



УДК 691-405.8:666.3

И. В. БЕССОНОВ¹, канд. техн. наук, гл. науч. сотрудник; **А. Д. ЖУКОВ**, канд. техн. наук, доц.², вед. науч. сотрудник¹; **П. К. ГУДКОВ³**, ассистент; **Э. А. МАЛОВА**, аспирант кафедры строительного материаловедения², вед. инженер¹; **И. С. ГОВРЯКОВ**, аспирант кафедры строительного материаловедения², вед. инженер¹

ЛЕГКИЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

¹ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук»

Россия, 127238, г. Москва, Локомотивный пр-д, д. 21.

Тел.: (495) 482-40-76; эл. почта: niisf@niisf.ru

²ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

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

Тел.: (495) 781-80-07; эл. почта: kanz@mgsu.ru

³ФГБОУ ВО «Финансовый университет при правительстве Российской Федерации».

Россия, 125993, г. Москва, пр-т Ленинградский, д. 49/2.

Тел.: (495) 249-52-49; эл. почта: academy@fa.ru

Ключевые слова: керамический материал, коэффициенты структуры, энергетическая эффективность, ячеистая структура, алюмосиликатные микросферы.

Конструкционно-теплоизоляционные материалы позволяют улучшить энергоэффективность зданий без применения дополнительных изоляционных элементов (слоистых систем), что особенно актуально для средней полосы и южных регионов. К подобным материалам относят ячеистые бетоны, а также материалы на основе различных легких и особолегких заполнителей и, в частности, легкие керамические изделия на основе алюмосиликатных микросфер.

Характеристики этого материала могут оцениваться коэффициентами структуры при известных значениях плотности, прочности и теплопроводности, которые несложно измерить в лабораторных условиях. С помощью коэффициентов структуры и объединенного оптимизационного критерия возможно решение задач повышения эксплуатационных качеств материала.

Введение

Существуют несколько способов повышения термического сопротивления оболочки здания. Одним из них является применение систем дополнительной изоляции, то есть использование составных слоистых конструкций с органическими или минеральными утеплителями. Также развивается направление использования эффективных легких теплых штукатурок, в том числе с применением гранулированных неорганических заполнителей. Третьим вариантом повышения термического сопротивления является использование в оболочке зданий конструкционно-теплоизоляционных материалов.

К подобным материалам относятся легкие керамические материалы, легкий бетон, а также материалы на особолегких заполнителях [1–3].



С учетом реалий отечественной строительной отрасли энергетическая эффективность строительных решений (конструкций и систем изоляции) оценивается как по показателям энергосбережения, так и по показателям комфортности, и по реальным затратам на весь цикл производства и применения материалов и окупаемости конструкций с применением таких материалов. С учетом высокой стоимости систем дополнительной изоляции и относительно невысокой стоимости теплоносителей окупаемость таких систем в средней климатической полосе и южнее практически невозможна. К примеру, стоимость одного м^3 газа в Германии или Франции составляет 120–130 руб. (или 1455–1579 \$ за 1000 м^3). Окупаемость систем дополнительной изоляции составляет в этих странах 15–20 лет. В России цена за газ составляет 8–10 руб./ м^3 . Разница – в 12–15 раз, а следовательно, и срок окупаемости капитальных вложений в применение систем дополнительно теплосберегающей изоляции возрастает пропорционально.

Из этого следует, что применение конструкционно-теплоизоляционных материалов дает несомненное экономическое преимущество, улучшая при этом общую энергоэффективность здания.

Если для регионов с холодным климатом, в том числе Арктических и в Заполярье, применение композиционных (многослойных) систем изоляции является необходимостью, то для средней полосы и южных регионов допустимыми, с точки зрения достижения комфортности, становятся системы на основе легких и особолегких строительных материалов. Применение подобных решений упрощает конструкцию, снижает материальные затраты и поэтому привлекательно по финансовым показателям [4–6].

