

## Повышение эксплуатационных характеристик и возможностей широкого использования в строительстве ячеистых бетонов с введением техногенных продуктов

Лилия Владимировна Ильина , Екатерина Анатольевна Барتنеева\* 

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, Новосибирск, ул. Тургенева, 159, Российская Федерация

\* Автор, ответственный за переписку: e-mail: e.barteneva@sibstrin.ru

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В статье затрагиваются вопросы по уменьшению количества энергопотребления изготовления ячеистых бетонов и улучшению их эксплуатационных свойств. Данные задачи возможно решить путем применения новых модифицированных цементов отходами энергетического и горнодобывающего комплексов и использования техногенных продуктов. Применение в составе цементных композиций модифицирующих добавок, оказывающих влияние на процессы твердения и уплотняющих их микроструктуру, является инновационной технологией создания высокотехнологичной продукции и производства эффективных, обладающих улучшенными эксплуатационными свойствами, композитов на основе портландцемента. За счет использования промышленных отходов и продуктов техногенного происхождения возможно кардинально изменить параметры сырьевой базы Российской Федерации и сократить количество используемого природного традиционного сырья и снизить экологическую напряженность. **Методы и материалы.** В работе исследовалось влияние оксидного состава минеральных добавок (диоксида, диабаз, волластонит и известняк), добавляемого количества и диаметра частиц модифицирующих добавок на прочностные показатели цементной матрицы и эксплуатационные свойства модифицированных газо- и пенобетонов неавтоклавного твердения. В качестве кремнеземистого компонента использовались кварцевый песок и кислая зола-унос ТЭЦ. **Результаты.** Отмечено, что наибольшее увеличение прочности (до 18%) наблюдается при введении диоксида. При модифицировании ячеистого бетона минеральными добавками снижается средняя плотность газобетона до 5%, пенобетона – до 20% и теплопроводность у газобетона с 0,14 до 0,12 Вт/(м·°С), у пенобетона – до 0,069–0,070 Вт/(м·°С). Морозостойкость модифицированного газобетона увеличивается с F50 до F75, пенобетона с F20 до F25. Индекс изоляции воздушного шума однослойными ограждающими конструкциями из газобетона составляет 69,13 дБ, что значительно больше требуемых нормативным документом величин. **Обсуждение.** Проведенные исследования позволяют констатировать, что улучшение эксплуатационных характеристик ячеистых бетонов неавтоклавного твердения связано с изменением их поровой структуры и фазового состава гидратных новообразований. **Заключение.** Полученный ячеистый бетон неавтоклавного твердения является теплоизоляционным и конструктивно-теплоизоляционным. Его целесообразно применять как стеновой материал для ненесущих стен и перегородок или в качестве основного стенового материала для малоэтажного строительства. При этом снижается трудоёмкость и сокращаются сроки строительства.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** неавтоклавный пено- и газобетон, минеральные добавки, диоксид, волластонит, известняк, диабаз, термодинамические характеристики, химическое сродство, гидратные новообразования, эксплуатационные характеристики, теплопроводность, сокращение сроков строительства и трудоёмкости

**ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ НАУЧНОЙ РАБОТЫ, РЕЗУЛЬТАТОМ КОТОРОЙ СТАЛА ПУБЛИКАЦИЯ:** Данная научная работа выполнена при поддержке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)» по плану НИР НГАСУ (Сибстрин), разделы: 6.1.4.48, 6.3.9.58.

### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Ильина Л.В., Бартенеева Е.А. Повышение эксплуатационных характеристик и возможностей широкого использования в строительстве ячеистых бетонов с введением техногенных продуктов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(3):291–306. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-3-291-306>. – EDN: UVBOVI.

## Enhancing performance properties and expanding the application of cellular concrete through the incorporation of industrial by-products

Lilia V. Ilina , Ekaterina A. Bartenjeva\* 

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), 159 Turgenev St., Novosibirsk, 630008, Russian Federation

\* Corresponding author: e-mail: e.bartenjeva@sibstrin.ru

### ABSTRACT

**Introduction.** The article addresses the issues of reducing energy intensity in the production of non-autoclaved cellular concrete and enhancing its performance properties by developing new modified cements and utilizing industrial by-products and waste from energy and mining complexes. One promising approach for creating high-tech products and achieving highly functional cement systems – imparting special properties while reducing binder consumption – involves the use of modifying additives in cement compositions. These additives densify the microstructure and influence kinetics processes. In this case, industrial by-products and waste from energy and mining complexes can serve as such additives. By using industrial by-products and waste, it is possible to significantly alter the parameters of the raw material base of the Russian Federation, reduce the amount of natural traditional raw materials used, and mitigate environmental concerns. **Methods and Materials.** The study examined the influence of the type (diopside, diabase, wollastonite, and limestone), quantity, and dispersion (particle size distribution) of modifying additives. Quartz sand and acid fly ash from the Thermal Power Plant (TPP) were used as the silica components. **Results.** At the same time, a strength increase of up to 18% was observed, with the most significant enhancement achieved using diopside. When mineral additives were incorporated, the average density of aerated concrete decreases by up to 5%, while that of foam concrete decreased up to 20%. Additionally, the thermal conductivity of aerated concrete decreased from 0.14 to 0.12 W/(m·°C), and that of foam concrete decreased to 0.069–0.070 W/(m·°C). Frost resistance of modified aerated concrete increased from F50 to F75, and that of foam concrete increased from F20 to F25. The index of air noise reduction by single-layer aerated concrete enclosing structures reached 69.13 dB, exceeding the requirements set by regulatory standards. **Discussion.** The results of the studies indicate that the improved performance properties of non-autoclaved cellular concrete is associated with the changes in pore structure and the phase composition of new hydrated formations. **Conclusion.** The obtained non-autoclaved cellular concrete is structural thermal-insulating and thermal-insulating, which can be used as thermal-insulating and wall material for non-load-bearing walls and partitions or as the main wall material for low-rise construction. Reducing the time required to achieve strength significantly shortens construction timelines for projects using non-autoclaved cellular concrete, thereby lowering labor intensity and overall construction costs as a whole.

