

Комплексная модификация пенобетона неавтоклавного твердения

Дарья Дмитриевна Нецвет¹, Мариана Николаевна Сивальнева²,
Виктория Викторовна Нелюбова², Валерия Валерьевна Строкова²

¹ Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» (СТИ НИТУ МИСИС);

г. Старый Оскол, Россия;

² Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова);
г. Белгород, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из распространенных строительных материалов является ячеистый бетон. Повышение его эффективности может быть обеспечено проведением комплексной модификации. Предложено рецептурно-технологическое решение по получению неавтоклавного пенобетона, которое заключается в применении комплекса модифицирующих добавок, включающих минеральные дисперсные и микроармирующие компоненты. Их введение способствует стабилизации пенобетонной смеси, регулированию процессов структурообразования и управления эксплуатационными показателями готового материала.

Материалы и методы. Использовались портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н, протеиновый пенообразователь «Эталон». Модифицирование пенобетона осуществлялось: кварцевой суспензией, получаемой путем мокрого помола кварцевого песка, синтезированным ангидритом, активатором твердения Na_2SO_4 , базальтовой и стеклянной фибрами. Основные физико-механические характеристики пенобетона определялись по действующим нормативно-техническим документам. Микроструктура изучалась посредством растровой электронной микроскопии.

Результаты. Установлено влияние рецептурных факторов на эксплуатационные показатели качества неавтоклавного пенобетона теплоизоляционного назначения, проведена многокритериальная оптимизация, определены рациональные составы. Получены материалы с маркой по плотности D500 и классом по прочности B1,5–B2.

Выводы. Замена части портландцементного вяжущего на дисперсный модификатор в комплексе с микроармирующими волокнами позволяет получать материалы с повышенными свойствами при сниженных затратах на производство, а именно за счет оптимизации ячеистой структуры повышаются показатели по прочности при сохранении значений плотности и теплопроводности. Данное рецептурное решение приводит к уплотнению и упрочнению межпоровых перегородок, как следствие, «монолитизации» матрицы и каркасной структуры композита, создаваемой микроармирующими компонентами. Материал характеризуется полидисперсной пористостью с широким диапазоном размеров пор с формой, переходящей с правильной округлой на многогранную. В результате повышаются физико-механические и теплоизолирующие показатели пенобетона неавтоклавного твердения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пенобетон, модификация, дисперсные компоненты, базальтовая фибра, стеклянная фибра, микроструктура, неавтоклавное твердение

Благодарности. Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Минобрнауки РФ № FZWN-2023-0006 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Нецвет Д.Д., Сивальнева М.Н., Нелюбова В.В., Строкова В.В. Комплексная модификация пенобетона неавтоклавного твердения // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 2. С. 280–290. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.280-290

Автор, ответственный за переписку: Мариана Николаевна Сивальнева, 549041@mail.ru.

Complex modification of non-autoclaved foam concrete

Daria D. Netsvet¹, Mariana N. Sivalneva², Victoria V. Nelyubova², Valeria V. Stroкова²

¹ Sary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) of the National University of Science and Technology "MISIS" (STI NUST MISIS); Sary Oskol, Russian Federation;

² Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov);
Belgorod, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Cellular concrete is one of the most common building materials. Increase of its efficiency can be ensured by carrying out a complex modification. The paper proposes a formulation and technological solution for the production of non-autoclaved foam concrete, which consists in the use of a complex of modifying additives, including mineral dispersed and micro-reinforcing components. Their introduction contributes to stabilization of the foam concrete mixture, regulation of the processes of structure formation and control the performance of the finished material.

Materials and methods. Portland cement of CEM I 42.5N grade, protein foaming agent “Etalon” were used. Modification of foam concrete was carried out by: quartz suspension obtained by wet milling of quartz sand, synthesized anhydrite, hardening activator Na_2SO_4 , basalt and glass fibres. The main physical and mechanical characteristics of foam concrete were determined according to the current regulatory and technical documents. The microstructure was studied using scanning electron microscopy.

Results. The influence of formulation factors on the operational quality indicators of non-autoclaved foam concrete for thermal insulation purposes was established, multicriteria optimization was carried out, rational compositions were determined. Materials with a density grade of D500 and a strength class of B1.5–B2 were obtained.

Conclusions. The replacement of a part of the Portland cement binder with a dispersed modifier in combination with micro-reinforcing fibres makes it possible to obtain materials with improved properties at reduced production costs, namely, by optimizing the cellular structure, strength indicators increase while maintaining density and thermal conductivity values. This formulation solution leads to the compaction and strengthening of the interpore partitions, as a result, the “monolithization” of the matrix and the frame structure of the composite created by micro-reinforcing components. The material is characterized by polydisperse porosity with a wide range of pore sizes with a shape transitioning from regular rounded to polyhedral. As a result, the physico-mechanical and thermal insulation properties of non-autoclaved foam concrete are increased.

KEYWORDS: foam concrete, modification, dispersed components, basalt fibre, glass fibre, microstructure, non-autoclave hardening

Acknowledgements. The work was realized within the framework of the implementation of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FZWN-2023-0006 using equipment of High Technology Centre at BSTU named after V.G. Shukhov.

FOR CITATION: Netsvet D.D., Sivalneva M.N., Nelyubova V.V., Strokova V.V. Complex modification of non-autoclaved foam concrete. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(2):280-290. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.280-290 (rus.).