Материалы и методы

Классическим примером легких (теплоизоляционно-конструкционных) материалов являются материалы ячеистой структуры на основе минеральных вяжущих: газосиликат, газобетон, пенобетон, пенополистиролбетон, а также пеногипс и ячеистый жидкостекольный композит. В зависимости от полученных физико-технических характеристик и исследуемых эксплуатационных свойств каждого из материалов, подбирается его рациональная область применения [7–9].

Второй группой, представляющей несомненный интерес, являются легкие бетоны на легких или особолегких заполнителях: керамзите, аглопорите, дробленом пеностекле, минеральных гранулах или капсулах [10–12].

С точки зрения структуры, такие системы можно рассматривать как неоднородные или гетерогенные, состоящие из малых однородных областей (компонентов), разграниченных поверхностями раздела (рис. 1). Волокнистые структуры (рис. 1в) характерны для теплоизоляционных, звукоизоляционных материалов. Высокий процент открытой пористости обеспечивает высокую степень проницаемости таких материалов. В том случае, если межволоконное пространство заполняется непрерывной матрицей связующего вещества (на основе крахмала, гипсового вяжущего и т. д.), то возможно получение декоративно-акустических материалов. Для большинства теплоизоляционно-конструкционных материалов характерны ячеистые структуры в различных вариантах.

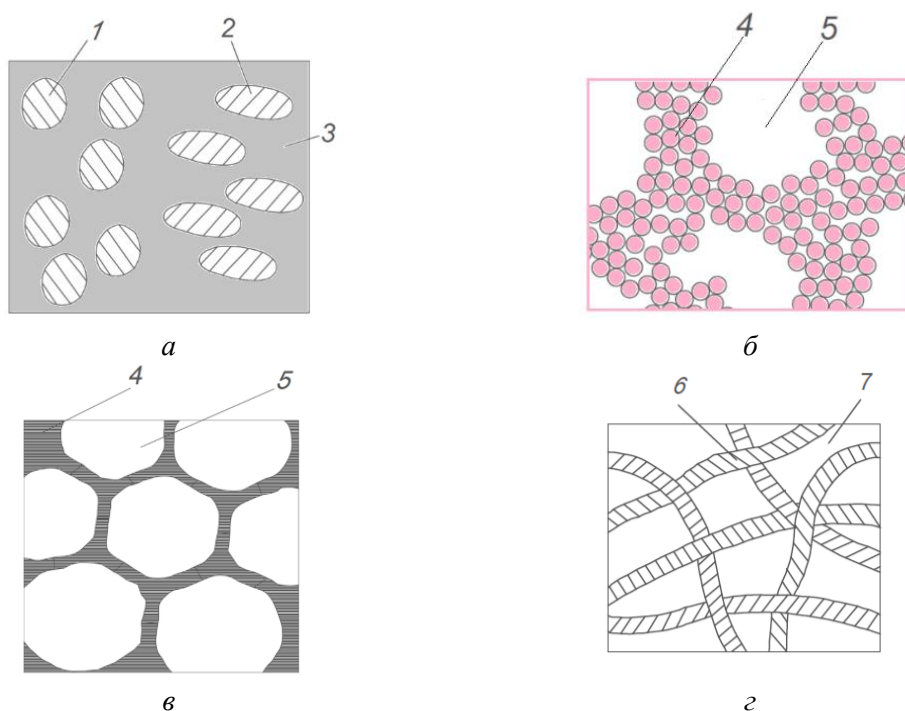


Рис. 1. Неоднородные системы: *а* – изолированные включения: изомерные (1) и анизотропно ориентированные (2) в однородной матрице (3); *б* – зернистые системы с однородной матрицей (4) и порами (5); *в* – ячеистые системы с однородной матрицей (4) и ячейками (5); *г* – волокнистые системы из волокон (6) и межволоконного пространства (7)

Подобные структуры определяют основные свойства легких (теплоизоляционно-конструкционных) материалов независимо от природы матрицы и наполнителя. Особенности этих структур в значительной степени характеризуют процессы переноса: массы и энергии. С точки зрения оценки макроструктурных особенностей пористых материалов удобно использовать определяющие их свойства коэффициенты. В практике применяют коэффициенты качества и структуры [12–15]. Для легких минеральных материалов, помимо волокнистой, характерной является ячеистая структура. Причем ячеистая структура может формироваться как за счет вспучивания пластичных смесей: холодного, или высокотемпературного, так и за счет введения в смеси особолегких заполнителей.