**KEYWORDS:** cellular concrete, modifying additive, diopside, wollastonite, limestone, diabase, energy indicator, chemical affinity, hydrate formation, performance properties, reduction of construction time and labor intensity

**SOURCES OF FUNDING FOR THE SCIENTIFIC WORK THAT RESULTED IN THE PUBLICATION:** This scientific work was carried out with the support of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)" according to the research plan, sections: 6.1.4.48, 6.3.9.58.

### FOR CITATION:

Ilina L.V., Bartenjeva E.A. Enhancing performance properties and expanding the application of cellular concrete through the incorporation of industrial by-products. *Nanotechnologies in Construction*. 2026; 18(3):291–306. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-3-291-306>. – EDN: UVBOVI.

### ВВЕДЕНИЕ

Статья посвящена решению наиболее фундаментально и практически важных и актуальных задач современного строительного материаловедения и строительства. Это уменьшение количества энергопотребления изготовления ячеистых бетонов и улучшение их эксплуатационных свойств. Данные задачи возможно решить путем применения новых модифицированных цементов отходами энергетического

и горнодобывающего комплексов и использования техногенных продуктов.

В России с 2019-го по 2024 год в рамках национального проекта «Жилье и городская среда» построено 577 млн м<sup>2</sup> жилья. В рамках национального проекта «Инфраструктура для жизни» до 2030 года необходимо построить 663 млн м<sup>2</sup> жилья [1]. При этом как для многоэтажного, так и для частного малоэтажного строительства одним из основных стеновых материалов выступают изделия из ячеистых бетонов.

Разработка и внедрение наукоемкой технологии ячеистых бетонов на основе модифицированных цементов с использованием техногенных продуктов и отходов соответствует стратегии научно-технологического развития РФ (утв. Указом Президента РФ № 145 от 28.02.2024 г.). При этом в соответствии со стратегией научно-технологического развития (далее СНТР) России реакцией на один из больших вызовов (исчерпание возможностей экономического роста страны, основанного на экстенсивной эксплуатации сырьевых ресурсов (СНТР п. 15 б)) должно стать (СНТР п.18) своевременное создание наукоемких технологий и продукции, отвечающих в первую очередь национальным интересам России и необходимых для существенного повышения качества жизни населения. Согласно СНТР, приоритетом является (СНТР п. 21 а) переход к передовым технологиям создания высокотехнологичной продукции, основанным на применении новых материалов.

Использование в составе цементных композиций модифицирующих добавок, уплотняющих их микроструктуру и оказывающих влияние на процессы твердения, является инновационной технологией создания высокотехнологичной продукции и производства эффективных, обладающих повышенными эксплуатационными свойствами композитов на основе портландцемента. В качестве модифицирующих добавок при этом могут выступать техногенные продукты и отходы энергетического и горнодобывающего комплексов [2–16], придавая им специальные свойства и экономя вяжущие вещества.

В то же время догматические документы Российской Федерации требуют нахождения рациональных путей использования отходов производств и продуктов техногенного происхождения в строительстве. Положения «Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2030 г.» (утвержденные распоряжением Правительства Российской Федерации от 08.12.2011 № 2227-р (ред. от 18.10.2018)), «Стратегии развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года» (утвержденные распоряжением Правительства Российской Федерации от 10.05.2016 г. № 868-р) предполагают развитие строительного материаловедения с применением отходов промышленности. Таким образом, целесообразность утилизации отходов и продуктов техногенного происхождения при изготовлении искусственных цементных композитов обусловлена как задачей повышения их качества, так и требованием утилизации многотоннажных отходов производства [17–26].

За счет использования промышленных отходов и продуктов техногенного происхождения возможно

кардинально изменить параметры сырьевой базы России. Применение отходов в производстве стеновых материалов позволит сократить количество используемого природного традиционного сырья и снизить экологическую напряженность [27–31].

В России ежегодно складировать более 23 млн. тонн золошлаковых отходов. Общее накопление составляет 1,5–1,8 млрд т, по прогнозу к 2030 году этот объем может превысить 2 млрд т. Золоотвалы суммарно по стране занимают площадь более 28 тысяч гектаров [29–32]. В то же время в строительном комплексе используется не более 9% техногенных продуктов от их годового выхода. Объем отходов от горнодобывающей промышленности в 2023 году составил 7,6 млрд т. Около 40% этой массы все же утилизировано и возвращено в производственный цикл.