Corresponding author: Mariana N. Sivalneva, 549041@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Оптимизация строительства за счет повышения теплотехнических показателей конструкций и качества материалов в целом является основополагающей задачей современного развития фондов производственного и непроизводственного назначения. Ее решение сводится к разработке материалов, сочетающих высокие эксплуатационные свойства, энергоэффективность, технико-экономическую обоснованность, сниженный прессинг на экологию, расширенную область применения, что может реализовываться в производстве ячеистых бетонов, а именно пенобетонов неавтоклавного твердения [1–5].

Потребность в данных материалах определяет необходимость тщательного проектирования и подбора рецептурно-технологических параметров, что позволяет регулировать и управлять качественными и структурными характеристиками готовых композитов [6, 7]. По результатам литературного обзора российских и зарубежных авторов можно выделить основные решения, приводящие к повышению качества неавтоклавных пенобетонов:

- применение композиционных цементных вяжущих [8, 9];
- применение бесцементных вяжущих (гипсовых [10], геополимерных [11], шлакосиликатных [12, 13], высококонцентрированных и др.) [3, 14, 15];
- использование дисперсных компонентов с повышенной активностью и/или инертностью [15–17];
- стабилизация пены за счет введения химических стабилизаторов, комплексных способов поризации [18–21] и др.

Возможность упрочнения матричной системы пенобетона на цементной основе реализуется несколь-

кими способами: физический заключается в формировании высокоплотной упаковки твердой фазы и уплотнении межпорового пространства, что достигается введением полидисперсных наполнителей различной морфологии; химический основан на росте доли кристаллических фаз, который обусловлен процессом взаимного воздействия цемента и пуццолановых добавок. Максимальные результаты от указанных способов возможно получить при комплексном воздействии, которое реализуется рациональным подбором модифицирующих добавок, что, в свою очередь, не несет значительных технологических изменений.

Особое внимание следует уделить применению тонкодисперсных компонентов из природного сырья и суспензии на его основе, которая выполняет роль активной минеральной добавки в системе ячеистого композита, что реализуется авторским коллективом в технологии пенобетонов неавтоклавного твердения. Ранее установлен модифицированный состав ячеистого бетона, включающий фиброволокно, ангидрит и кварцевую суспензию (КС), заменяющую долю цемента на 20 %. В результате достигается стабильность во времени пены и рост прочностных характеристик композита [22].

В работе рассмотрена возможность регулирования структурообразующих процессов на различных этапах твердения за счет применения минеральных добавок с высокой дисперсностью, которые стабилизируют бетонные смеси в период схватывания с последующей интенсификацией твердения. Данное решение имеет важное практическое значение, обусловленное ростом эксплуатационных характеристик материала при условии технико-экономической эффективности.

В связи с вышесказанным целью представленной работы стала разработка пенобетона марки D500 неавтоклавного твердения, модификация которого возможна путем введения в состав дисперсных компонентов различной геометрии и состава, а именно микроармирующей добавки как протяженной структуры, ангидрита и КС как высокодисперсных компонентов. Проведено исследование и анализ основных физико-механических характеристик и микроструктурных особенностей разработанного ячеистого композита.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При получении неавтоклавного пенобетона использовались портландцемент (ПЦ) марки ЦЕМ I 42,5Н (производитель ЗАО «Белгородский цемент»); пенообразователь (ПО) «Эталон», относящийся к протениновым (производитель ООО «АИСТ»). Модифицирование материала осуществлялось:

- кварцевой суспензией, получаемой путем мокрого помола кварцевого песка (месторождение Белгородской области) с модулем крупности 2,5 и насыпной плотностью $1430 \pm 10 \text{ кг/м}^3$. Данный компонент вводился в количестве 20 %, заменяя часть основного вяжущего — цемента;
- синтезированным ангидритом, используемым в дозировке 5 % от массы цемента;
- Na_2SO_4 , используемым в качестве активатора твердения ангидрита (1 % от массы ангидрита);
- фиброволокнами — базальтовой (производитель ООО «Каменный век») и стеклянной фибрами (ООО «Альянс – Строительные технологии»).

Ключевые физико-механические характеристики полученного пенобетона определялись в соответствии с методами, представленными в действующих нормативно-технических документах: ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам»; ГОСТ 12730.1–2020

«Бетоны. Методы определения плотности»; ГОСТ 24816–2014 «Материалы строительные. Метод определения равновесной сорбционной влажности»; ГОСТ 25898–2020 «Материалы и изделия строительные. Методы определения паропроницаемости и сопротивления паропроницанию»; ГОСТ 30256–94 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности цилиндрическим зондом».

Для установления микроструктурных особенностей образцов использовался растровый электронный микроскоп TESCAN MIRA 3 LMU. Изучению подвергался внутренний объем материала, для этого проводилась пробоподготовка, заключающаяся в получении «свежего» скола. Далее с целью остановки процессов гидратации образцы помещались в раствор спирта. Непосредственно перед испытанием образец был извлечен и высушен.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе рассматривается получение пенобетона марки D500 неавтоклавного твердения, получаемого с использованием комплекса минеральных модификаторов и фибры. Указанная марка выбрана ввиду широкого распространения на производстве, а также она является пограничной между теплоизоляционными и конструкционно-теплоизоляционными ячеистыми композитами.

Для выявления преимуществ разрабатываемого материала первоначально были рассчитаны составы: контрольный (бездобавочный) — классическая рецептура, и модифицированный (табл. 1).