К таким особолегким заполнителям относятся: перлит, гранулированное пеностекло, вспученный вермикулит, а также алюмосиликатные микросферы. Размер микросфер колеблется в пределах 20–500 мкм, а толщина стенки составляет около 10 % от диаметра. По химическому составу алюмосиликатные микросферы можно представить следующим образом: SiO_2 – 55÷65 %; Al_2O_3 – 25÷33 %; Fe_2O_3 – 1÷6 %. Микросферы имеют насыпную плотность 320–360 кг/м³; прочность на гидростатическое сжатие при 50 % уровне разрушения составляет 150 кг/см² и теплопроводность 0,08–0,1 Вт/(м·К). Микросферы имеют невысокое водопоглощение; их сорбционные свойства представлены в табл. 1. За счет особенностей технологии получения алюмосиликатных микросфер, а именно условий высокотемпературного обжига,



заполнитель получается более эффективным для использования в качестве пористой микрогранулированной добавки при получении керамических изделий.

Таблица 1

Сорбционные свойства алюмосиликатных микросфер

Относительная влажность воздуха, %	40	60	80	90	97
Сорбционная влажность, % масс	0,027	0,038	0,067	0,106	0,294

Для практической оценки качества структуры материала удобно использовать экспериментально определяемые в лабораторных условиях параметры: плотность (ρ , кг/м³), прочность (R , МПа) и теплопроводность (λ , Вт/(м·К)). На их основе рассчитываются коэффициенты структуры по прочности ($K_{СП}$) и теплопроводности ($K_{СТ}$):

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

В зависимости от области применения материала, при выборе можно основываться на показатели структуры, например, для ограждающих конструкций необходимы материалы с наибольшим коэффициентом структуры по прочности. Для наиболее точного показателя при подборе введен объединенный оптимизационный критерий:

$$K_{ОПТ} = \frac{K_{СП}}{K_{СТ}} = \frac{R}{(\lambda - 0,026) \left(1 - \frac{116}{\rho}\right)^{1,12}}. \quad (2)$$

Можно считать, что, чем выше объединенный оптимизационный критерий, тем выше качество материала, при учете возможных дополнительных условий. Выбор приоритетного коэффициента структуры определяется целевыми требованиями к материалу в зависимости от области применения: при необходимости минимальной теплопроводности ключевое значение приобретает $K_{СТ}$, тогда как для достижения максимальной прочности в качестве основного выступает $K_{СП}$ [16–17].

Изучение взаимосвязи структуры и свойств легкого материала осуществлялось на стеновом керамическом материале. Объектом исследования являлись керамические изделия на основе глины, модификаторов и алюмосиликатных микросфер. Обжиг глиняных образцов проводили по ступенчатому режиму: нагрев от 18 до 100 °С в течение 15 мин с последующей выдержкой при постоянной температуре 100 °С (10 мин); подъем температуры до 650 °С за 120 мин и выдержка при 650 °С (60 мин); дальнейший нагрев до 1050 °С (120 мин) и выдержка при конечной температуре (120 мин). Завершающим этапом являлось естественное охлаждение в печи изделия из пористой керамики.

Предметом исследования являлись характеристики обжигового керамического материала (табл. 2).



