

Оптимизация состава и свойств легких материалов на основе жидкого стекла

Игорь Вячеславович Бессонов¹ , Алексей Дмитриевич Жуков^{1,2} , Андрей Александрович Медведев^{2,3} ,
Элина Александровна Малова^{1,2*} , Илья Сергеевич Говряков¹ 

¹ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21, Российская Федерация

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация

³ Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, 117485, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, Российская Федерация

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: eg15082000@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Применение алюмосиликатных микросфер делает возможным получение легких обжиговых материалов повышенной прочности. Использование в качестве связующего жидкого стекла позволяет получать изделия при температуре обжига 400 °С, что значительно снижает энергозатраты по сравнению с керамическими материалами. Цель исследований, изложенных в статье, заключалась в разработке и апробации методики оценки свойств обжиговых изделий на основе жидкого стекла и силикатных микросфер, а также выбора оптимальных рецептурных и технологических параметров. **Методы и материалы.** В качестве связующего используется жидкое стекло плотностью 1400 кг/м³, а в качестве легкого заполнителя – алюмосиликатные микросферы. Исследование свойств изделий осуществлялось по нормативным методикам. Проведение эксперимента осуществлялось с использованием статистических и цифровых методов. **Результаты.** Разработана методика прогнозирования свойств обжиговых изделий, и на основании ее применения решены рецептурные и технологические задачи. Установлено, что если нужно получить изделие с наибольшей прочностью при сжатии, то наиболее приемлемым будет состав, содержащий 34% жидкого стекла, а давление формования должно составлять 4,6 МПа. В этом случае прочность на сжатие составит 16,2 ± 0,6 МПа; средняя плотность 711 ± 38 кг/м³ и теплопроводность 0,0114 ± 0,0006 Вт/(м·°С). Снижение прочности на сжатие при 75 циклах замораживания и оттаивания (по сравнению с прочностью сухих образцов) составляет 8–11%, а при 100 циклах – 11–14%. **Обсуждение.** В основе формирования свойств и структуры материала лежат процессы: равномерного распределения, вяжущего по поверхности гранул с подпрессовкой системы и кристаллизация вяжущего в процессе обжига с формированием прочных контактов между гранулами. **Заключение.** Обжиговые материалы на основе микросфер имеют более развитую поверхность единого порового пространства, что оказывает влияние на их водопоглощение, а следовательно, на прочность, теплопроводность и эксплуатационную стойкость.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: жидкое стекло, алюмосиликатные микросферы, формование с прессованием, обжиг, статистическое планирование, энергетическая эффективность

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ НАУЧНОЙ РАБОТЫ, РЕЗУЛЬТАТОМ КОТОРОЙ СТАЛА ПУБЛИКАЦИЯ: 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».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Бессонов И.В., Жуков А.Д., Медведев А.А., Малова Э.А., Говряков И.С. Оптимизация состава и свойств легких материалов на основе жидкого стекла. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(4):447–456. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-4-447-456>. – EDN: OEHSKW.

Optimization of the composition and properties of lightweight materials based on liquid glass

Igor V. Bessonov¹ , Alexey D. Zhukov^{1,2} , Andrey A. Medvedev^{2,3} , Elina A. Malova^{1,2*} ,
Ilya S. Govryakov¹ 

¹ Research Institute of Building Physics Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, 21, Lokomotivny Proyezd, Moscow, 127238, Russian Federation

² National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

³ Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze, 23, Ulitsa Miklukho-Maklaya, Moscow, 117485, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: eg15082000@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The use of aluminosilicate microspheres makes it possible to produce lightweight, high-strength fired materials. The use of liquid glass as a binder allows products at a firing temperature of 400 °C, significantly reducing energy consumption compared to ceramic materials. The aim of the research presented in the article was to develop and test a method for assessing the properties of fired products based on liquid glass and silicate microspheres, as well as to select optimal formulation and process parameters.

Methods and materials. Liquid glass with a density of 1400 kg/m³ is used as a binder, and aluminosilicate microspheres are used as a lightweight filler. The properties of the products were studied according to standard methods. The experiment was conducted using statistical and numerical methods. **Results.** A method for predicting the properties of fired products has been developed, and formulation and process problems have been solved based on its application. It has been established that for a product with the highest compressive strength, the most suitable composition would be one containing 34% liquid glass, and the molding pressure should be 4.6 MPa. In this case, the compressive strength will be 16.2 ± 0.6 MPa; the average density is 711 ± 38 kg/m³ and the thermal conductivity is 0.0114 ± 0.0006 W/(m°C). The decrease in compressive strength after 75 freeze-thaw cycles (compared to the strength of dry samples) is 8–11%, and after 100 cycles – 11–14%. **Discussion.** The formation of the properties and structure of the material is based on the processes of uniform distribution of the binder over the surface of the granules with the pressing of the system and crystallization of the binder during the firing process with the formation of strong contact between the granules.

