

УДК 691-405.8

И. В. БЕССОНОВ¹, канд. техн. наук, гл. науч. сотрудник; **А. Д. ЖУКОВ^{1,2}**, канд. техн. наук, доц. кафедры строительного материаловедения; **Э. А. ГОРБУНОВА**, магистрант², инженер¹; **И. С. ГОВРЯКОВ**, аспирант², вед. инженер¹; **П. К. ГУДКОВ³**, преп.; **Л. К. БОГОМОЛОВА¹**, канд. хим. наук, гл. науч. сотрудник

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОДОСТОЙКОСТИ ВЫСОКОПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО СТЕКЛА

¹ФГБУ НИИСФ РААСН «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: вспененное жидкое стекло, холодное отверждение, модифицированное вяжущее, активный эксперимент, статистическая обработка, аналитическая оптимизация.

Проведены исследования прочностных характеристик и коэффициента размягчения вспененного жидкого стекла на основе модифицированного вяжущего холодного отверждения, а также разработана методика прогнозирования свойств материала на основе вспененного жидкого стекла и подбора его состава.

В результате исследований получены статические зависимости прочности и коэффициента размягчения материала от расхода модифицированного вяжущего, содержания портландцемента и модификатора. На основе аналитической оптимизации определен оптимальный расход портландцемента. Получена номограмма, с помощью которой может решаться задача прогнозирования свойств изделий в зависимости от рецептурных параметров.

Вспененное стекло по своей структуре и составу матрицы является теплоизоляционным материалом, в котором объединяются положительные свойства как теплоизоляции на основе минеральных волокон (прочностные характеристики и негорючесть) и ячеистых пластмасс (мелкоячеистая замкнутая или квазизамкнутая пористость). Использование композиций на основе вспененного жидкого стекла холодного отверждения позволяет также снизить энергетические затраты на изготовление изделий, равно, как и отрицательную нагрузку на окружающую среду.

Вектором развития отечественного строительства является разработка, проектирование и применение строительных систем, обеспечивающих заданные тепло-влажностные эксплуатационные режимы. Если речь идет о жилых или общественных постройках, то основным критерием является комфортность помещений. Для технологических объектов (от складов сельхозпродуктов до



производственных цехов) главным является обеспечение условий для нормального протекания технологических процессов. Во всех случаях обязательным являются условия безопасности: как экологической (отсутствие вредных выбросов), так и пожарной. Учитываются также энергетические затраты на изготовление изделий. Очевидно, что использование энергоемких технологических процессов создает значительную отрицательную нагрузку на окружающую среду и предполагает дополнительные расходы топлива [1, 2].

Одним из основных компонентов используемых строительных систем являются теплоизоляционные материалы и изделия на их основе. В наибольших объемах используются две группы изделий: на основе минеральных волокон (предпочтительнее на основе каменной ваты) и вспененные пластмассы. Вспененные пластмассы по сравнению с изделиями на основе каменной ваты имеют меньшую плотность и теплопроводность, а также низкое водопоглощение и гигроскопичность, что обеспечивает стабильность теплофизических показателей в различных условиях эксплуатации. Большинство вспененных пластмасс являются горючими, что значительно ограничивает возможности их применения [3, 4].

Свойства вспененных пластмасс во многом определены их мелкоячеистой структурой. Газ (воздух, CO₂ или др.), содержащийся в ячейках находится в иммобилизованном состоянии при практически нулевой конвекции, что и определяет низкую теплопроводность. Плотные межъячейковые перегородки препятствуют движению паровоздушных смесей в структуре материала, что, в свою очередь, и определяет стабильность влажностных показателей изделий [5, 6]. В связи с изложенным разработка материалов, имеющих высокую пористость и негорючую матрицу, является актуальной задачей, которая реализуется в технологиях пеностекла, вспенивающейся стеклокерамики и материала на основе вспененного жидкого стекла [7–9].

Пеностекло применяют как в виде штучных изделий (в качестве плитной изоляции, блоков, фасонных изделий сложной геометрической формы), так и в виде сыпучих материалов – пеностекляного щебня, применяемого в качестве наполнителя и засыпки, и гранулированного и микрогранулированного пеностекла, применяемого в составах легких штукатурных смесей. Материал негорючий и имеет низкую теплопроводность и относительно высокие прочностные показатели. Изготовление изделий предполагает использование обжиговых (до 1300 °С) процессов: высокотемпературное вспучивание стеклянного расплава и быстрое остывание с последующим отжигом для снятия внутренних напряжений [10, 11]. Одним из направлений снижения энергоемкости изготовления материалов на основе вспененного стекла является использование низкотемпературного так называемого «холодного» отверждения. Этот материал по своим основным свойствам близок к обжиговому пеностеклу, но имеет низкую водостойкость [12, 13].