Отдельное внимание следует уделить подбору водотвердого отношения (В/Т) ввиду необходимости учета того, что определенная доля воды включена в состав кварцевой суспензии, а оставшаяся часть расходуется в процессе получения пены с плотностью 60 г/л. В данном случае В/Т в пенобетонной смеси принималось равным 0,5.

Табл. 1. Расход компонентов пенобетона в зависимости от состава

Table 1. Consumption of foam concrete components depending on the composition

ПЦ, кг Portland cement, kg	ПО, л Foaming agent, l	Вода, л Water, l	КС, кг Quartz suspension, kg	Ангидрит, кг Anhydrite, kg	Na_2SO_4 , кг Na_2SO_4 , kg	Фибра, кг Fibre, kg
454	4,5	227	–	–	–	–
348	4,5	212,5	105	17	0,17	0,27

Табл. 2. Условия планирования эксперимента

Table 2. Experimental planning conditions

Факторы Factors		Уровни варьирования Levels of variation			Шаг Step
Натуральный вид / Natural name	Кодированный вид / Coded name	–1	0	+1	
Концентрация фиброволокна, % Concentration of fibre, %	x_1	0	0,06	0,12	0,06
Водотвердое отношение Water-solid ratio	x_2	0,4	0,5	0,6	0,1

Проектирование состава материала осуществлялось с применением метода полного факторного эксперимента. Параметры варьирования — концентрация волокон фибры и В/Т (табл. 2).

Определение рациональности состава проводилось по выходным параметрам: прочности на сжатие, средней плотности и коэффициенту теплопроводности. Эти данные положены в основу матрицы планирования (табл. 3) и экспериментальную работу при

установлении физико-механических свойств пенобетона (табл. 4).

Оценка оптимизации свойств производилась путем анализа номограмм физико-механических характеристик полученных составов (рис. 1).

Согласно полученным результатам, можно отметить незначительное снижение плотности при увеличении водотвердого отношения. Более значительное изменение плотности, а именно уплотнение меж-

Табл. 3. Матрица планирования эксперимента

Table 3. Experiment planning matrix

Составы Composition	Номер точки плана Plan point number	Точки плана / Points			
		x_1	x_2	Концентрация фиброволокна, % Concentration of fibre, %	В/Т W/S
Контрольный состав Control composition	1	–1	–1	0	0,4
	2	–1	0	0	0,5
	3	–1	+1	0	0,6
Модифицированный состав (базальтовая фибра) Modified composition (basalt fibre)	4	0	–1	0,06	0,4
	5	0	0	0,06	0,5
	6	0	+1	0,06	0,6
	7	+1	–1	0,12	0,4
	8	+1	0	0,12	0,5
	9	+1	+1	0,12	0,6
Модифицированный состав (стеклянная фибра) Modified composition (glass fibre)	10	0	–1	0,06	0,4
	11	0	0	0,06	0,5
	12	0	+1	0,06	0,6
	13	+1	–1	0,12	0,4
	14	+1	0	0,12	0,5
	15	+1	+1	0,12	0,6

Табл. 4. Выходные параметры для расчетных составов

Table 4. Output parameters for calculated compositions

Составы Composition	Номер точки плана Plan point number	Средняя плотность ρ , кг/м ³ Average density ρ , kg/m ³	Прочность на сжатие R , МПа Compressive strength R , MPa	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°C) Coefficient of thermal conductivity λ , W/(m·°C)
Контрольный состав Control composition	1	504	1,46	0,125
	2	504	2,03	0,119
	3	500	2	0,122
Модифицированный состав (базальтовая фибра) Modified composition (basalt fibre)	4	501	1,69	0,118
	5	502	2,16	0,119
	6	500	1,92	0,117
	7	502	2,33	0,121
	8	500	2,45	0,118
	9	502	2,05	0,116
Модифицированный состав (стеклянная фибра) Modified composition (glass fibre)	10	503	2,03	0,121
	11	502	2,2	0,120
	12	500	2,07	0,116
	13	501	2,4	0,120
	14	503	2,44	0,116
	15	502	2,23	0,117

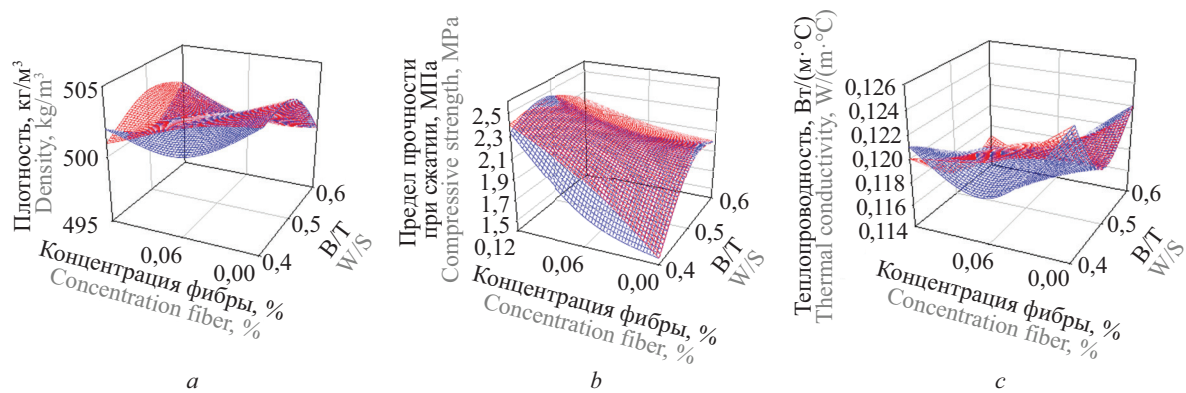


Рис. 1. Зависимость физико-механических характеристик пенобетона от концентрации фиброволокна и водотвердого отношения: *a* — средняя плотность; *b* — прочность на сжатие; *c* — теплопроводность; синяя номограмма — базальтовая фибра; красная номограмма — стеклянная фибра