При этом не нужно проводить геологоразведочные работы, строить карьеры, освобождаются значительные земельные участки от воздействия негативных антропогенных факторов. Вместе с тем из отходов в комбинации с природным сырьем или без него можно изготавливать практически все основные строительные материалы, которые с успехом заменят традиционные и позволят снизить трудоемкость и продолжительность строительства. Изготовление стеновых материалов отличается большой материалоемкостью. Поэтому применение в стеновых материалах отходов производства приобретает особую актуальность [2–4, 13–16, 21, 24].

Современное состояние темы исследования характеризуется накопленными знаниями по теоретическим основам производства цементных композитов. Установлено, что для повышения эксплуатационных характеристик цементных композитов используют повышение плотности цементной матрицы композита с уменьшением количества макропор и увеличением количества микро- и нанопор. В то же время для повышения эксплуатационных характеристик цементных композитов необходимы сведения о механизме влияния минеральных добавок различной тонкости помола и количества на поровую структуру цементной матрицы, на процесс твердения цементных систем и на их эксплуатационные характеристики. Необходимо установить зависимость между фазовым составом, микроструктурой цементной матрицы и прочностью цементных композитов. Это и явилось целью работы.

Для результативного выбора минеральных добавок авторами выдвинута **научная гипотеза**, состоящая из пяти положений.

1. Минеральные добавки могут участвовать в процессе гидратообразования и структурообразования цементной матрицы. Взаимодействие частиц минеральных добавок с формирующейся цементной

матрицей происходит преимущественно по поверхности их соприкосновения. Большое значение при этом имеет близость термодинамических характеристик (энтальпия образования соединений и их энтропия).

2. Выбор добавок должен быть обусловлен близостью их химического состава с минералами клинкера и, следовательно, возможностью данных добавок выступать подложками для кристаллизации гидратных новообразований.

3. При выборе минеральных добавок необходимо учитывать их твердость. Если твердость, а следовательно, и модуль упругости минеральной добавки выше, чем гидратированного цемента, то это будет приводить к перераспределению напряжений в цементном камне при действии на него внешних механических нагрузок. Кроме того, добавки, обладающие высокой твердостью, препятствуют развитию микротрещин в цементном камне. Наибольшего упрочнения цементной матрицы можно достичь, если твердость, а следовательно, и модуль упругости минеральных добавок выше, чем у цементной матрицы.

4. Для повышения результативности использования минеральных добавок необходимо контролировать их дисперсность. Наибольшего упрочнения цементной матрицы можно достичь при минимальной межзерновой пустотности между частицами добавки и вяжущего.

5. Минеральные добавки, обладающие волокнистой структурой, будут осуществлять микроармирование цементной матрицы искусственных композитов.

6. Технологические свойства полученных материалов позволят сократить затраты труда при устройстве несущих и ограждающих конструкций зданий, а также ускорить их сроки ввода в эксплуатацию.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве вяжущего вещества в работе использовался портландцемент производства ОАО «Искитимцемент» класса ЦЕМ I 32,5Б. Цемент имел следующий минералогический состав, мас. %:  $C_3S$  – 67;  $C_2S$  – 11,  $C_3A$  – 6,4;  $C_4AF$  – 12. Удельная поверхность цемента составляла  $330 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Его химический состав представлен в таблице 1.

В качестве модифицирующих добавок, способных участвовать в процессе гидратообразования и структурообразования цементной матрицы, предположительно (первое положение научной гипотезы) можно использовать диопсид, диабаз, волластонит и известняк. Их удельные термодинамические характеристики приведены в таблице 2.

Анализ сравнения энтальпии и энтропии образования (табл. 2) показал близость термодинамических характеристик предлагаемых авторами добавок и минералов портландцементного клинкера. При введении данных добавок в цементные системы следует ожидать хорошую энергетическую совместимость минеральных добавок и цементной матрицы.

На основании вышеизложенного, для модификации цементных систем приняты: диопсид (карьер Слюдянский, Иркутская область), волластонит (карьер Синюхинский, республика Алтай), известняк (карьер Искитимский, Новосибирская область). Данные горные породы являются отходами горнодобывающего и горноперерабатывающего комплексов. Диопсид имел следующий минералогический состав, % мас.: диопсид – 76, тремолит – 19, шпинель – 2 и кварц – 2. Минералогический состав волластонита, % мас.: волластонит – 87, гранат – 2,8, пирит – 0,9, кальцит – 6,1, кварц – 4,2. Истинная плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , диопсида – 2778, волластонита – 2455.

**Таблица 1.** Оксидный состав портландцемента

Наименование оксида	$\text{SiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$	$\text{SO}_3$	п.п.п.
Количество оксида, мас. %	20,65	64,20	5,44	6,04	1,58	0,97	1,12

**Таблица 2.** Энтальпия и энтропия образования соединений

Наименование соединений	Энтальпия образования ( $\Delta H_{298}^\circ$ ), кДж/г	Энтропия образования ( $S_{298}^\circ$ ), Дж/(г·К)
$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (трехкальциевый силикат)	–12,83	0,74
$\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (двухкальциевый силикат)	–13,40	0,74
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (трехкальциевый алюминат)	–13,29	0,76
$\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$ (диопсид)	–14,80	0,66
$\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (волластонит)	–14,10	0,71
$\text{CaCO}_3$ (известняк)	–12,06	0,88

Далее необходимо сравнить химический состав портландцемента и минеральных добавок (второй пункт научной гипотезы). Химический состав добавок приведен в таблице 3.