Conclusion. Firing materials based on microspheres have a more developed surface of a single pore space, which affects their water absorption, and, consequently, strength, thermal conductivity and operational durability.

KEYWORDS: liquid glass, aluminosilicate microspheres, compression molding, firing, statistical planning, energy efficiency

SOURCES OF FUNDING FOR THE SCIENTIFIC WORK THAT RESULTED IN THE PUBLICATION: The research was carried out as part of the research 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.

Part of the research was carried out at the National Research University MSUCE 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:

Bessonov I.V., Zhukov A.D., Medvedev A.A., Malova E.A., Govryakov I.S. Optimization of the composition and properties of lightweight materials based on liquid glass. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(4):447–456. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-4-447-456>. – EDN: OEHSKW.

ВВЕДЕНИЕ

В ограждающих, в том числе самонесущих или несущих, конструкциях зданий достаточно широкий сегмент занимают легкие материалы, такие как ячеистые бетоны, бетоны на легких и особолегких заполнителях, пустотный керамический кирпич и их

аналоги [1–3]. Изделия относят к группе теплоизоляционно-конструкционных, имеющих среднюю плотность от 400 до 1000 кг/м³ и прочность на сжатие от 2,0 до 8 МПа. Изделия этой группы могут изготавливаться на различных минеральных связующих (модифицированных гипсовых, глинах, портландцементе и его аналогах и пр.). Стабилизация структу-

ры этих материалов может происходить в условиях естественного твердения тепловой или тепловлажностной обработки, обжига [4–6]. Материалы этой группы имеют относительно невысокую теплопроводность, что делает возможным изготавливать в умеренных климатических регионах конструкции с минимальным дополнительным утеплением, а в регионах с теплым климатом — без дополнительного утепления при сохранении в помещениях достаточного уровня комфортности [7–9].

Керамические строительные изделия (в том числе облегченные или легкие) относятся к группе обжиговых материалов, у которых получение керамического черепка происходит при температурах от 950–1100 °С (в зависимости от свойств используемого сырья и вида модифицирующих добавок) [10–12]. Это предопределяет высокую энергоемкость технологических процессов, что сказывается на энергоэффективности конструкций. С учетом существующего состояния экономики в качестве основных критериев энергетической эффективности рассматриваются долговечность конструкций, обусловленная эксплуатационной стойкостью материалов и корректностью проектных решений; обеспечение комфортных условий в помещениях, то есть оптимального температурно-влажностного режима; снижение отрицательной нагрузки на окружающую среду и пожарная безопасность, а также снижение энергетических затрат на изготовление изделий [13–15]. Одним из путей снижения этих затрат является получение изделий, имеющих меньшую температуру обжига.

Отметим также, что применение легких поризованных материалов, относящихся к теплоизоляционно-конструкционным, позволяет реализовывать однослойные конструкции, обладающие как достаточными прочностными характеристиками, так и удовлетворительным термическим сопротивлением [16–18]. Перспективным является использованием особолегких заполнителей: легкого керамзита, пеностекла, минеральных капсул и микросфер.

Микросферы изготавливают из различных материалов; некоторые из них являются отходами других производств. Алумосиликатные микросферы — это полые частицы с преобладающим диаметром 100–200 мкм и толщиной стенок до 10% от диаметра. Сферы находятся в тесном взаимодействии с веществом минеральной матрицы и выполняют роль либо мелкого заполнителя или наполнителя, либо структурирующего элемента [19–21]. С точки зрения возможности получения легких материалов с пониженной энергоемкостью изготовления, перспективным является использования в качестве вещества, образующего матрицу жидкого стекла [22–24]. Формирование пористости матрицы может

осуществляться газо- или пенообразованием, а также за счет введения силикатных микросфер, подобранных по фракционному составу [25, 26].

Предварительным анализом информации установлено, что достижение оптимальных показателей по энергетической эффективности во многом определяется затратами на изготовление изделий, а также материало- и трудоемкостью изготовления конструкций с нормативным термическим сопротивлением. Исходя из анализа сформулирована цель исследования, которая заключается в разработке и апробации методики оценки свойств обжиговых изделий на основе жидкого стекла и силикатных микросфер, а также выбора оптимальных рецептурных и технологических параметров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве связующего использовалось жидкое стекло плотностью 1400 кг/м³. Алумосиликатные микросферы применены в качестве заполнителя. Химический состав микросфер представлен в основном оксидами кремния, алюминия и железа: SiO — 55÷65%; Al O — 25÷33%; Fe O — 1÷6%. Насыпная плотность микросфер 360 кг/м³; прочность на сжатие при 50% уровне разрушения составляет 15,0 МПа, а теплопроводность — 0,08–0,1 Вт/(м·°С); водопоглощение невысокое; сорбционная влажность — до 0,3 % мас.