Композиционные материалы на основе жидкого стекла обладают свойством затвердевать на воздухе при обычных условиях. При этом из-за испарения свободной воды повышается содержание коллоидного кремнезема, который впоследствии коагулирует и уплотняется. Гидроксид натрия в составе жидкого стекла препятствует осаждению кремнекислоты, но углекислота, содержащаяся в воздухе, нейтрализует его, способствуя переходу кремнекислоты в коллоидный раствор. Такая схема отверждения жидкого стекла имеет ряд недостатков, среди

них: высокое водопоглощение ввиду появления поверхностной пленки за счет действия углекислоты, а также низкая скорость твердения [14, 15].

Модифицирующие добавки можно разделить на две категории: жидкая водорастворимая добавка на кремнийорганической основе (этилсиликонат натрия $C_2H_5Si(OH)_2ONa$); сухие минеральные добавки (гидроксид кальция $Ca(OH)_2$ (гашенная известь) и портландцемент (основная реакционно-активная фаза $3CaO \cdot SiO_2$ (C_3S , алит)). Полученные композиции представляют собой неорганические полимеры с развитой капиллярно-пористой структурой. Такая структура характерна для всех пористых материалов на силикатной основе (рис. 1).

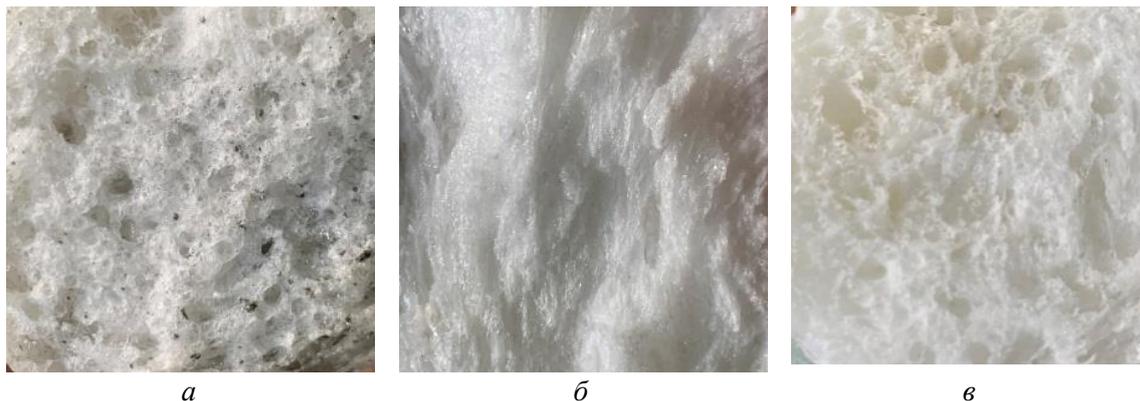


Рис. 1. Структура силикатных пористых материалов: *а* – материал на основе жидкого стекла с добавкой портландцемента; *б* – материал на основе жидкого стекла и кремнийорганической добавки; *в* – материал на основе жидкого стекла и добавки – гидроксида кальция

Целью исследований, изложенных в статье, была оценка прочностных характеристик и коэффициента размягчения пеностекла на основе модифицированного вяжущего холодного отверждения, а также разработка основ методики прогнозирования свойств пеностекла и подбора его состава.

Исследования проводились на основе статистических методов планирования и обработки результатов эксперимента. Оптимизация уравнений осуществлялась аналитическим методом. Этот метод разработан в НИУ МГСУ и опробован при анализе различных технологий и рецептов строительных материалов: от теплоизоляционных до специальных видов бетонов [16, 17]. Метод базируется на следующих положениях: полученные цифровые модели (статистические уравнения регрессии) адекватно описывают изучаемый технологический процесс; каждое уравнение является алгебраической функцией нескольких переменных (по числу значимых варьируемых факторов) и для исследования этой функции применимы методы математического анализа.