Fig. 1. Dependence of the physical and mechanical characteristics of foam concrete from the concentration of fibre and the water-solid ratio: *a* — average density; *b* — compressive strength; *c* — thermal conductivity; blue nomograph — basalt fibre; red nomograph — glass fibre

поровых перегородок и рост плотности композита в целом, вызывает введение фибры в ячеистую систему, что может быть вызвано несколькими факторами:

- 1) увеличением в системе доли твердой фазы;
- 2) кластерообразованием, связанным с «осаждением» твердых частиц и их агрегированием на протяженной поверхности фибры [23].

Соответственно, уплотнение структуры композита сказывается и на прочности. Увеличение содержания фибры вплоть до 0,12 % способствует росту предела прочности. При этом достигаемые значения прочности составов с волокнами различного вида практически сопоставимы, что говорит о незначительном влиянии вида волокна на прочностные показатели.

Вторым входным параметром являлось водотвердое отношение, увеличение которого влечет за собой некоторое падение показателей прочности. Подтверждена оптимальность В/Т, равного 0,5 для пенобетона марки D500. Дальнейшее повышение В/Т увеличивает подвижность смеси, но негативно сказывается на прочностных характеристиках, а снижение В/Т приводит к недостаточной смачиваемости твердых частиц, неоднородности смеси и снижению прочности.

Данный показатель также оказывает влияние на теплопроводность пенобетона, которая снижается при увеличении В/Т и концентрации волокна в системе. Объяснением может служить повышение подвижности смеси и, как следствие, равномерности распределения воздушных пузырьков во всем объеме системы, а введение волокон способствует образованию дополнительных воздушных каналов. Таким образом, формирование условий для комплексной поризации полученного массива обеспечивает рост теплоизолирующей способности готового композита.

Полученные свойства модифицированного пенобетона удовлетворяют ГОСТ 25485–2019 «Бетоны ячеистые. Общие технические условия». На основании экстремальных значений качества определе-

ны два оптимальных состава с использованием базальтовой (состав 1) и стеклянной фибры (состав 2) (табл. 5).

Немаловажным при оценке качества разработанного материала является сравнение со значениями бездобавочного состава (табл. 6). Модифицированный состав пенобетона характеризуется снижением средней плотности, при этом прочность на сжатие увеличивается на 56 % от контрольного образца. Эта зависимость может быть вызвана оптимальной поризацией системы и уплотнением межпоровой перегородки.

Современные исследования не обходятся без изучения микроструктуры материалов [24]. В данном случае оценены морфологические и структурные особенности образцов неавтоклавного пенобетона с выявлением их влияния на качественные показатели.

Все образцы вне зависимости от состава имеют ярко выраженную ячеистую структуру с однородным распределением полимодальных пор, имеющих преимущественно сферическую форму с четко выделенной межпоровой перегородкой между ними (рис. 2).

Для установления роли каждого компонента модифицированных составов отдельно рассматривались образцы пенобетона на композиционном вяжущем, с фиброй каждого типа и без нее. Так, введение кварцевой суспензии, выступающей дисперсным модификатором, как частичная замена портландцемента, привело к увеличению общей пористости композита с размером пор, находящимся в диапазоне 0,5–2 мм, с изменением толщины границы между ними. Дисперсный компонент изменяет толщину межпоровых перегородок с диапазона 130–250 мкм (бездобавочный образец) до диапазона 80–150 мкм (рис. 2, *b, d*). У образцов модифицированных составов отмечается уплотнение структуры матрицы (рис. 2, *d, f, h*), что, в свою очередь, и оказывает существенное влияние на прочностные показатели материалов. Эти изме-

Табл. 5. Составы и свойства модифицированного пенобетона

Table 5. Composition and characteristics of modified foam concrete

Состав/свойства Composition/characteristics	Состав 1 Composition 1	Состав 2 Composition 2
<i>Рациональный состав на 1 м³ / Rational composition for 1 m³</i>		
Цемент, кг Cement, kg	348	348
Пенообразующая добавка, л Foaming agent, l	4,5	4,5
Вода для раствора, л Water for mortar, l	226	226
Кварцевая суспензия, кг Quartz suspension, kg	104	104
Ангидрит, кг Anhydrite, kg	17	17
Na ₂ SO ₄ , кг Na ₂ SO ₄ , kg	0,17	0,17
Фибра, кг Fibre, kg	0,27	0,27
<i>Свойства / Characteristics</i>		
Плотность, кг/м³ Density, kg/m³	500	499
Предел прочности при сжатии, МПа Compressive strength, MPa	2,5	2,4
Класс по прочности Strength class	B2	B1,5
Марка по морозостойкости Frost resistance brand	F25	F25
Теплопроводность, Вт/(м·°C) Thermal conductivity, W/(m·°C)	0,118	0,120
Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па) Vapour permeability, mg/(m·h·Pa)	0,23	0,22
Сорбционная влажность, % Sorption humidity, % при влажности воздуха 75 % at air humidity 75 % при влажности воздуха 95 % at air humidity 95 %	7,2 10,1	7,4 10,7

нения обусловлены наличием микроармирующих элементов, монолитностью структуры перегородки (рис. 2, *ж*). Следует отметить гладкость поверхности пор, хорошую ограниченность и ровную поверхность их края.