Технология получения строительного материала на основе жидкого стекла и микросфер включает следующие операции: приготовление однородной смеси жидкого стекла с микросферами; формование под давлением; распалубку, обжиг. Лабораторные образцы изготавливают формованием с подпрессовкой. Величина давления оптимизируется в процессе эксперимента. Изделия сушат до влажности не более 2% и обжигают в лабораторной печи по режиму: подъем температуры до 100 °С — 15 мин, выдержка при 100 °С — 10 мин, поднятие температуры до 420 °С — 30 мин, выдержка при температуре 420 °С — 60 мин. Остывание печи — нормальное. Структуры материалов изучали с помощью электронного микроскопа.

Предварительный расчет состава материала на жидкостекольном вяжущем и алумосиликатных микросферах осуществлялся по методу геометрических аналогий и предполагаемой упаковки компонента сферической формы. Максимальную упаковку микросфер, с учетом их полидисперсности и преобладающего размера 100–200 мкм, принимали равной 0,73÷0,8. Определяли отношение объема пустот к объему микросфер:

$$V_{пуст}/V_{мкр} = 0,27/0,73 \div 0,2/0,8 = 0,37 \div 0,25. \quad (1)$$

Рассматривались два возможных варианта структурообразования. По первому варианту (объемного омоноличивания) межсферические пустоты заполнялись полностью жидким стеклом. Отношение содержания жидкого стекла к массе микросфер принималось равным 0,27. По второму варианту (контактное омоноличивание) это соотношение принималось равным 0,20. С учетом зависимости (1) и средней плотности компонентов (для микросфер 600 кг/м³ и 1400 кг/м³ — для жидкого стекла) соотношение между массами жидкого стекла и микросфер определялось следующим образом:

$$M_{ж.с.}/M_{мкр} = (C_{ж.с.} \cdot \rho_{ж.с.}) / (C_{мкр} \cdot \rho_{мкр}). \quad (2)$$

Разработка методики определения рационального состава материала на жидкостекольном связующем, а также прогнозирование его свойств осуществлялось с применением статистических методов планирования и цифровых методов обработки результатов эксперимента [27–29]. Система «вяжущее—микросферы», двухкомпонентное содержание этих компонентов дает 100%, поэтому эти факторы взаимозависимы и с точки зрения статистического планирования приняты факторы: X_1 — содержание жидкого стекла, % по массе и X_2 — давление прессования. В качестве функций отклика приняты средняя плотность (Y_1) и прочность на сжатие (Y_2).

Условия эксперимента представлены в таблице 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.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Уравнения регрессии получены в результате обработки экспериментальных данных, которая осуществлялась в программе Statistika. Значимость коэффициентов полиномов устанавливалась сравнением с доверительными интервалами: по прочности на сжатие (Δb_2) — 0,2 МПа, по средней плотности (Δb_1) — 3 кг/м³. Получены следующие уравнения ре-

грессии, действительные в интервалах изменения (области определения) варьируемых факторов (см. табл. 1):

— для средней плотности

$$Y_1 = 610 + 36X_1 + 68X_2 + 22X_1X_2 - 12X_2^2; \quad (3)$$

— для прочности на сжатие

$$Y_2 = 11,8 + 2,2X_1 + 2,8X_2 + 0,8X_1X_2 - 0,4X_2^2. \quad (4)$$

Установлено, что в рассматриваемом интервале варьируемых факторов усредненные значения теплопроводности материала являются функцией средней плотности, близкой линейной. При этом необходимо учитывать отклонение от средних значений. Принято, что распределение значений близко к одномерному распределению Гаусса, а значимая ошибка эксперимента не превышает 10%.

Графическая интерпретация полученных зависимостей заключается в построении на основе алгебраических полиномов (3) и (4) графиков функций $Y_1 = f_2(X_1, X_2)$ $X_1 = f_1(X_2, Y_2)$ и объединения их в номограмму (рис. 2). Номограмма состоит из трех секторов: в первом (I) секторе осуществляется оценка по средней плотности; во втором (II) — по прочности на сжатие, в третьем (III) — по теплопроводности.

Прямая задача цифрового моделирования заключается в предсказании свойств изделий в зависимости от рецептурных и технологических параметров; обратная задача — в определении значений рецептурных и технологических параметров, в зависимости от задаваемых характеристик изделия. Пример решения прямой задачи показан на рис. 1 синими линиями. Задаем расход жидкого стекла 31% и давление при формовании 3,0 МПа. В секторе I на оси ординат отмечаем точку 31% и проводим через сектора I и II прямую параллельную оси абсцисс. В секторе I на пересечении с прямой давлений ($P = 3,0$ МПа) получаем точку «а», из которой проводим прямую параллельную оси ординат в секторах I и III. На пересечении с графиком теплопроводности получаем точку «б», из которой опускаем перпендикуляр на ось теплопроводности и получаем значение теплопроводности 0,095 Вт/(м·°C). Продлеваем пря-

Таблица 1. Условия двухфакторного эксперимента

Наименование фактора	Символ X_i	Среднее значение фактора, $\bar{X}_i$	Интервал варьирования, ΔX_i	Значения фактора на уровнях	
				-1	+1
Содержание жидкого стекла, % по массе	X_1	30	6	24	36
Давления формования, МПа	X_2	3,4	1,8	1,6	5,2