Анализ химического состава цемента (табл. 1) и добавок (табл. 3) показывает, что они химически близки, так как в диопсиде и волластоните преимущественно содержатся оксиды кальция и кремния (80–93%), а в известняке – оксид кальция (54,7%).

Для подтверждения третьего положения научной гипотезы дополнительно в качестве минеральной добавки, обладающей высокой твердостью, выбран диабаз (пос. Горный, Новосибирской области). Минеральный состав диабаза, % мас.: плагиоклаз альбитизированный – 57,3; авгит – 20,1; актинолит – 5,6; хлорит (гидрохлорит) – 6,2; эпидот – 5,3; серицит – 2,7; сфен – 1,0; магнетит – 1,0; гидроксид железа – менее 0,8.

Твердость добавок и гидратированного цемента приведена в таблице 4.

Анализ твердости, определенный по шкале Мооса, показал, что наибольшей твердостью обладают диабаз и диопсид (6,5–7,0). Твердость волластонита (5,0) немного ниже, чем у диопсида и диабаза. Но при этом она выше твердости гидратных новообразований цемента. Наименее твердым является известняк (3,0). Его твердость ниже, чем твердость цементной матрицы.

Для подтверждения четвертого положения научной гипотезы добавки измельчались до различной дисперсности. При этом средний диаметр частиц диопсида и волластонита был близок диаметру частиц портландцемента, а известняка и диабаза меньше. Показатели дисперсности добавок представлены в таблице 5.

**Таблица 3.** Химический состав минеральных добавок

Наименование минерала	Химический состав, % мас.							
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	R <sub>2</sub> O	ППП
Известняк	54,7	0,5	0,2	0,5	0,1	–	–	40,4
Диопсид	26,2	53,4	0,2	17,9	0,1	0,1	0,1	1,9
Волластонит	34,7	53,4	3,1	0,3	2,3	–	–	6,2

**Таблица 4.** Твердость соединений

Соединения	Твердость по шкале Мооса
Волластонит (CaO·SiO <sub>2</sub> )	5,0
Гидратированный цемент	3,5–4,0
Диабаз	7,0
Диопсид (CaO·MgO·2SiO <sub>2</sub> )	6,5
Известняк (CaCO <sub>3</sub> )	3,0

Для подтверждения пятого положения научной гипотезы в качестве модифицирующей добавки был выбран волластонит, имеющий цепочечное строение (рис. 1). После измельчения в шаровой мельнице волластонит имел волокнистую структуру, что соответствует характеристическому соотношению длина: толщина = 4:1 – 5:1 (рис. 2).

В качестве кремнеземистого компонента для пенобетона применялся отход топливно-энергетического комплекса – кислая зола-унос г. Новосибирска, частицы которой имели сферическую форму с размерами не более 130 мкм. Мелкая фракция золы (размеры частиц не более 30 мкм) представлена микросферами с гладкой внешней поверхностью и спекшейся оболочкой и, следовательно, в основном, закрытой пористостью.

В качестве кремнеземистого компонента для газобетона применялся кварцевый песок ОАО «Камнереченский каменный карьер» г. Новосибирск.

В качестве добавок, образующих ячеистую структуру, в смесь вводились:

- для пенобетона – белковые поверхностно-активные вещества (Foamcem),
- для газобетона – алюминиевая пудра марки ПАП–1 (ГОСТ 5494).

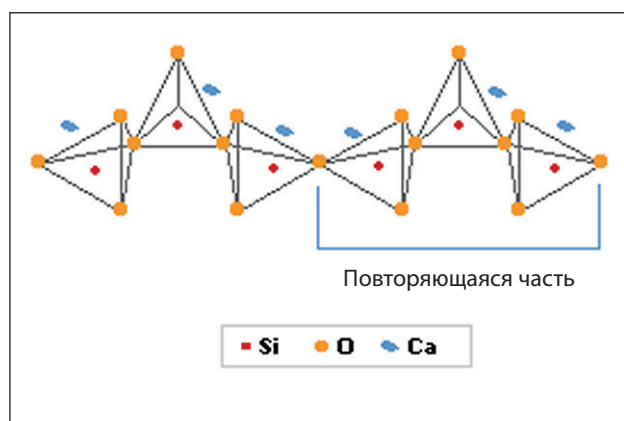
Для получения газобетона в качестве второго компонента, смешанного вяжущего, применялась известь II сорта производства ОАО «Искитимизвесть», (г. Искитим), удовлетворяющая требованиям ГОСТ 9179.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