Использование протяженного компонента вносит отклонения в пористость системы (рис. 2, *е–ж*). Также необходимо оценить расположение и распределение волокна в матрице и их совместное взаимодействие, что позволяет выявить морфологические

Табл. 6. Основные физико-механические показатели модифицированного и контрольного составов пенобетона

Table 6. The main physical and mechanical parameters of the modified and control compositions of foam concrete

Состав пенобетона Composition of foam concrete	Прочность на сжатие, МПа Compressive strength, MPa	Плотность, кг/м³ Density, kg/m³	Теплопроводность, Вт/(м·°C) Thermal conductivity, W/(m·°C)
Контрольный состав Control composition	1,6	510	0,118
Состав 1 Composition 1	2,5	500	0,118
Состав 2 Composition 2	2,4	503	0,118

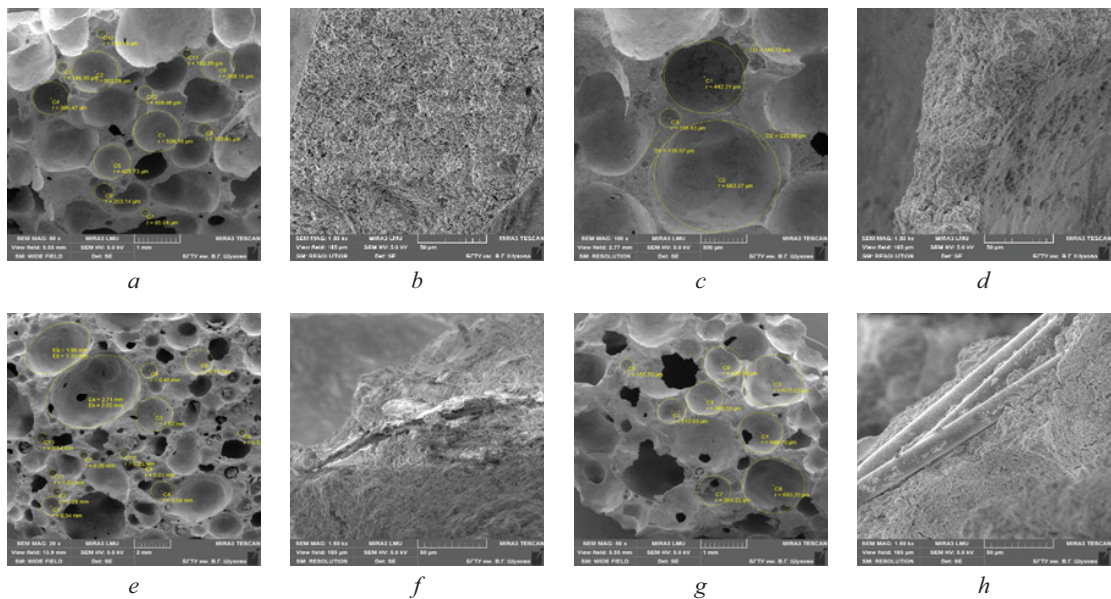


Рис. 2. Микроструктурные особенности пенобетона: *a, b* — пенобетон на цементном вяжущем; *c, d* — пенобетон с дисперсными добавками; *e, f* — пенобетон с дисперсными добавками и базальтовой фиброй; *g, h* — пенобетон с дисперсными добавками и стеклянной фиброй

Fig. 2. Microstructural features of foam concrete: *a, b* — foam concrete based on cement; *c, d* — foam concrete with dispersed additives; *e, f* — foam concrete with dispersed additives and basalt fibre; *g, h* — foam concrete with dispersed additives and glass fibre

особенности порового пространства и структуры ячеистого композита в целом.

Базальтовая фибра (рис. 2, *e, f*) преобразует форму ячеистой структуры: формируются овальные и многогранные поры разного поперечного размера. Но при этом, сравнивая с образцом только с дисперсными добавками, размерные параметры пор сохраняются ($d = 0,9–2,02$ мм). Волокна размещаются в межпоровом пространстве, создавая каркасность ячеистой структуры композита. Наблюдается высокая адгезия матрицы композита к поверхности волокна, которое «обрастает» большим количеством новообразований. В качестве негативного фактора выступает деформация базальтового волокна и уменьшение его диаметра, что связано с воздействием щелочной среды, присущей цементным системам.

Другой вид фибры (стеклянная) характеризуется неравномерностью распределения волокон, отмечаются их скопления с образованием комков (рис. 2, *h*). Поверхность стеклянной фибры покрыта незначительным количеством кристаллических новообразований, что свидетельствует о низкой степени адгезии вяжущего к данному виду волокон. Стеклянная фибра в пенобетоне на композиционном вяжущем приводит к уменьшению размеров пор (0,3–1,5 мм), форма которых преимущественно правильная сферическая. Полидисперсность поровых структур сохраняется и не зависит от типа волокна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных результатов, данные физико-механических характеристик, морфоструктурные

особенности позволили подтвердить целесообразность разработки микроармированного пенобетона, получаемого по технологии неавтоклавного твердения на основе композиционного вяжущего с использованием дисперсного модификатора. Показана роль стабилизирующих компонентов ячеистобетонной смеси с учетом их взаимодействия в системе.