Таблица 2

Характеристики легких керамических изделий (ЛКИ)

Марки- ровка состава	Плот- ность, кг/м ³	Проч- ность, МПа	Водопог- лощение, %	Теплопро- водность, Вт/(м·К)	Коэффициенты		
					$K_{СП} \cdot 10^3$	$K_{СТ} \cdot 10^6$	$K_{ОПТ}$
ЛКИ-1	648	3,9	46,0	0,194	3,5	119,2	29
ЛКИ-2	760	6,6	35,6	0,240	4,7	127,0	37
ЛКИ-3	715	4,5	42,2	0,233	3,5	131,6	27
ЛКИ-4	653	3,7	45,4	0,198	3,2	121,0	27
ЛКИ-5	821	10,1	28,8	0,262	6,5	128,5	51
ЛКИ-6	795	8,6	30,1	0,241	5,8	121,3	48
ЛКИ-7	773	6,7	32,5	0,239	4,7	124,1	38

Результаты исследования

Обработка экспериментальных данных и расчет коэффициентов структуры показывает, что по объединенному оптимизационному критерию лучшие показатели у состава ЛКИ-5 ($K_{ОПТ} = 51$ и $K_{СП} = 0,65 \cdot 10^3$). Если есть необходимость в материале с наименьшим коэффициентом структуры по теплопроводности, то это состав ЛКИ-3. Введенные коэффициенты, например коэффициент структуры по теплопроводности учитывает структуру материала, включая форму, размеры, распределение пор и каркас матрицы. То есть, коэффициент учитывает не только теплопроводность материала, но и другие параметры структуры, влияющие на эту характеристику.

Поскольку теплопроводность материала в реальных условиях эксплуатации сильно зависит от его увлажнения, замеры проводились не только для сухих и полностью насыщенных водой образцов, но и для двух промежуточных состояний. Для этого часть образцов после сушки выдерживали месяц в помещении с влажностью 80 % (сорбционное увлажнение), затем производили измерение, а другую часть, предварительно насыщенную водой, сушили в том же помещении (процесс десорбции) в течение месяца, а затем аналогично производили измерения.

Теплопроводность практически линейно зависит от влажности. Установлено, что материалы на основе алюмосиликатных микросфер характеризуются низким влиянием увлажнения на теплопроводность: КТК (коэффициент теплотехнического качества) этих материалов не превышает 2–3 % на 1 % влажности. Для сравнения, у ячеистых бетонов и композитов на природных пористых заполнителях этот показатель достигает 4–7 %, у керамзитобетона – 4–6 %, т. е. в 2–3 раза выше (табл. 3).

Таблица 3

Теплофизические свойства материалов на основе глины (МСТ-3)

Средняя плотность, кг/м ³	715
Теплопроводность в сухом состоянии, Вт/(м·К)	0,233
Максимальное водопоглощение, %	42,70
Теплопроводность при максимальном водопоглощении, Вт/(м·К)	0,477
Разница теплопроводности в сухом и максимально водонасыщенном состояниях, Вт/(м·К)	0,244
Приращение теплопроводности на процент увлажнения, Вт/(м·К)	0,00571
$КТК_{21} = (\lambda_a - \lambda_0) / (w_a \cdot \lambda_0)$, %	2,5



Основная причина низких значений КТК на % влажности заключается в особенностях структуры и строения материала (рис. 1). Теплоперенос в материале осуществляется по принципу «связующее – микросфера – связующее – микросфера», так как основная часть связующего сосредоточена в контактных зонах микросферами. Благодаря этому композит наследует принцип работы слоистых эффективных теплоизоляционных конструкций.

Заключение

Конструкционно-теплоизоляционные материалы (плотность $D_{400-D1200}$, прочность $B_{2,5-B10}$) занимают особое место в современном строительстве. Их ключевое преимущество – способность выполнять одновременно прочностные и теплоизолирующие функции, то есть с возможностью их использования в несущих и самонесущих конструкциях, что позволяет возводить энергоэффективные здания с минимальным использованием систем утепления.