В качестве варьируемых факторов принят расход модифицированного вяжущего (X_1), содержание в модифицированном вяжущем портландцемента (X_2) и модификатора (X_3). Функциями отклика приняты прочность материала при сжатии (Y_1) и его коэффициент размягчения (Y_2). Коэффициент размягчения (Y_2) определялся на образцах ($50 \times 50 \times 50$ мм), которые в течение 15 минут находились в воде (рис. 2), далее в воздушных условиях с образцов стекала лишняя влага, образцы взвешивались и испытывались на прочность при сжатии. Коэффициент

размягчения определялся как отношение прочности при сжатии влажного образца к прочности при сжатии сухого образца.



Рис. 2. Испытание образцов материала: а – выдерживание образцов в воде; б – испытание на прочность при сжатии

Средняя плотность рассматривалась как детерминированная функция, зависящая от расхода модифицированного вяжущего. Условия эксперимента представлены в табл. 1.

Таблица 1

Условия проведения эксперимента

Наименование фактора	Символ, X_i	Среднее значение фактора, \bar{X}_i	Интервал варьирования, ΔX_i	Значения фактора на уровнях	
				-1	+1
Расход модифицированного вяжущего, Рмв, кг/м ³	X_1	160	40	120	200
Содержание портландцемента, Сп, %	X_2	9	3	6	12
Содержание модификатора, См, %	X_3	2	1	1	3

Активный эксперимент осуществлялся на основе матрицы полного трехфакторного эксперимента с обработкой результатов в программе *Statistika* и проверкой статистических гипотез по значимости коэффициентов получаемых уравнений регрессии и по адекватности полученных моделей. Доверительные значения коэффициентов, определенные по критерию Стьюдента, составили для прочности при сжатии 1 кПа и для коэффициента размягчения 0,1.

По результатам активного эксперимента и их статистической обработки установлен вид цифровых моделей – алгебраических полиномов, устанавливающих зависимости между варьируемыми факторами и функциями отклика:

– для прочности при сжатии:

$$Y_1 = 142 + 38X_1 + 18X_2 + 5X_3 + 2X_1X_3 - 3X_2^2; \quad (1)$$



– коэффициента размягчения:

$$Y_2 = 0,5 + 0,1X_1 + 0,2X_3 + 0,1X_3. \quad (2)$$

Полученные модели проверены на адекватности по критерию Фишера. Установлено, что рассчитанные значения F -критериев не превышают табличного, и с соответствующей доверительной вероятностью (90 %) модель можно считать адекватной. Этот факт будет учтен при аналитической оптимизации математических моделей и их графической, а также инженерной интерпретации.

Анализ полинома, описывающего взаимосвязь между прочностью при сжатии и варьируемыми факторами, показывает, что эта функция (по своей сути являющаяся функцией нескольких переменных) по одной из этих переменных, а именно по расходу полимера (X_2), имеет локальный экстремум. Поэтому мы можем воспользоваться математическим аппаратом аналитической локальной оптимизации.

Аналитическая оптимизация основана на том, что функции для прочности и плотности $Y_1 = f_1(X_1, X_2, X_3)$ и $Y_2 = f_2(X_1, X_2, X_3)$ – алгебраические полиномы и к ним допустимо применение методов математического анализа, при условии, что не будет нарушаться условие адекватности. В рассматриваемом случае принята следующая схема:

– уравнение $Y_1 = f_1(X_1, X_2, X_3)$ дифференцируют по X_2 и приравняют к нулю, определяя экстремум функции Y_1 по X_2 ;

– решают функции $Y_1 = f_1(X_1, X_2, X_3)$ и $Y_2 = f_2(X_1, X_2, X_3)$ при $X_2 = \text{opt}$ и осуществляют локальную оптимизацию.

Аналитическая оптимизация включает следующую последовательность действий:

1) Определяем величину локального экстремума функции

$Y_1 = f_1(X_1, X_2, X_3)$ по X_2 :

$$\frac{\partial Y_1}{\partial X_2} = 5 - 6X_2 = 0 \rightarrow X_2 = \frac{5}{6} = 0,83.$$

2) Рассчитываем величину натурального значения расхода модификатора (соответствующего возможному получению максимальной прочности при сжатии затвердевшей штукатурной смеси), используя формулу декодирования фактора:

Спц = $9 + 0,83 \times 3 = 11,4$ % (с учетом дисперсии результатов 10–12 %).