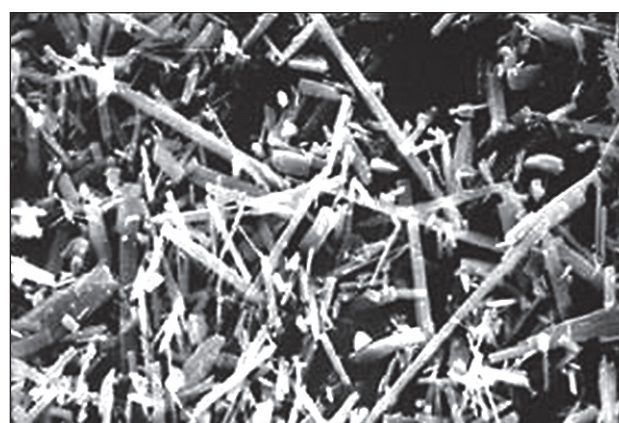
Для ячеистых стеновых материалов важными эксплуатационными показателями являются: средняя плотность, сопротивление теплопередаче, стой-

**Таблица 5.** Показатели дисперсности добавок

Наименование минеральной добавки	Среднеобъемный размер зерен, мкм	Площадь уд. поверхности, м <sup>2</sup> /кг
Волластонит	28,9	309,0
Диабаз	8,7	540,0
Диопсид	27,0	393,0
Известняк	12,3	470,0



**Рис. 1.** Цепочечное строение волластонита



**Рис. 2.** Микроструктура волластонита (увеличение  $\times 1700$ )

кость к действию влаги и отрицательных температур и прочность при сжатии. Добиться повышенной прочности при сжатии при сохранении средней плотности можно путем упрочнения межпоровых перегородок. Поэтому на первом этапе исследовали возможность упрочнения цементной матрицы введением дисперсных минеральных добавок, выбранных в соответствии с положениями научной гипотезы.

*1 этап. Упрочнение цементной матрицы дисперсными минеральными добавками.* Исследуемые добавки вводили в портландцемент в количестве 2–11 мас. % в сухом состоянии. Из полученной сухой смеси готовили цементное тесто нормальной густоты и затем формовали две серии образцов. Одна серия образцов твердела в ускоренных условиях (повышенная влажность и температура (ТВО), другая – в воде (ВУ) при комнатной температуре (температура  $20 \pm 2$  °С)). Образцы, твердевшие по ускоренному режиму, сначала предварительно выдерживались в течение 4 часов для набора начальной структурной прочности. Затем производился медленный (в течение 3 часов) подъем температуры до максимальной (90 °С) и далее выдержка при данной температуре в течение 8 часов, после чего происходило плавное снижение температуры в течение 2 часов. Вторая серия образцов твердела в течение 1, 3, 7 и 28 суток. Результаты влияния вида и количества минеральных добавок в зависимости от условий и продолжительности твердения представлены в таблице 6.

В результате проведенных экспериментов получены зависимости (рис. 3), демонстрирующие, что наибольшую прочность цементной матрицы можно обеспечить при использовании модификатора – известняка. Его введение в количестве 2% позволяет увеличить прочность камня до 20%.

Введение волластонита и диопсида приводит к наибольшему упрочнению на поздних сроках твердения. Оптимальное количество волластонита со-

ставляло 9%, при этом прочность цементного камня увеличивается до 27,5%, а диопсида – 7%, прочность при этом повышается более существенно (до 48%). При введении большего количества добавок происходит снижение прочности камня. Дисперсный диабаз (не более 10%) не приводит к существенному упрочнению цементного камня как в начальные сроки твердения, так и в более поздние.

На электронном снимке частица диопсида (рис. 4а) плотно окружена новообразованиями цементного камня, что указывает на его способность выступать центрами кристаллообразования. На частице волластонита (рис. 4б) также образуются продукты твердения цементного камня

## ОБСУЖДЕНИЕ

Такое влияние минеральных добавок на свойства цементной системы может заключаться в следующем. При добавлении диопсида и волластонита в сухую смесь увеличивается стабильность ячеистой бетонной системы в ускоренном наборе начальной структурной прочности и уменьшении усадочных деформаций. Это позволяет констатировать, что диопсид и волластонит выполняют роль крентов, подложек для новых центров кристаллизации [33].

У известняка небольшая твердость по шкале Мооса – 3, что меньше, чем у цементного камня. Соответственно, действие добавки обусловлено другими причинами. Оптимальное содержание добавки (известняка) определяется ее воздействием на процесс гидратации цемента, формированием контактной зоны между частицами добавки и цементным камнем. Для подтверждения данного предположения был проведен рентгенофазовый анализ цементного камня с добавлением известняка и без него (рис. 5).

Влияние  $\text{CaCO}_3$  будет проявляться в наибольшей мере в контактной зоне системы за счет уменьше-