В поэтапном выполнении работы были определены составы с оптимальными значениями компонентов, водотвердым отношением, типом и дозировкой фиброволокон, а также закономерности их влияния на физико-механические характеристики неавтоклавного пенобетона.

Таким образом, разработано рецептурно-технологическое решение, направленное на получение неавтоклавного пенобетона теплоизоляционного назначения, отличающееся применением модифицирующих компонентов в виде минеральных дисперсных добавок (кварцевой суспензии, ангидрита) и микроармирующих волокон (базальтовой или стеклянной фибры). Получены материалы с маркой по плотности D500 и классом по прочности B1,5–B2. Предложенные составы имеют уплотненные и упрочненные межпоровые перегородки, что приводит к «монолитизации» матрицы и каркасной структуры композита, создаваемой микроармирующими компонентами. Ячеистый материал приобретает полидисперсную пористость с широким диапазоном размеров пор с формой, переходящей с правильной округлой на многогранную. В результате повышаются физико-механические и теплоизолирующие показатели пенобетона неавтоклавного твердения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Elrahman M.A., El Madawy M.E., Chung S.-Y., Sikora P., Stephan D. Preparation and characterization of ultra-lightweight foamed concrete incorporating lightweight aggregates // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. Issue 7. P. 1447. DOI: 10.3390/app9071447
2. Zeng X., Lan X., Zhu H., Liu H., Umar H.A., Xie Y. et al. A review on bubble stability in fresh concrete: Mechanisms and main factors // *Materials*. 2020. Vol. 13. Issue 8. P. 1820. DOI: 10.3390/MA13081820
3. Zhou G., Su R.K.L. A review on durability of foam concrete // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Issue 7. P. 1880. DOI: 10.3390/buildings13071880
4. Amran Y.H.M., Farzadnia N., Ali A.A.A. Properties and applications of foamed concrete : a review // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 101. Pp. 990–1005. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112
5. Моргу́н Л.В., Немилостивый А.Г., Гебру Б.К., Моргу́н В.Н. Эволюция применения в строительстве легких бетонов // *Химия, физика и механика материалов*. 2022. № 4 (35). С. 21–36. EDN KTRFDJ.
6. Alfimova N.I., Pirieva S.Yu., Gudov D.V., Shurakov I.M., Korbut E.E. Optimization of receptural-technological parameters of manufacture of cellular concrete mixture // *Construction Materials and Products*. 2020. Pp. 30–36. DOI: 10.34031/2618-7183-2018-1-2-30-36
7. Drozdov A., Osipenkova I., Stupakova O. Dependence of foam concrete properties on technological factors // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 164. P. 14010. DOI: 10.1051/e3sconf/202016414010
8. Воронов В.В., Глаголев Е.С. Особенности гидратации и твердения полиминеральных композиционных вяжущих для пенобетонов // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2020. Т. 17. № 1 (71). С. 122–135. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-1-122-135. EDN ZLGTGN.
9. Тотурбиев Б.Д., Мамаев С.А., Тотурбиева У.Д. Теплоизоляционный пенобетон безавтоклавного твердения из местного нерудного минерального сырья // *Геология и геофизика Юга России*. 2023. Т. 13. № 3. С. 167–177. DOI: 10.46698/VNC.2023.89.94.013. EDN SSPLSC.
10. Череватова А.В., Жерновская И.В., АLEXIN Д.А., Кожухова М.И., Кожухова Н.И., Яковлев Е.А. Теоретические аспекты создания композиционного наноструктурированного гипсового вяжущего повышенной жаростойкости // *Строительные материалы и изделия*. 2019. Т. 2. № 4. С. 5–13. EDN OJFHQO.
11. Кожухова Н.И. Опыт производства ячеистых бетонов на основе геополимерных вяжущих // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2023. № 4. С. 8–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-8-23. EDN QDVWLI.
12. Хейрбеков Р.А., Самченко С.В. Некоторые физико-химические аспекты формирования структуры композиционного шлакосиликатного поризованного арболитового материала // *Техника и технология силикатов*. 2022. Т. 29. № 4. С. 379–390. EDN JKBDQD.
13. Величко Е.Г., Дворников Р.М. Высокоэффективный поризованный арболит на основе шлакосиликатных вяжущих веществ // *Техника и технология силикатов*. 2021. Т. 28. № 4. С. 179–189. EDN RZZIVJ.
14. Лукаш Е.В., Кузьменков М.И. Неавтоклавный пенобетон на основе магнезиального цемента // *Строительные материалы*. 2012. № 11. С. 33–35. EDN PJNDYF.
15. Strokova V., Sivalneva M., Kobzev V. The effect of polyvinyl alcohol on the system of cement-free binding alumino-silicate composition // *Solid State Phenomena*. 2020. Vol. 299. Pp. 169–174. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.169
16. Gencel O., Bilir T., Bademler Z., Ozbakkaloglu T. A Detailed Review on Foam Concrete Composites: Ingredients, Properties, and Microstructure // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Issue 11. P. 5752. DOI: 10.3390/app12115752
17. Dvornikov R.M., Velichko E.G. Wood concrete modified with ground granulated blast furnace slag // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020. No. 6 (91). P. 9107. DOI: 10.18720/CUBS.91.7. EDN JUIUZM.
18. Priyatham B.P.R.V.S., Lakshmayya M.T.S., Chaitanya D.V.S.R.K. Review on performance and sustainability of foam concrete // *Materials Today : Proceedings*. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.080
19. Hou L., Li J., Lu Z., Niu Y. Influence of foaming agent on cement and foam concrete // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 280. P. 122399. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122399
20. Falliano D., Domenico D., Ricciardi G., Gugliandolo E. Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: Effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 165. Pp. 735–749. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.241
21. Дворников Р.М., Самченко С.В. Формирование ячеистой структуры поризованного арболита // *Техника и технология силикатов*. 2022. Т. 29. № 1. С. 82–91. EDN KWNQIT.
22. Нецвет Д.Д., Нелюбова В.В., Строчкова В.В. Композиционное вяжущее с минеральными добавками для неавтоклавных пенобетонов // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2019. № 4. С. 122–131. DOI: 10.34031/article_5cb1e65d077f65.54773394. EDN ZDDGHJ.
23. Morgun V.N., Morgun L.V., Nagorskiy V.V. Diverse particles filler forms influence on mechanical