3) Рассчитываем математические модели (полиномы) для оптимизированного значения фактора $X_2 = 0,83$:

– для прочности при сжатии:

$$Y_1 = 156 + 38X_1 + 5X_3 + 2X_1X_3: \quad (3)$$

– коэффициента размягчения:

$$Y_2 = 0,6 + 0,1X_1 + 0,1X_3. \quad (4)$$

Графическая интерпретация полученных зависимостей (3) и (4) позволила разработать номограмму, с помощью которой возможно решение прямой и обратной задач цифрового моделирования. *Интерполяционные решения* на всей области изменения расхода модифицированного вяжущего и содержания модификатора (факторов X_1, X_3) при оптимизированном значении фактора X_2 (оптимальное содержание портландцемента) представлены графически (рис. 3) в виде номограммы. В секторе I номограммы определяется прочность при сжатии; в секторе II – определяется коэффициент размягчения; в секторе III – средняя плотность.

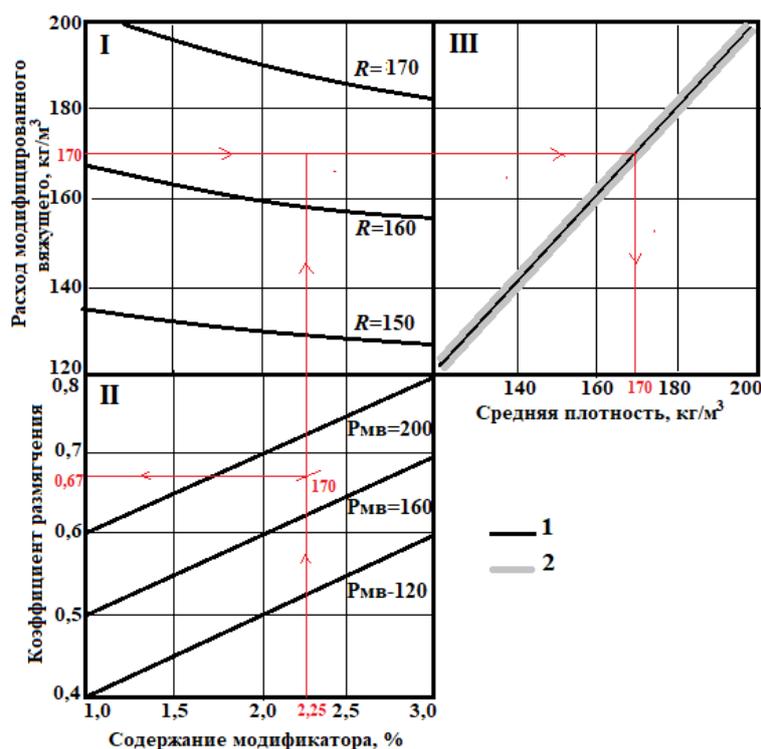


Рис. 3. Номограмма для оценки свойств ячеистого стекла по составу (линии со стрелками); оптимальный расход портландцемента 10–12 %. 1 – математическое ожидание результата; 2 – дисперсия результата (при нормальном распределении)

Номограмму можно использовать для прогнозирования свойств или подбора состава пеностекла холодного отверждения. Последовательность решения прогностической задачи следующая. Задаем расход модифицированного вяжущего (допустим 170 кг/м^3) и содержание модификатора (допустим 2,25%). В первом секторе из точки 170 кг/м^3 проводим прямую параллельную оси абсцисс до пересечения с прямой средней плотности во третьем секторе. Опускаем перпендикуляр на ось средней плотности и получаем значение, равное $170\text{--}172 \text{ кг/м}^3$. Во втором секторе из точки содержание модификатора 2,25 % проводим прямую параллельную оси ординат. При пересечении с прямой расхода модифицированного вяжущего 170 кг/м^3 (интерполяционная прямая) получаем точку, из которой опускаем перпендикуляр на ось ординат и получаем значение коэффициента размягчения равное 0,67.

Прогнозирование свойств композиционного вяжущего может также осуществляться с помощью реализации специальной программы для ЭВМ, алгоритм которой включает блок ввода данных и их кодировки (приведения к интервалу $[-1, 1]$), расчетный блок (на основе двухфакторных полиномов (3) и (4)), блок вывода результатов на дисплей компьютера или на печать.