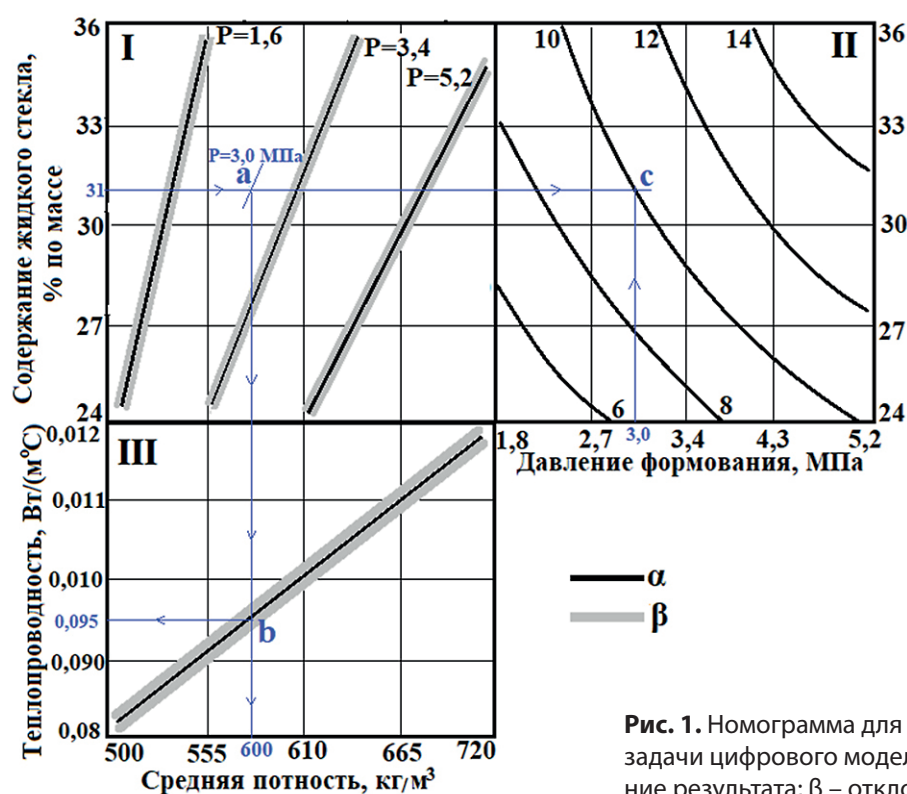


Рис. 1. Номограмма для решения прямой (синие линии) задачи цифрового моделирования: α – среднее значение результата; β – отклонение от среднего значения

мую до оси средней плотности и получаем значение средней плотности, равное 554 ± 28 кг/м³. В секторе II из точки $P = 3,0$ МПа проводим прямую параллельную оси ординат до пересечения с прямой (ac) и получаем значение прочности на сжатие, равное $10,0 \pm 0,5$ МПа. Получаем, что при содержании жидкого стекла 31% по массе и давлении при формовании 3,0 МПа прочности изделия на сжатие составит $10,0 \pm 0,5$ МПа, средняя плотность 600 ± 20 кг/м³, теплопроводность $0,095 \pm 0,005$ Вт/(м·°С).

Обратная задача цифрового моделирования решается путем проверки полученных результатов, осуществляется в контрольных сериях эксперимента (табл. 2). В качестве оценочного параметра принята средняя плотность изделия. Условия эксперимента представлены в столбцах 2 и 3. Результаты определения и расчета средней плотности образцов в столбцах 4–6; результаты определения и расчета прочности на сжатие образцов приведены в столбцах 7 и 8.

Средняя ошибка эксперимента по средней плотности составила 2,6%, что меньше установленной при использовании статистических методов (5%). Расчетные значения по прочности можно определить либо из номограммы (рис. 1), либо с использованием алгебраического полинома (4); расчетное значение теплопроводности определяем по третьему сектору номограммы.

Если нужно получить изделие с наибольшей прочностью при сжатии, то наиболее приемле-

мым будет состав № 1. В этом случае прочность на сжатие составит $16,2 \pm 0,6$ МПа; средняя плотность 711 ± 38 кг/м³ и теплопроводность $0,0114 \pm 0,0006$ Вт/(м·°С). Если нужно получить изделие с наименьшей теплопроводностью, то выбирают состав № 9. В этом случае прочность на сжатие составит $8,6 \pm 0,2$ МПа; средняя плотность 538 ± 26 кг/м³ и теплопроводность $0,0086 \pm 0,0003$ Вт/(м·°С). Соотношение масс компонентов (формула 2) для композиции № 1 составит 1,37; а для композиции № 2–0,94.