Для обоснованного выбора теплоизоляционных материалов целесообразно опираться на коэффициенты структуры по прочности и теплопроводности, отдавая предпочтение вариантам с наилучшим их соотношением, то есть с наибольшим $K_{СП}$ и наименьшим $K_{СТ}$. Предложенный оптимизационный критерий выступает эффективным инструментом такого выбора.

Исследования выполнены в рамках реализации НИР ФНИ Минстроя РФ «Развитие теоретических основ получения особо легких неорганических строительных материалов и исследование влияния пористой структуры на их теплофизические и акустические характеристики», а также в рамках реализации Программы развития НИУ МГСУ «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».

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 : Изд-во БГТУ, 2011. – 222 с. – ISBN 978-5-361-00161-3.
3. 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 ; ISBN 978-5-16-110007-3. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/1897101>. – Текст : электронный.
4. Бессонов, И. В. Пеногипс в современном малоэтажном строительстве / И. В. Бессонов, А. Ф. Бурьянов // Жилищное строительство. – 2024. – № 5. – С. 26–34. – DOI <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-5-26-34>.
5. Прогнозирование водостойкости высокопористого материала на основе жидкого стекла / И. В. Бессонов, А. Д. Жуков, Э. А. Горбунова [и др.] // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2024. – № 2 (70). – С. 90–99. – EDN NIJLVK.
6. Моделирование структуры высокопористых материалов / И. В. Бессонов, А. Д. Жуков, И. С. Говряков, Э. А. Горбунова // Жилищное строительство. – 2024. – № 6. – С. 36–42. – DOI <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-6-36-42>. – EDN PFEGZX.
7. Лесовик, В. С. Энергоэффективные газобетоны на композиционных вяжущих для монолитного строительства / В. С. Лесовик, Л. А. Сулейманова, К. А. Кара // Известия



высших учебных заведений. Строительство. – 2012. – № 3. – С. 10–20.

8. Сапелин, А. Н. Сорбционные свойства стеновых материалов с применением микросфер / А. Н. Сапелин // Academia. Архитектура и строительство. – 2013. – № 3. – С. 101–104.

9. Сулейманова, Л. А. Влияние формы, размера пор и внешнего давления на среднюю плотность и прочность неавтоклавного ячеистого бетона / Л. А. Сулейманова, К. А. Кара // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2011. – № 2. – С. 71–77.

10. Иноземцев, А. С. Высокопрочные легкие 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.

11. Гладких, И. В. Безобжиговые теплоизоляционные материалы на основе зольных микросфер из золотвала Западно-Сибирской ТЭЦ / И. В. Гладких, Е. П. Волюнкина // Известия вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 4. – С. 49–53.

12. Иноземцев, А. С. Легкие бетоны на полых и пористых заполнителях / А. С. Иноземцев, Е. В. Королев // Строительные материалы. – 2024. – № 7. – С. 41–47. – DOI 10.31659/0585-430X-2024-826-7-41-47.

13. Сапелин, А. Н. Влияние структуры пустот на прочность силикатных строительных материалов / А. Н. Сапелин, Н. А. Сапелин // Строительные материалы. – 2011. – № 5. – С. 44–48. – EDN OBNCKZ.

14. 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. – EDN PCFYAN.

15. Weber, H. Porobeton Handbuch. Planen und Bauen mit System / H. Weber, H. Hullmann. – Gtersloh : Bertelsmann Springen Bauverlag, 2002. – 278 p.

16. Иноземцев, А. С. Модель высокопрочного легкого бетона / А. С. Иноземцев, Е. В. Королев // Строительные материалы. – 2024. – № 12. – С. 34–41. – DOI 10.31659/0585-430X 2024-831-12-34-41.