**Таблица 6.** Влияние количества минеральной добавки на прочность цементной системы

Продолжительность и условия твердения	Прочность цементного камня, МПа					
	Кол-во добавки, % от массы портландцемента					
	0	2	5	7	9	11
<b>Волластонит</b>						
ТВО	49,1	56,2	59,5	60,5	62,6	58,0
ВУ, 1 сутки	15,3	17,3	18,1	18,9	19,6	16,3
ВУ, 3 суток	31,4	34,5	35,4	36,8	38,8	35,7
ВУ, 7 суток	46,6	52,5	55,0	55,9	59,4	54,6
ВУ, 28 суток	62,3	70,9	74,3	76,0	79,4	73,4
<b>Диабаз</b>						
ТВО	49,1	54,5	53,5	49,4	47,2	44,7
ВУ, 1 сутки	15,3	16,5	15,7	15,2	14,4	12,8
ВУ, 3 суток	31,4	33,4	31,8	30,5	29,2	28,1
ВУ, 7 суток	46,6	50,9	49,4	46,1	44,7	41,9
ВУ, 28 суток	62,3	68,7	66,8	62,1	59,8	56,6
<b>Диопсид</b>						
ТВО	49,1	59,0	66,5	71,5	65,7	57,9
ВУ, 1 сутки	15,3	17,1	19,0	20,7	19,3	15,7
ВУ, 3 суток	31,4	36,1	41,4	44,4	41,2	37,5
ВУ, 7 суток	46,6	53,4	62,0	68,0	63,7	56,0
ВУ, 28 суток	62,3	73,9	84,2	92,3	85,6	74,6
<b>Известняк</b>						
ТВО	49,1	59,1	54,9	49,9	47,5	43,9
ВУ, 1 сутки	15,3	22,1	19,5	16,7	14,4	13,2
ВУ, 3 суток	31,4	41,8	39,3	36,6	33,1	29,9
ВУ, 7 суток	46,6	54,7	51,7	49,6	46,9	44,0
ВУ, 28 суток	62,3	74,7	70,9	67,6	63,5	59,2

ния величины рефлексов портландита, повышения интенсивности рефлексов гидросиликатов кальция и появления рефлексов гидрокарбоалюминатов и гидрокарбосиликатов кальция [13].

При анализе влияния концентрации добавок на свойства цементных материалов, опираясь на теорию плотнейшей упаковки частиц Л. Полинга, предположим, что частицы как портландцемента, так и добавок, сферические и близкие по размеру, и частицы добавки распределены по объему равномерно. Если плотность добавки отличается от плотности цемента, то оптимальное количество добавки (массовая доля) может быть определено по соотношению плотностей [34]:

$$n = \frac{1}{k} \cdot \frac{\rho_D}{\rho_C} = 8,3 \frac{\rho_D}{\rho_C}, \quad (1)$$

где  $n$  – массовая доля добавки в процентах от массы цемента;

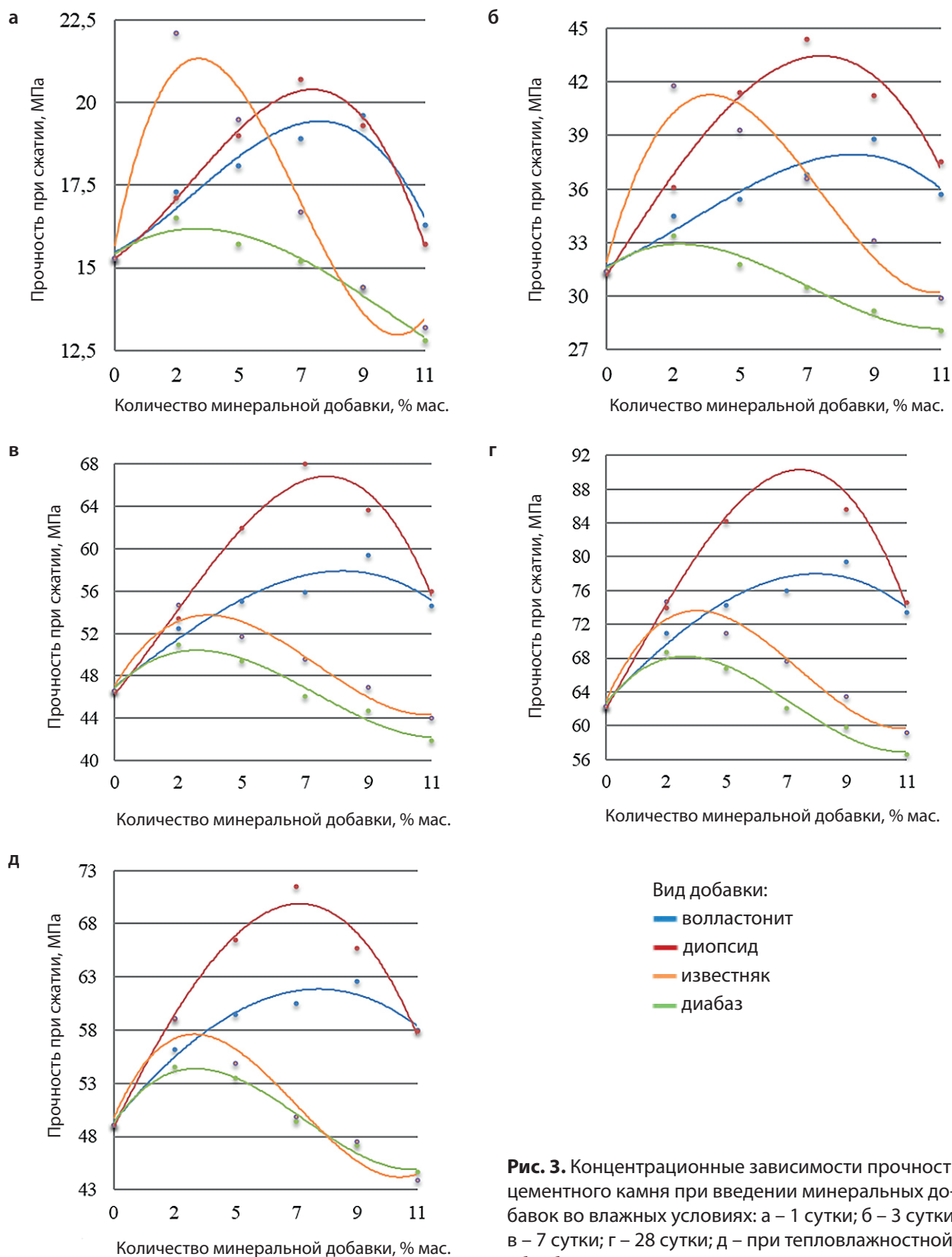
$\rho_D$  – истинная плотность добавки, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho_C$  – истинная плотность цемента, кг/м<sup>3</sup>;  
 $k$  – координационное число (количество частиц цемента, окружающих частицу добавки).