Обжиговые материалы на основе жидкостекляного связующего и алюмосиликатных микросфер превосходят сопоставимые по плотности керамические изделия более чем в 2,5 раза, при этом температура обжига снижается от 1050 °С (для стеновой керамики) до 400 °С. Важным для теплоизоляционно-конструкционных материалов является изменение прочности при увлажнении, а также характеристики морозостойкости этих материалов. Прочность на сжатие образцов в сухом состоянии определяется по данным номограммы и в контрольных сериях эксперимента, при этом прочность на сжатие образцов в водонасыщенном состоянии снижается на 4–8%. Снижение прочности на сжатие при 75 циклах замораживания и оттаивания (по сравнению с прочностью сухих образцов) составляет 8–11%, а при 100 циклах – 11–14%. Результаты вполне удовлетворительные, при этом уменьшение снижения

Таблица 2. Результаты контрольного эксперимента

№ опыта	Условия эксперимента		Средняя плотность, кг/м ³		Ошибка Δ, %	Прочность на сжатие, МПа	
	Содержание жидкого стекла, % по массе	Давление формования, МПа	Расчётная	Экспериментальная		Расчётная	Экспериментальная
1	2	3	4	5	6	7	8
1	34	4,6	711	729	2,5	16,6	16,2
2	30	4,6	665	651	2,1	14,4	14,1
3	26	4,6	611	625	2,2	11,4	11,4
4	34	3,4	642	622	3,1	13,6	13,9
5	30	3,4	610	622	1,9	11,8	11,2
6	26	3,4	569	583	2,4	9,8	10,7
7	34	2,2	541	561	3,6	10,4	10,9
8	30	2,2	539	557	3,2	9,0	9,9
9	26	2,2	525	538	2,4	7,6	8,6
			Средняя Δ, %		2,6		

прочности может быть достигнуто при оптимизации режимов обжига материала.

В зависимости от соотношения компонентов и условий формования характеристики изделий на основе жидкого стекла и алюмосиликатных микросфер могут изменяться в значительных пределах. Оценку влияния варьируемых факторов на результат можно установить из анализа уравнений регрессии (3 и 4).

Увеличение содержания жидкого стекла в составе материала и увеличение давления при формировании образцов при неизменных режимах обжига ожидаемо способствуют повышению прочности изделий и возрастанию их средней плотности, что подтверждается коэффициентами при X_1 и X_2 . При этом влияние фактора X_2 проявляется в большей степени при давлениях прессования ниже средних значений. При увеличении значений прессования более средних показателей увеличение прочности начинает проявляться в меньшей степени. Это связано с изменением структурных характеристик формируемой смеси и наличием порового пространства, формирующегося между ячейками. При малых расходах связующего в результате формования с подпрессовкой происходит уплотнение структуры смеси и снижение до минимума свободного (заполненного воздухом) объема межсферической пористости. Далее по мере роста давления начинается поверхностное смятие микросфер, и, можно предположить, что при давлениях, больших установленного интервала варьирования, может происходить разрушение микросфер и снижение прочности материала.

Значимый коэффициент при X_1X_2 показывает положительное влияние парного взаимодействия,

что делает возможным предполагать наличие синергетического эффекта от совместного влияния расхода жидкого стекла и давления прессования. Этот эффект может быть обусловлен условиями адгезии на поверхностях контакта «гранула-минеральная матрица».

Установлена взаимосвязь между содержанием связующего и давлением при формировании (рис. 2). При давлении формования 5 МПа имеет явно выраженное «плато». Увеличение содержания связующего сверх 31% не приводит к увеличению прочности образцов на сжатие. При меньшем давлении при формировании прочность не стабилизируется с увеличением дозировки жидкого стекла, при этом ее рост становится более плавным. Если в интервалах содержания связующего от 24 до 31% скорость прироста прочности составляет 5,4–5,5 МПа/%, то в интервале от 31 до 35% – 0,4–0,5 МПа/%. Уменьшение содержания связующего менее 31% приводит к падению прочности. Полученные результаты вполне коррелируются с результатами статистического анализа и являются признаками достижения оптимальной стабильности системы «отвержденное жидкое стекло – алюмосиликатные микросферы».

Структура обожженного изделия характеризуется рядом особенностей, проявляющихся как на макро-, так и микроуровнях. На макроуровне проявляется тот факт, что плотность материала на рассматриваемой области определения факторов не зависит от количества связующего. Это обусловлено отсутствием раздвижки зерен микрозаполнителя, которое можно оценить на микроуровне (рис. 3). Толщина прослоек новообразований между алюмосиликат-