properties foam concrete mixtures // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 698. Issue 2. P. 022088. DOI: 10.1088/1757-899X/698/2/022088

24. Batool F., Rafi M.M., Bindiganavile V. Microstructure and thermal conductivity of cement-based foam : a review // Journal of Building Engineering. 2018. Vol. 20. Pp. 696–704. DOI: 10.1016/j.jobbe.2018.09.008

Поступила в редакцию 19 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 14 ноября 2024 г.

Одобрена для публикации 27 ноября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Дарья Дмитриевна Нецвет — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительства и эксплуатации горнометаллургических комплексов; Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» (СТИ НИТУ МИСИС); 309516, Белгородская обл. г. Старый Оскол, мкр. Макаренко, д. 42; РИНЦ ID: 685087, Scopus: 55992118000, ResearcherID: L-3354-2016, ORCID: 0000-0002-7292-1154, SPIN-код: 6452-8550; netsvet_dd@mail.ru;

Мариана Николаевна Сивальнева — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов; Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; РИНЦ ID: 685028, Scopus: 57193898450, ResearcherID: K-2030-2016, ORCID: 0000-0002-4957-9207; 549041@mail.ru;

Виктория Викторовна Нелюбова — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник НИЛ «Самоочищающиеся покрытия» Инновационного научно-образовательного и опытно-промышленного центра наноструктурированных композиционных материалов (ИНО и ОПЦ НКМ); Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; РИНЦ ID: 605989, Scopus: 56237522700, ResearcherID: V-2514-2018, ORCID: 0000-0002-5736-5962; nelubova@list.ru;

Валерия Валерьевна Строкова — доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой материаловедения и технологии материалов; Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; РИНЦ ID: 111246, Scopus: 6602722133, ResearcherID: B-5343-2013, ORCID: 0000-0001-6895-4511; vvstrokova@gmail.com.

Вклад авторов:

Нецвет Д.Д. — концепция исследования, сбор материала, обработка материала.

Сивальнева М.Н. — обработка материала, написание статьи.

Нелюбова В.В. — научное руководство, концепция исследования.

Строкова В.В. — развитие методологии, итоговые выводы, научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Elrahman M.A., El Madawy M.E., Chung S.-Y., Sikora P., Stephan D. Preparation and characterization of ultra-lightweight foamed concrete incorporating lightweight aggregates. *Applied Sciences*. 2019; 9(7):1447. DOI: 10.3390/app9071447

2. Zeng X., Lan X., Zhu H., Liu H., Umar H.A., Xie Y. et al. A review on bubble stability in fresh concrete: Mechanisms and main factors. *Materials*. 2020; 13(8):1820. DOI: 10.3390/MA13081820

3. Zhou G., Su R.K.L. A Review on Durability of Foam Concrete. *Buildings*. 2023; 13(7):1880. DOI: 10.3390/buildings13071880

4. Amran Y.H.M., Farzadnia N., Ali A.A.A. Properties and applications of foamed concrete : a review. *Construction and Building Materials*. 2015; 101:990-1005. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112

5. Morgun L.V., Nemilostiviy A.G., Gebru B.K., Morgun V.N. Evolution of application in construction light

concrete. *Chemistry, Physics and Mechanics of Materials*. 2022; 4(35):21-36. EDN KTFRDJ. (rus.).

6. Alfimova N.I., Pirieva S.Yu., Gudov D.V., Shurakov I.M., Korbut E.E. Optimization of receptural-technological parameters of manufacture of cellular concrete mixture. *Construction Materials and Products*. 2020; 30-36. DOI: 10.34031/2618-7183-2018-1-2-30-36

7. Drozdov A., Osipenkova I., Stupakova O. Dependence of foam concrete properties on technological factors. *E3S Web of Conferences*. 2020; 164:14010. DOI: 10.1051/e3sconf/202016414010

8. Voronov V.V., Glagolev E.S. Polymineral composite binders for foam concrete: features of hydration and hardening. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(1):122-135. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-1-122-135. EDN ZLGTGN. (rus.).