17. Lajosz, A. Influence of the fly ash properties on properties of autoclaved aerated concrete / A. Lajosz, P. Szymanski, P. Walczak // Cement wapno beton. Special issue : 5th International conference on autoclaved aerated concrete “Securing a sustainable future” to be held at Bydgoszcz to celebrate 60 years of AAC experience in Poland, 14–17 september 2011 / University of technology and life Ssciences. – Bydgoszcz, 2011. – P. 22–25.

BESSONOV Igor Vyacheslavovich¹, candidate of technical sciences, chief researcher; ZHUKOV Aleksey Dmitrievich, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of construction materials², leading researcher¹; GUDKOV Pavel Kirillovich³, assistant; MALOVA Elina Aleksandrovna, postgraduate student of the chair of construction materials², leading engineer¹; GOVRYAKOV Ilya Sergeevich, postgraduate student of the chair of construction materials², leading engineer¹

LIGHTWEIGHT CERAMIC MATERIALS AND THEIR STRUCTURAL CHARACTERISTICS



¹Research Institute of Building Physics Russian Academy of Architecture and Constructions Sciences.

21, Lokomotivny Proezd, Moscow, 127238, Russia.

Tel.: (495) 482-40-76; e-mail: niisf@niisf.ru

²Moscow State University of Civil Engineering.

26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, Russia.

Tel.: (495) 781-80-07; e-mail: kanz@mgsu.ru

³Financial University under the Government of the Russian Federation.

49/2, Leningradsky Prospect, Moscow, 125993, Russia.

Tel.: (495) 249-52-49; e-mail: academy@fa.ru

Key words: ceramic material, structural coefficients, energy efficiency, cellular structure, aluminosilicate microspheres.

Structural and thermal insulation materials enhance the energy efficiency of buildings without using additional insulating elements (layered systems), which are especially relevant for temperate and southern climate zones. Such materials include cellular concrete, as well as materials based on various light and extra-light aggregates, and lightweight ceramic products based on aluminosilicate microspheres.

The characteristics of this material can be estimated by the coefficients of the structure with known density, strength and thermal conductivity, which are easy to measure in the laboratory. These structural coefficients can be combined with a unified optimization criterion to effectively address material performance optimization challenges.

REFERENCES

1. Gagarin V. G. Makroekonomicheskie aspekty obosnovaniya energosberegayushchikh meropriyatiy pri povyshenii teploshchity ograzhdayushchikh konstruksiy zdaniy [Macroeconomic aspects of substantiating energy-saving measures when improving the thermal protection of building envelopes]. Stroitelnye materialy [Building Materials]. Moscow, 2010, № 3, P. 8–16.
2. Lesovik V. S., Gridchin A. M., Alfimova N. I. Stroitelnye materialy i izdeliya [Building materials and products]. Belgorod, Izd-vo BG TU, 2011, 222 p.
3. Zhukov A. D., Bobrova E. Yu., Bessonov I. V., Mednikova E. A. Energeticheskaya effektivnost stroitelnykh sistem [Energy efficiency of building systems]. Moscow, INFRA-M, 2023, 329 p. URL: <https://znanium.com/catalog/product/1897101>.
4. Bessonov I. V., Burianov A. F. Penogips v sovremennom malotazhnom stroitelstve [Foam gypsum in modern low-rise construction]. Zhilishchnoe stroitelstvo [Housing Construction]. Moscow, 2024, № 5, P. 26–34. DOI <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-5-26-34>.
5. Bessonov I. V., Zhukov A. D., Gorbunova E. A., [et al.] Prognozirovanie vodostoykosti vysokoporistogo materiala na osnove zhidkogo stekla [Predicting the water resistance of a highly porous material based on liquid glass]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhny Novgorod, 2024, № 2 (70), P. 90–99. EDN NIJLVK.
6. Bessonov I. V., Zhukov A. D., Govryakov I. S., Gorbunova E. A. Modelirovanie struktury vysokoporistyykh materialov [Modeling the structure of highly porous materials]. Zhilishchnoe stroitelstvo [Housing Construction]. Moscow, 2024, № 6, P. 36–42. DOI <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-6-36-42>. EDN PFEGZX.
7. Lesovik V. S., Suleymanova L. A., Kara K. A. Energoeffektivnye gazobetonny na kompozitsionnykh vyazhushchikh dlya monolitnogo stroitelstva [Energy-efficient aerated concretes on composite binders for monolithic construction]. Izvestiya vysshykh uchebnykh



zavedeniy. Stroitelstvo [Izvestiya of Higher Education Institutions. Construction]. Novosibirsk, 2012, № 3, P. 10–20.