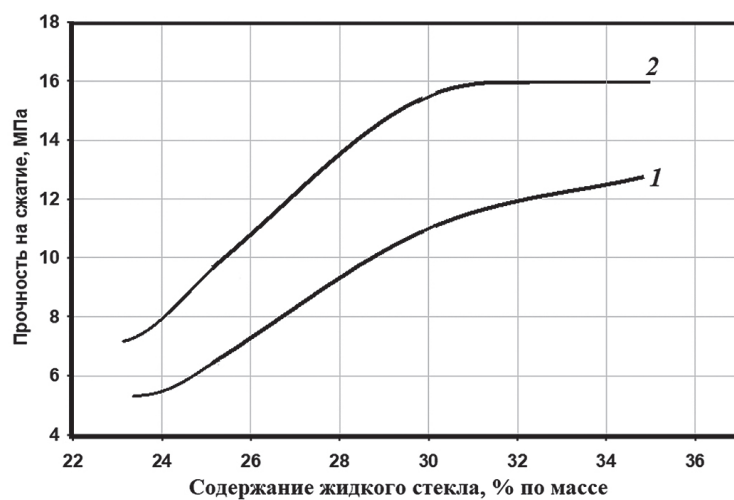


Рис. 2. Зависимость прочности на сжатие от содержания связующего при давлении формования: 1 – 3,2 МПа; 2 – 5,0 МПа

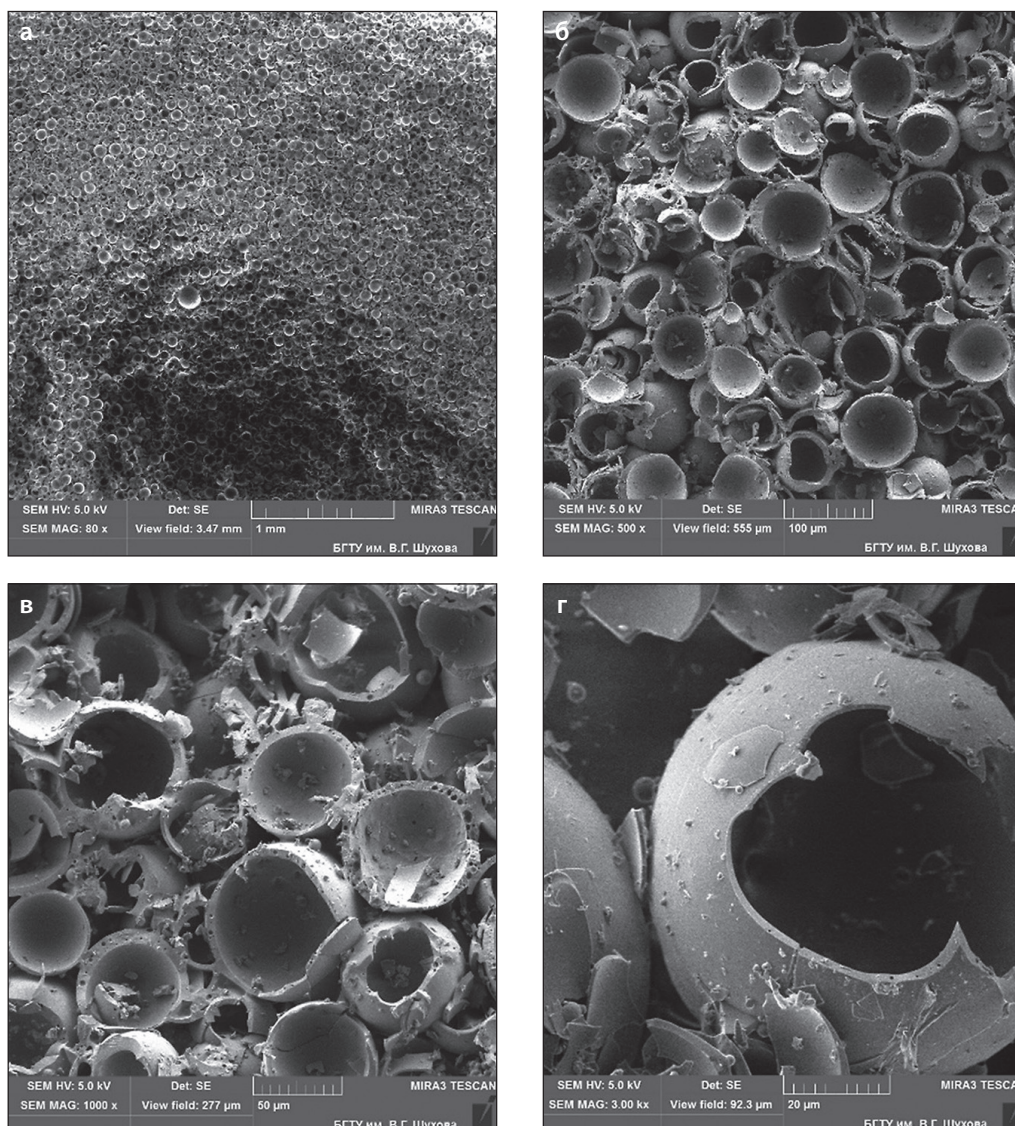


Рис. 3. Микроструктура материалов на основе микросфер и жидкого стекла при увеличении от 80х до 3000х: а – 80х; б – 500х; в – 1000х; г – 3000х

ными микросферами (частицами микрозаполнителя) минимальна. Такая толщина не препятствует формированию контактной структуры связывания микрозаполнителя, то есть имеет место контактное омоноличивание микросфер.