На основе экспериментальных данных выяснилось, что процентное содержание добавки портландцемента, 10–12 %, позволяет получить оптимальные показатели по коэффициенту размягчения. Повышение прочности и коэффициента размягчения в системе «жидкое стекло – портландцемент – модификатор» основано на следующих механизмах. При взаимодействии компонентов (свободная вода в жидком стекле связывается с портландцементом)

образуются низкоосновные гидросиликаты кальция, а также гидроксид кальция, который впоследствии связывает свободные катионы натриевого жидкого стекла в нерастворимые соединения. Реакцию взаимодействия трехкальциевого силиката портландцемента и свободной воды в жидком стекле можно представить следующим образом:



Портландцемент выполняет функцию активатора твердения силикатной композиции, а также участвует в формировании повышенной водостойкости материала за счет образования сетки нерастворимых натрий-кальциевых соединений.

Исследования проводились 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».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Foam polymers in multifunctional insulating coatings / К. А. Ter-Zakaryan, A. D. Zhukov, E. Yu. Bobrova [et al.] // *Polymers*. – 2021. – № 13(21). – 3698. – <https://doi.org/10.3390/polym13213698>.
3. Теплоизоляционные стекломатериалы. Пеностекло : монография / Н. И. Минько, О. В. Пучка, М. Н. Степанова, С. С. Вайсера. – 2-е изд., испр. – Белгород : БГТУ, 2016. – 263 с. – Текст : непосредственный.
4. Мирюк, О. А. Ячеистые материалы на основе жидкого стекла / О. А. Мирюк. – Текст : электронный // *Universum : Технические науки : электронный научный журнал*. – 2015. – № 4-5 (17). – URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/2162>.
5. Modified polyethylene foam for critical environments / К. А. Ter-Zakaryan, A. D. Zhukov, I. V. Bessonov [et. al.] // *Polymers*. – 2022. – № 14. – 4688. – <https://doi.org/10.3390/polym14214688>.
6. Zhukov, A. Ensuring the Durability of Buildings through the Use of Insulation Systems Based on Polyethylene Foam. *Buildings* / A. Zhukov, I. Stepina, S. Bazhenova. – 2022. – № 12 (11). – 1937. – <https://doi.org/10.3390/buildings12111937> – 10 Nov 2022.
7. Управление структурой и свойствами акустических материалов на основе пеностеклокомпозиций / В. С. Лесовик, С. В. Алексеев, И. В. Бессонов, С. С. Вайсера. – Текст : электронный // *Строительные материалы*. – 2018. – № 6. – С. 41–44. – <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-760-6-41-44>.
8. Влияние влагосодержания, воздухопроницаемости и плотности материала на его звукопоглощающие характеристики / С. С. Вайсера, О. В. Пучка, В. С. Лесовик [и др.]. – Текст : электронный // *Строительные материалы*. – 2017. – № 6. – С. 24–27. – <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-749-6-24-27>.
9. Lv, L. Application analysis of energy-saving, green and environmentally friendly building materials in engineering [J] / L. Lv. // *Engineering technology research*. – 2022. – № 7(11). – 123–125. – DOI 10.19537.
10. Wenchao Wang. On the Application of foam Glass in Interior Design / Wenchao Wang, Jiaqi Chi, Siqi Niu // *E3S Web of Conferences*. – 2023. – 406. – 04033. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340604033>.



11. Preparation, characterization and self-foaming mechanism of total-tailings-based foamed glass-ceramics / Nanyan Hu, Fanghui Fu, Binyu Luo [et al] // *Ceramics International*. – October 2023. – Volume 49, Issue 19, 1. – P. 31881–31890. – <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.07.149>.

12. Rodrigues, C. Prospective life cycle assessment of a novel building system with improved foam glass incorporating high recycled content / C. Rodrigues, J. König, F. Freire // *Sustainable Production and Consumption*. – March 2023. – Volume 36. – P. 161–170. – <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.01.002>.

13. Исследование эксплуатационных качеств вспененных материалов на основе жидкого стекла холодного отверждения / И. В. Бессонов, Б. И. Булгаков, О. В. Александрова, Э. А. Горбунова. – Текст : электронный // *Нанотехнологии в строительстве*. – 2023. – Том 15, № 5. – С. 424–437. – <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-424-437>. – EDN: WMFMFZ.

14. Малявский, Н. И. Кальций-силикатные отвердители жидкого стекла для получения водостойких щелочносиликатных утеплителей / Н. И. Малявский, В. В. Зверева. – Текст : электронный // *Интернет-вестник ВолгГАСУ*. – 2015. – Выпуск 2 (38). – Ст. 5. – URL: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>.