Если диаметры частиц добавки ( $D_D$ ) и цемента ( $D_C$ ) значительно различаются, для расчета оптимальной доли добавки ( $n_D$ ) может быть использована формула [34]:

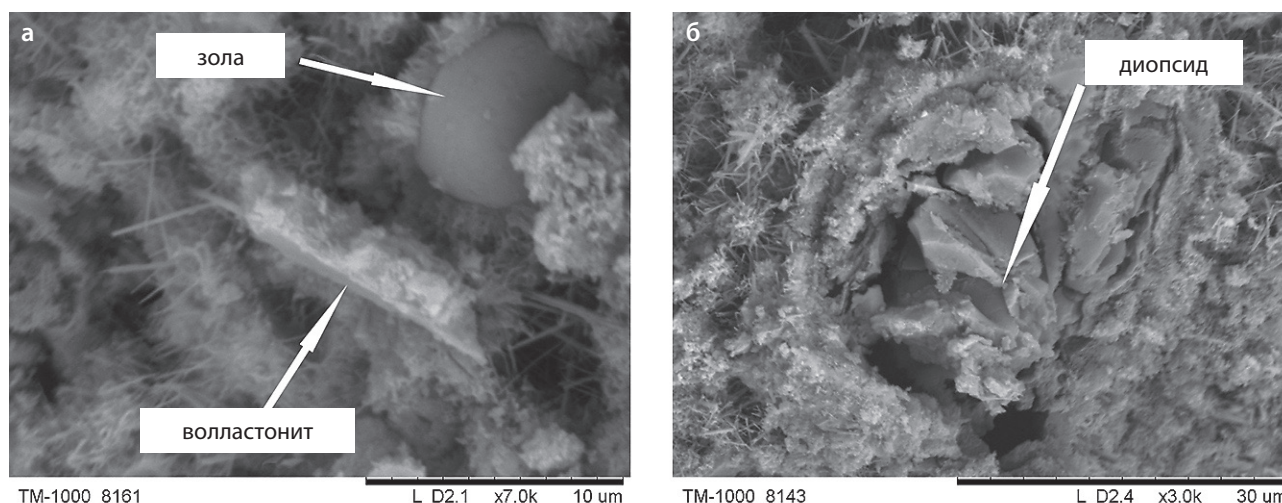
$$n_D = \frac{\frac{\pi D_D^3}{6} \cdot \rho_D}{k \cdot \frac{\pi D_C^3}{6} \cdot \rho_C} = \frac{1}{k} \cdot \frac{D_D^3 \cdot \rho_D}{D_C^3 \cdot \rho_C}, \quad (2)$$

где  $n$  – массовая доля добавки в процентах от массы цемента;

$\rho_D$  – истинная плотность добавки, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho_C$  – истинная плотность цемента, кг/м<sup>3</sup>;  
 $k$  – координационное число (количество частиц цемента, окружающих частицу добавки).



**Рис. 3.** Концентрационные зависимости прочности цементного камня при введении минеральных добавок во влажных условиях: а – 1 сутки; б – 3 сутки; в – 7 сутки; г – 28 суток; д – при тепловлажностной обработке



**Рис. 4.** Микроструктура пенобетона с добавками: а – волластонита (увеличение  $\times 7000$ ); б – диопсида (увеличение  $\times 3000$ )

Так как реальная форма частиц добавки и цемента отличаются от сферической и они имеют разброс по размерам частиц, то данные формулы являются приближенными. Также распределение частиц добавок между частицами цемента может быть неравномерным. Наряду с этим количественная и качественная характеристика принимаемой концентрации добавок действительно близка к получившемуся показателю. Если диаметр частиц добавки меньше, чем частиц вяжущего вещества, то плотнейшая упаковка достигается при меньшем координационном числе, то есть наименьшем количестве частичек цемента, находящихся вокруг частичек добавки.

Экспериментально определенное количество добавок и полученное по формулам 1 и 2 близки между собой и равны для диопсида и волластонита – 7–8%, известняка и диабазы – 2–3%.

### ВЫВОДЫ по 1 этапу

Таким образом, все положения научной гипотезы подтверждены.