Регулирование межзерновой пустотности способствует оптимизации структуры материала, а следовательно, и его свойств. Подобное регулирование осуществляется как за счет изменения содержания связующего компонента, так и за счет давления, создающегося при формировании изделий. Первоначально происходит распределение связующего в тонких пленках по поверхности микросфер с заполнением поверхностного рельефа этих частиц. При этом возможно незначительное повышение плотности смесей за счет контракции, в основе которой лежит действие капиллярных сил. В дальнейшем при увеличении содержания связующего заполняются межзачайковые полости. Приложение внешнего давления способствует сближению частиц микрозаполнителя и уменьшению пористости. Ограничивающим фактором повышения величины прессования является прочность поверхностного слоя микросфер и прочность микросфер, разрушение которых не является желательным.

Структура отвержденной системы «отвержденное связующее — микросферы» является основой формирования свойств изделий. Прочность изделий определяется прочностью компонентов системы и прочностью адгезионного контакта. Новообразования от затвердевшего связующего хорошо закристаллизованы и сконцентрированы в зоне контакта частиц заполнителя между собой. Ввиду высокой адгезии слабым местом в системе становится оболочка микросфер, по которым происходит разрушение.

Плотность, теплопроводность, водопоглощение и морозостойкость материала формируются за счет структуры его порового пространства. Поровая структура материала складывается из межзерновых пустот и объема пор, герметично изолированного внутри микросфер. Пористость матрицы (отвержденной в результате обжига жидкого стекла) незначительна, и ее величина не превышает статистической погрешности. Эти факторы и определяют относительно невысокую плотность и теплопроводность материала. Водопоглощение материала обусловлено наличием незамкнутых ячеек в межпоровом пространстве. Отметим, что в результате проникновения влаги в материал его теплопроводность повышается.

Морозостойкость изделий достаточно высокая и объясняется демпфирующими свойствами материала при замораживании. Влага не проникает в ми-

кросферы, на которые мороз не оказывает влияния, а частично заполняет макропоры. Объем микросфер в материале составляет около 70–80%, а разрушение от мороза приходится только на связующее и поверхности контакта связующего с микросферами. Следовательно, общая потеря прочности от мороза незначительна.

Обжиговые изделия на основе жидкого стекла и алюмосиликатных микросфер могут применяться в качестве стеновых конструкционно-теплоизоляционных материалов. В регионах с умеренным и теплым климатом дополнительная теплоизоляция может не применяться, как и многослойные конструкции. Это сделает возможным оптимизацию строительного процесса как по расходам материалов и по трудоемкости, так и по цене. Эти факторы наравне с относительно невысокой температурой обжига также способствуют повышению энергетической эффективности применяемых конструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В зависимости от соотношения компонентов и условий формования характеристики изделий на основе жидкого стекла и алюмосиликатных микросфер могут изменяться в значительных пределах. Увеличение содержания жидкого стекла в составе материала и увеличение давления при формировании образцов при неизменных режимах обжига ожидаемо способствуют повышению прочности изделий. Морозостойкость изделий объясняется демпфирующими свойствами материала при замораживании. Снижение прочности на сжатие при 75 циклах замораживания и оттаивания (по сравнению с прочностью сухих образцов) составляет 8–11%, а при 100 циклах — 11–14%. Результаты вполне удовлетворительные, при этом уменьшение снижения прочности может быть достигнуто при оптимизации режимов обжига материала.

Обжиговые материалы на основе жидкостеклового связующего и алюмосиликатных микросфер превосходят сопоставимые по плотности керамические составы более чем в 2,5 раза. В регионах с умеренным и теплым климатом дополнительная теплоизоляции может не применяться, равно как и многослойные конструкции. Это сделает возможным оптимизацию строительного процесса как по расходам материалов и по трудоемкости, так и по цене. Отметим, что для этих регионов определяющим являются показатели комфортности: температура и влажность в помещении, разница температур между внутренней поверхностью ограждающей конструкции и помещением.