8. Sapelin A. N. Sorbtsionnye svoystva stenovikh materialov s primeneniem microsfer [Sorption properties of wall materials using microspheres]. Academia. Arkhitektura i stroitelstvo [Academia. Architecture and Construction]. Moscow, 2013, № 3, P. 101–104.

9. Suleymanova L. A., Kara K. A. Vliyanie formy, razmera por i vneshnego davleniya na srednyuyu plotnost i prochnost neavtoklavnogo yacheistogo betona [Influence of pore shape, size and external pressure on the average density and strength of non-autoclaved aerated concrete]. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova [Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov]. Belgorod, 2011, № 2, P. 71–77.

10. Inozemtsev A. S., Korolev E. V. Vysokoprochnye lyogkie betony [High-strength lightweight concretes]. Saint Petersburg, SPbGASU, 2022, 192 p.

11. Gladkikh I. V., Volynkina E. P. Bezoobzhigovye teploizolyatsionnye materialy na osnove zolnykh microsfer iz zoloatvala Zapadno-Sibirskoy TETS [Non-fired thermal insulation materials based on ash microspheres from the ash dump of the West Siberian Thermal Power Plant]. Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. Novokuznetsk, 2008, № 4, P. 49–53.

12. Inozemtsev A. S., Korolev E. V. Lyogkie betony na polykh i poristyykh zapolnitelyakh [Lightweight concretes on hollow and porous aggregates]. Stroitelnye materialy [Building Materials]. Moscow, 2024, № 7, P. 41–47. DOI 10.31659/0585-430X-2024-826-7-41-47.

13. Sapelin A. N., Sapelin N. A. Vliyanie struktury pustot na prochnost silikatnykh stroitelnykh materialov [Influence of void structure on the strength of silicate building materials]. Stroitelnye materialy [Building Materials]. Moscow, 2011, № 5, P. 44–48. EDN OBHCKZ.

14. Sapelin A. N., Bessonov I. V. Koeffitsienty struktury kak kriteriy otsenki teplotekhnicheskogo kachestva stroitelnykh materialov [Structural coefficients as a criterion for evaluating the thermal engineering quality of building materials]. Stroitelnye materialy [Building Materials]. Moscow, 2012, № 6, P. 26–28. EDN PCFYAN.

15. Weber H., Hullmann H. Porobeton Handbuch. Planen und Bauen mit System [Aerated concrete manual. Planning and building with a system]. Gütersloh, Bertelsmann Springen Bauverlag, 2002, 278 p.

16. Inozemtsev A. S., Korolev E. V. Model vysokoprochnogo lyogkogo betona [Model of high-strength lightweight concrete]. Stroitelnye materialy [Building Materials]. Moscow, 2024, № 12, P. 34–41. DOI 10.31659/0585-430X-2024-831-12-34-41.

17. Lagosz A., Szymanski P., Walczak P. Influence of the fly ash properties on properties of autoclaved aerated concrete. Cement wapno beton. Special issue: 5th International conference on autoclaved aerated concrete “Securing a sustainable future” to be held at Bydgoszcz to celebrate 60 years of AAC experience in Poland, 14–17 september 2011. University of Technology and Life Sciences. Bydgoszcz, 2011, P. 22–25.

© И. В. Бессонов, А. Д. Жуков, П. К. Гудков, Э. А. Малова, И. С. Говряков,
2026

Получено: 02.03.2026 г.