основы формирования структуры и свойств строительных материалов : монография / Г. И. Горбунов, А. Д. Жуков ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. – Москва : НИУ МГСУ, 2016. – 555 с. – ISBN 978-5-7264-1318-1.
9. Жуков А. Д. Энергетическая эффективность строительных систем : монография / А. Д. Жуков, Е. Ю. Боброва, И. В. Бессонов, Е. А. Медникова. – Москва : ИНФРА-М, 2023. – 329 с. – (Научная мысль). – ISBN 978-5-16-017479-2.
10. Сапелин А. Н. Коэффициенты структуры как критерий оценки теплотехнического качества строительных материалов / А. Н. Сапелин, И. В. Бессонов // Строительные материалы. – 2012. – № 6. – С. 26–28.
11. Weber H. Porobeton Handbuch. Planen und Bauen mit System / H. Weber, H. Hullmann. – Gütersloh : Bertelsmann Springer Bauverlag, 2002. – 278 p.
12. Моделирование структуры высокопористых материалов / И. В. Бессонов, А. Д. Жуков, И. С. Говряков, Э. А. Горбунова // Жилищное строительство. – 2024. – № 6. – С. 36–42. – DOI 10.31659/0044-4472-2024-6-36-42.

**NIKOLAEV Daniil Romanovich, postgraduate student of the chair of building materials science¹, senior specialist of the project management department²;
EFIMOV Boris Aleksandrovich, candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the chair of building materials science**

STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF LIGHTWEIGHT CERAMIC MATERIALS

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University).

26, Yaroslavl'skoe Shosse, Moscow, 129337, Russia.

²Schüco International KG, Moscow.

Tel.: (968) 064-62-98, (917) 532-30-99; e-mail: nikolaev.daniil.2002@yandex.ru, boris.alexandr.efimov@gmail.com

Key words: ceramic brick, loam, crushed foam glass, structure coefficients.



Lightweight ceramic materials belong to the heat-insulating and structural category and enable the fabrication of structures with satisfactory strength characteristics and relatively low thermal conductivity. The properties of such materials can be evaluated using structure coefficients for density, strength, and thermal conductivity, which are determined under laboratory conditions. Solving problems related to optimizing characteristics and improving the operational qualities of the material is possible through structure coefficients and a combined optimization criterion. The aim of the work was to study the feasibility of applying structure coefficients for evaluating and optimizing the properties of ceramic heat-insulating and structural materials based on crushed foam glass. As a result, a methodology for optimizing material properties was developed, and structure coefficients were determined: for strength $12,4 \times 10^3$; for thermal conductivity $65,1 \times 10^6$; and optimization coefficient 16,4, corresponding to optimal compressive strength of 13,8 MPa and thermal conductivity of 0,115 W/(m·°C).

REFERENCES

1. Gagarin V. G. Makroekonomicheskie aspekty obosnovaniya energosberegayushchikh meropriyatiy pri povyshenii teplozashchity ograzhdayushchikh konstruktsiy zdaniy [Macroeconomic aspects of justifying energy-saving measures when improving the thermal protection of building enclosing structures]. *Stroitelnye materialy* [Construction Materials]. 2010, № 3, P. 8–16.
2. Lesovik V. S., Gridchin A. M., Alfimova N. I. *Stroitelnye materialy i izdeliya* [Building materials and products]: uchebnoe posobie po napravleniyu 270100 «Stroitelstvo». Belgorod, Izd-vo BGTU, 2011, 222 p. ISBN 978-5-361-00161-3.
3. Rubtsov O. I., Bobrova E. Yu., Zhukov A. D., Zinoveva E. A. Keramicheskiy kirpich, kamni i polnokirpichnye steny [Ceramic bricks, blocks, and solid brick walls]. *Stroitelnye materialy* [Construction Materials]. 2019, № 9, P. 8–13. DOI 10.31659/0585-430X-2019-774-9-8-13.
4. Sapelin A. N. Sorbtionnye svoystva stenovykh materialov s primeneniem mikrosfer [Sorption properties of wall materials using microspheres]. *Academia. Arkhitektura i stroitelstvo* [Academia. Architecture and Construction]. 2013, № 3, P. 101–104.
5. Inozemtsev A. S., Korolev E. V. Vysokoprochnye legkie betony [High-strength lightweight concretes]: monografiya. Saint Petersburg, SPbGASU, 2022, 192 p. ISBN 978-5-9227-1265-1.
6. Stolboushkin A. Yu., Fomina O. A. Vliyanie temperatury obzhiga na formirovanie struktury yacheistoy keramiki so steklokristallicheskim karkasom [Influence of firing temperature on the formation of the structure of cellular ceramics with a glass-crystalline framework]. *Stroitelnye materialy* [Construction Materials]. 2019, № 4, P. 20–26.
7. Stanevich V. T. *Stroitel'naya keramika* [Building ceramics]: uchebnoe posobie Pavlodar, Kereku, 2008, 96 p. ISBN 9965-583-89-7.
8. Gorbunov G. I., Zhukov A. D. Nauchnye osnovy formirovaniya struktury i svoystv stroitelnykh materialov [Scientific foundations of the formation of the structure and properties of building materials]: monografiya. Moscow, NIU MGSU, 2016, 555 p. ISBN 978-5-7264-1318-1.
9. Zhukov A. D., Bobrova E. Yu., Bessonov I. V., Mednikova E. A. Energeticheskaya effektivnost stroitelnykh sistem [Energy efficiency of building systems]: monografiya. Moscow, INFRA-M, 2023, 329 p. (Nauchnaya mysl). ISBN 978-5-16-017479-2.
10. Sapelin A. N., Bessonov I. V. Koeffitsienty struktury kak kriteriy otsenki teploekhnicheskogo kachestva stroitelnykh materialov [Structural coefficients as a criterion for assessing the thermal engineering quality of building materials]. *Stroitelnye materialy* [Construction Materials]. 2012, № 6, P. 26–28.



11. Weber H., Hullmann H. Porobeton Handbuch. Planen und Bauen mit System [Autoclaved aerated concrete handbook. Planning and building with system]. Gütersloh: Bertelsmann Springer Bauverlag, 2002, 278 p.

12. Bessonov I. V., Zhukov A. D., Govryakov I. S., Gorbunova E. A. Modelirovanie struktury vysokoporistykh materialov [Modeling the structure of highly porous materials]. Zhilishchnoe stroitelstvo [Housing Construction]. 2024, № 6, P. 36–42. DOI 10.31659/0044-4472-2024-6-36-42.

© Д. Р. Николаев, Б. А. Ефимов, 2026

Получено: 16.03.2026 г.