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» [Текст]. Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. 222 с.
3. Сеницин 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: WAQMDV
4. Lagosz A., Szymanski P., Walczak P. Influence of the fly ash properties on properties of autoclaved aerated concrete. 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.
5. Бессонов И.В., Бурьянов А.Ф. Пеногипс в современном малоэтажном строительстве. *Жилищное строительство*. 2024;5:26–34. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-5-26-34> – EDN: MVDQII
6. Байков И.Р., Смородова О.В., Трофимов А.Ю., Кузнецова Е.В. Экспериментальное исследование теплоизоляционных наноматериалов 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
7. Гусев Б.В., Кудрявцева В.Д., Потапова В.А. Бетоны с нанодобавкой из обожженного вторичного бетона. *Нанотехнологии в строительстве*. 2020;12(5):245–249. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-5-245-249> – EDN: CQHSCAM.
8. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Модель высокопрочного лёгкого бетона. *Строительные материалы*. 2024;12:34–41. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-831-12-34-41>
9. Звездов А.И., Фаликман В.Р. Высокопрочные лёгкие бетоны в строительстве и архитектуре. *Жилищное строительство*. 2008;5:2–6. EDN: JVNSPN
10. 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: AKJMVA
11. Селиванов Ю.В., Шильцина А.Д., Селиванов В.М., Логинова Е.В., Королькова Н.Н. Составы и свойства керамических теплоизоляционных строительных материалов из масс низкотемпературного вспенивания на основе глинистого сырья. *Инженерно-строительный журнал*. 2012;3:35–40. <https://doi.org/10.5862/MCE.29.4> – EDN: PDZJST
12. 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>
13. Иванова Н.А. Основные направления перспектив развития жилищного строительства на местном уровне. *Московский экономический журнал*. 2018;4:65–74. EDN: YNHDFJ
14. Weber H., Hullmann H. *Porobeton Handbuch. Planen und Bauen mit System*. Gtersloh: Bertelsmann Springen Bauverlag; 2002.
15. Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Бессонов И.В., Медникова Е.А. Энергетическая эффективность строительных систем: монография. 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> – EDN: OUWLAU
16. Лесовик В.С., Сулейманова Л.А., Кара К.А. Энергоэффективные газобетоны на композиционных вяжущих для монолитного строительства. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2012;3:10–20. EDN: PASHPT
17. Сулейманова Л.А., Кара К.А. Влияние формы, размера пор и внешнего давления на среднюю плотность и прочность неавтоклавного ячеистого бетона. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2011;2:71–77. – EDN: NYATJT
18. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Высокопрочные лёгкие бетоны: монография; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2022. 192 с. Текст: непосредственный. ISBN 978-5-9227-1265-1. – EDN: UCJRAZ
19. Гладких И.В., Волянкина Е.П. Безобжиговые теплоизоляционные материалы на основе зольных микросфер из золотавала Западно-Сибирской ТЭЦ. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2008;4:49–53. EDN: ISFCSN
20. Drozhzhin V.S., Pikulin I.V., Kuvaev M.D. et al. Natural silicate microspheres. Properties and production methods. *Moscow Phys. 1999;Soc.9:215–222*.
21. Pandey G.S., Gain V.K. Cenosphere-load in coal ash discharge of thermal power plant. *Res. Ind.* 1993;38(2):99–100.
22. Бессонов И.В., Жуков А.Д., Горбунова Э.А., Говряков И.С., Гудков П.К., Богомолова Л.К. Прогнозирование водостойкости высокопористого материала на основе жидкого стекла. *Приволжский научный журнал*. 2024;2:90–99. УДК 691-405.8. ISSN 1995-2511. EDN: NIJLVK
23. 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
24. Сапелин А.Н., Сапелин Н.А. Влияние структуры пустот на прочность силикатных строительных материалов. *Строительные материалы*. 2011;5:44–48. EDN: OBNCKZ
25. Сапелин А.Н. Сорбционные свойства стеновых материалов с применением микросфер. *Academia. Архитектура и строительство*. 2013;3:101–104. EDN: RHTVYV
26. Сапелин А.Н., Бессонов И.В. Коэффициенты структуры как критерий оценки теплотехнического качества строительных материалов. *Строительные материалы*. 2012;6:26–28. EDN: PCFYAN

27. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Лёгкие бетоны на полых и пористых заполнителях. *Строительные материалы*. 2024;7:41–47. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-826-7-41-47> – EDN: UNEDCX
28. Бессонов И.В., Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Говряков И.С., Горбунова Э.А. Оптимизация свойств и структуры особолёгких 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
29. 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

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

Бессонов Игорь Вячеславович – кандидат технических наук, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21, Российская Федерация, советник Российской академии архитектуры и строительных наук; 119019, Москва, ул. Новый Арбат, 19, Российская Федерация, bessonoviv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9234-4075>

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

Медведев Андрей Александрович – доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация; доцент кафедры геофизики Московского геологоразведочного университета, 117485, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, Российская Федерация, medvedev747@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2930-2606>

Малова Элина Александровна – аспирант кафедры строительного материаловедения Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация; ведущий инженер Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21, Российская Федерация, eg15082000@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7241-4136>

Говряков Илья Сергеевич – ведущий инженер Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21, Российская Федерация, govr190@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8327-9980>

ВКЛАД АВТОРОВ

Бессонов И.В. – развитие методологии и общей концепции исследований.

Жуков А.Д. – написание исходного текста, его редактирование.

Медведев А.А. – адаптация цифровых методик к решению задач, изложенных в статье.

Малова Э.А. – проведение экспериментальных исследований и промежуточные выводы.

Говряков И.С. – обработка результатов эксперимента и заключение.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 30.04.2026; одобрена после рецензирования 03.08.2026; принята к публикации 10.08.2026.