9. Toturbiev B.D., Mamaev S.A., Toturbiev U.D. Heat-insulating foam concrete without autoclave harden-

ing from local non-metal mineral raw. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2023; 13(3):167-177. DOI: 10.46698/VNC.2023.89.94.013. EDN SSPLSC. (rus.).

10. Cherevatova A.V., Zhernovskaya I.V., Alehin D.A., Kozhukhova M.I., Kozhukhova N.I., Yakovlev E.A. Theoretical aspects of development of composite nanostructured gypsum binder characterized by increased heat resistance. *Construction Materials and Products*. 2019; 2(4):5-13. EDN OJFHQO. (rus.).

11. Kozhuhova N. Background of geopolymer-based cellular concrete production. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2023; 4:8-23. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-8-23. EDN QDVWLI. (rus.).

12. Kheirbekov R.A., Samchenko S.V. Some physicochemical aspects of the formation of the structure of composite slag-silicate porous wood chip concrete material. *Technique and Technology of Silicates*. 2022; 29(4):379-390. EDN JKBDQD. (rus.).

13. Velichko E.G., Dvornikov R.M. Highly efficient porozed arbolith based on slag silicate bindings. *Technique and Technology of Silicates*. 2021; 28(4):179-189. EDN RZZIVJ. (rus.).

14. Lukash E.V., Kuzmenkov M.I. Non-autoclave foam concrete based on magnesium cement. *Construction Materials*. 2012; 11:33-35. EDN PJNDYF. (rus.).

15. Strokova V., Sivalneva M., Kobzev V. The effect of polyvinyl alcohol on the system of cement-free binding alumino-silicate composition. *Solid State Phenomena*. 2020; 299:169-174. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.169

16. Gencel O., Bilir T., Bademler Z., Ozbakkaloglu T. A Detailed Review on Foam Concrete Composites: Ingredients, Properties, and Microstructure. *Applied Sciences*. 2022; 12(11):5752. DOI: 10.3390/app12115752

17. Dvornikov R.M., Velichko E.G. Wood concrete modified with ground granulated blast furnace

slag. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020; 6(91):9107. DOI: 10.18720/CUBS.91.7. EDN JUIUZM.

18. Priyatham B.P.R.V.S., Lakshmayya M.T.S., Chaitanya D.V.S.R.K. Review on performance and sustainability of foam concrete. *Materials Today : Proceedings*. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.080

19. Hou L., Li J., Lu Z., Niu Y. Influence of foaming agent on cement and foam concrete. *Construction and Building Materials*. 2021; 280:122399. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122399

20. Falliano D., Domenico D., Ricciardi G., Gugliandolo E. Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: Effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density. *Construction and Building Materials*. 2018; 165:735-749. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.241

21. Dvornikov R.M., Samchenko S.V. Formation of the cellular structure of porous wood concrete. *Technique and Technology of Silicates*. 2022; 29(1):82-91. EDN KWNQIT. (rus.).

22. Necvet D., Nelyubova V., Strokova V. Composite binder with mineral additives for non-autoclave foam concrete. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019; 4:122-131. DOI: 10.34031/article_5cb1e65d077f65.54773394. EDN ZDDGHJ. (rus.).

23. Morgun V.N., Morgun L.V., Nagorskiy V.V. Diverse particles filler forms influence on mechanical properties foam concrete mixtures. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2019; 698(2):022088. DOI: 10.1088/1757-899X/698/2/022088

24. Batool F., Rafi M.M., Bindiganavile V. Microstructure and thermal conductivity of cement-based foam : a review. *Journal of Building Engineering*. 2018; 20:696-704. DOI: 10.1016/j.job.2018.09.008

Received August 19, 2024.

Adopted in revised form on November 14, 2024.

Approved for publication on November 27, 2024.

BIONOTES: **Daria D. Netsvet** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction and Operation of Mining and Metallurgical Complexes; **Stary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) of the National University of Science and Technology “MISIS” (STI NUST MISIS)**; 42 microdistrict Makarenko, Belgorod region, Stary Oskol, 309516, Russian Federation; ID RSCI: 685087, Scopus: 55992118000, ResearcherID: L-3354-2016, ORCID: 0000-0002-7292-1154; netsvet_dd@mail.ru;

Mariana N. Sivalneva — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Materials Science and Technology; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 685028, Scopus: 57193898450, ResearcherID: K-2030-2016, ORCID: 0000-0002-4957-9207; 549041@mail.ru;

Viktoriya V. Nelyubova — Doctor of Technical Sciences, Professor, leading researcher at the Research Laboratory “Self-cleaning coatings” of the Innovative Scientific-Educational and Experimental-Industrial Center of Nanostructured Composite Materials (ISE EIC NCM); **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 605989, Scopus: 56237522700, ResearcherID: V-2514-2018, ORCID: 0000-0002-5736-5962; nelubova@list.ru;

Valeria V. Stroкова — Doctor of Technical Sciences, Professor, head of the Department of Materials Science and Technology of Materials; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 111246, Scopus: 6602722133, ResearcherID: B-5343-2013, ORCID: 0000-0001-6895-4511; vvstrokova@gmail.com.

Contribution of the authors:

Daria D. Netsvet — conceptualization, data gathering and processing.

Mariana N. Sivalneva — data processing, writing of the article.

Viktoria V. Nelyubova — supervision conceptualization.

Valeria V. Stroкова — development of methodology, final conclusions, scientific editing of the text.

The authors declare that there is no conflict of interest.