15. Лотов, В. А., Хабибулин Ш. А. Применение модифицированного жидкостекольного, вяжущего в производстве строительных материалов / В. А. Лотов, Ш. А. Хабибулин. – Текст : непосредственный // *Строительные материалы*. – 2015. – № 1. – С. 72–75.

16. Цифровые методы оптимизации составов бетонного полотна / Р. С. Поудел, И. В. Бессонов, А. Д. Жуков [и др.]. – Текст : электронный // *Строительные материалы*. – 2022. – № 6. – С. 20–24. – <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-20-24>.

17. Experimental identification of the fractional parameter of the fractional derivative standard linear solid model for fiber-reinforced rubber concrete / I. I. Popov, M. V. Shitikova, A. V. Levchenko [et al] // *Mechanics of advanced materials and structure*. Accepted 13 March 2023. – <https://doi.org/10.1080/15376494.2023.2191600>.

BESSONOV Igor Vyacheslavovich¹, candidate of technical sciences, chief science officer; ZHUKOV Aleksey Dmitrievich^{1,2}, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of construction materials; GORBUNOVA Elina Aleksandrovna^{1,2}, undergraduate student, engineer; GOVRYAKOV Ilya Sergeevich^{1,2}, postgraduate student, senior engineer; GUDKOV Pyotr Kirillovich³, teacher; BOGOMOLOVA Larisa Konstantinovna¹, candidate of chemical sciences, chief science officer

PREDICTION OF WATER RESISTANCE OF A HIGHLY POROUS MATERIAL BASED ON LIQUID GLASS

¹Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences

21, Lokomotivny Dr., Moscow, 127238, Russia. Tel.: +7 (495) 482-40-76;
e-mail: niisf@niisf.ru

²National Research Moscow State University of Civil Engineering

26, Yaroslavskoe Hwy, Moscow, Russia. Tel.: +7 (495) 781-80-07; e-mail: kanz@mgsu.ru

³Financial University under the Government of the Russian Federation

49/2, Leningradsky Ave., Moscow, 125993, Russia. Tel.: +7 (495) 249-52-49;
e-mail: academy@fa.ru

Key words: foamed liquid glass, cold curing, modified binder, active experiment, statistical processing, analytical optimization.

Foamed glass in its structure and composition of the matrix is a heat-insulating material, which combines the positive properties of both thermal insulations based on mineral fibers (strength characteristics and incombustibility) and cellular plastics (small-cell closed or quasi-closed porosity). The use of compositions based on cold-cured foamed liquid glass also reduces the energy costs of manufacturing products, as well as the negative impact on the environment.

The purpose of the research was to evaluate the strength characteristics and softening coefficient of foamed liquid glass based on a modified binder of cold curing, as well as to develop the basics of a methodology for predicting the properties of foamed liquid glass and selecting its composition. As a result of the research, static dependences of the strength and softening coefficient of the material on the flow of the modified binder, the content of Portland cement and the modifier were obtained. On the basis of analytical optimization, the optimal consumption of Portland cement was determined. A nomogram has been obtained, which can be used to solve the problem of predicting the properties of products depending on the prescription parameters.

REFERENCES

1. 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 ; ISBN 978-5-16-110007-3. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/1897101>.
2. Ter-Zakaryan K. A., Zhukov A. D., Bobrova E. Yu., Bessonov I. V., Mednikova E. A. Foam Polymers in Multifunctional Insulating Coatings. *Polymers*. 2021. № 13(21). 3698. – URL: <https://doi.org/10.3390/polym13213698>.
3. Minko N. I., Puchka O. V., Stepanova M. N., Vaysera S. S. Teploizolyatsionnye steklomaterialy. Penosteklo [Thermal insulation materials. Foam glass]: monografiya. 2-e izd., ispr. – Belgorod: BGTU, 2016. 263 p.
4. Miryuk O. A. Yacheistye materialy na osnove zhidkogo stekla [Cellular materials based on liquid glass]. *Universum: Tekhnicheskie nauki zhurnal [Technical sciences] : elektron. nauch. zhurnal*. 2015. № 4-5 (17). URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/2162>.
5. Ter-Zakaryan K. A., Zhukov A. D., Bessonov I. V., Bobrova E.Y., Pshunov T. A., Dotkulov K. T. Modified Polyethylene Foam for Critical Environments. *Polymers* 2022, № 14. 4688. – URL: <https://doi.org/10.3390/polym14214688>.
6. Zhukov A., Stepina I., Bazhenova S. Ensuring the Durability of Buildings through the Use of Insulation Systems Based on Polyethylene Foam. *Buildings*. – 2022. № 12 (11). 1937. – URL: <https://doi.org/10.3390/buildings12111937> – 10 Nov 2022.
7. Lesovik V. S., Alekseev S. V., Bessonov I. V., Vaysera S. S. Upravlenie strukturoy i svoystvami akusticheskikh materialov na osnove penosteklokompozitov [Control of the structure and properties of acoustic materials based on foam glass composites]. *Stroitelnye materialy [Building materials]*. 2018. № 6. P. 41–44. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-760-6-41-44>.
8. Vaysera S. S., Puchka O. V., Lesovik V. S., Bessonov I. V., Alekseev S. V. Vliyanie vlagosoderzhaniya, vozdukhopronitsaemosti i plotnosti materiala na ego zvukopogloshchayushchie kharakteristiki [Influence of moisture content, breathability, and density of a material on its sound-absorbing characteristics]. *Stroitelnye materialy [Building materials]*. – 2017. – № 6. – P. 24–27. – DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-749-6-24-27>.
9. Lv L. Application analysis of energy-saving, green and environmentally friendly building materials in engineering [J]. *Engineering technology research*. – 2022. – № 7(11) : 123-125. DOI: 10.19537.



10. Wenchao Wang, Jiaqi Chi, Siqi Niu. On the Application of foam Glass in Interior Design. E3S Web of Conferences 406, 04033 (2023). – URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340604033>.

11. Nanyan Hu, Fanghui, Binyu Luo, Yicheng Ye, Dunxi Chen, Zhiing Ou, Jiangli Li. Preparation, characterization and self-foaming mechanism of total-tailings-based foamed glass-ceramics. Ceramics International. Volume 49, Issue 19, 1. P. 31881-31890. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.07.149>.

12. Rodrigues C., König J., Freire F. Prospective life cycle assessment of a novel building system with improved foam glass incorporating high recycled content. Sustainable Production and Consumption. March 2023. Volume 36. P. 161–170. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.01.002>.

13. Bessonov I. V., Bulgakov B. I., Aleksandrova O. V., Gorbunova E. A. Issledovanie ekspluatatsionnykh kachestv vspenennykh materialov na osnove zhidkogo stekla kholodnogo otverzhdeniya [Researching performance qualities of foamed materials based on cold-cured liquid glass]. Nanotekhnologii v stroitelstve [Nanotechnology in construction]. 2023. Vol. 15, № 5. P. 424–437. – URL: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-424-437>. EDN: WMFMFZ.

14. Malyavsky N. I., Zvereva V. V. Kaltsiy-silikatnye otverditeli zhidkogo stekla dlya polucheniya vodostoykikh shchyolochnosilikatnykh utepliteley [Calcium-silicate hardeners of liquid glass to produce water-resistant alkali-silicate insulation materials]. Internet-vestnik VolgGASU [The online bulletin of VolgGASU]. 2015. Vol. 2(38). P. 5. – URL: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>.

15. Lotov V. A., Khabibulin Sh. A. Primenenie modifitsirovannogo zhidkostekolnogo vyazhushchego v proizvodstve stroitelnykh materialov [The use of modified liquid glass binder in the production of building materials]. Stroitelnye materialy [Building materials]. 2015. № 1. P. 72-75.

16. Poudel R. S., Bessonov I. V., Zhukov A. D., Gudkov P. K., Gorbunova E. A., Mikhaylik E. D. Tsifrovye metody optimizatsii sostavov betonnoy polotna [Digital methods for optimizing concrete web compositions]. Stroitelnye materialy [Building materials]. 2022. № 6. P. 20–24. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-20-24>.

17. Popov I. I., Shitikova M. V., Levchenko A. V., Zhukov A. D. Experimental identification of the fractional parameter of the fractional derivative standard linear solid model for fiber-reinforced rubber concrete. Mechanics of advanced materials and structure. Accepted 13 March 2023. – URL: <https://doi.org/10.1080/15376494.2023.2191600>.

© И. В. Бессонов, А. Д. Жуков, Э. А. Горбунова, И. С. Говряков, П. К. Гудков, Л. К. Богомоллова, 2024

Получено: 01.04.2024 г.