1. Упрочнение цементной системы на 20–48% при введении исследуемых добавок (известняк, волластонит, диопсид) обусловлено близостью их термодинамических характеристик и оксидного состава с клинкерными минералами. Введение диабазы, значительно отличающегося оксидным составом, приводит к незначительному упрочнению (до 10%).

2. Большой модуль упругости и большая твердость диопсида по сравнению с волластонитом и известняком обуславливает более значительный упрочняющий эффект (до 48%) при его введении. Прочность при добавлении волластонита и известняка увеличивается на 20–27%. Вместе с тем, введение

в систему диабазы, обладающего наибольшей твердостью (7 по шкале Мооса) из всех рассматриваемых добавок, привело к незначительному упрочнению. Вероятно, такой незначительный эффект обусловлен разницей его химического состава по сравнению с минералами клинкера и новообразованиями, полученными при его гидратации.

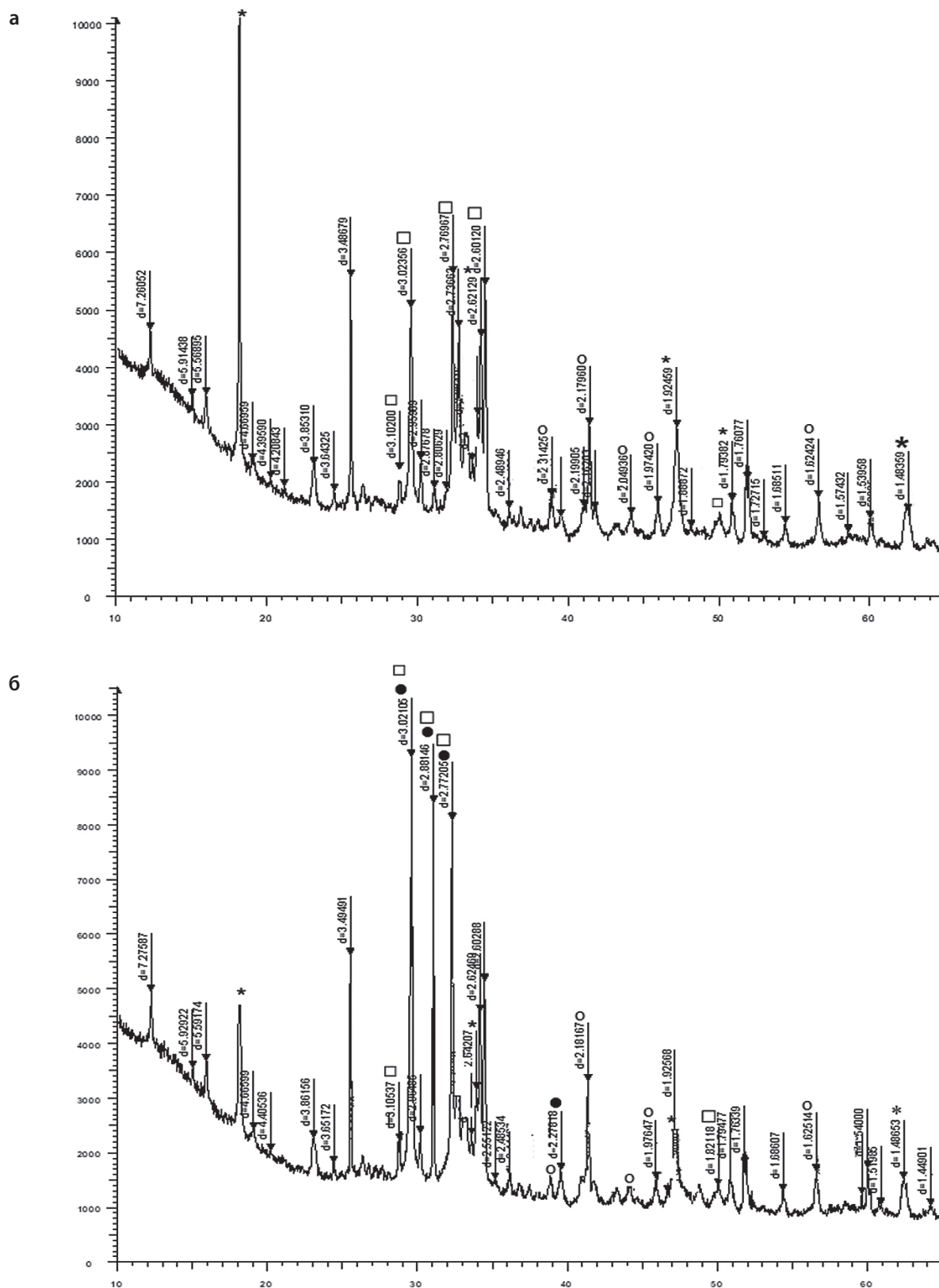
3. Добавление волластонита приводит к большему упрочнению цементной системы по сравнению с введением известняка и диабазы за счет микроармирования камня вследствие его волокнистой структуры.

4. При снижении размера частичек добавки ее оптимальная концентрация, обеспечивающая максимальное упрочнение, уменьшается.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

*2 этап. Повышение эксплуатационных характеристик ячеистых бетонов путем введения техногенных продуктов и отходов горнодобывающего комплекса.* Повысить прочность ячеистых бетонов можно путем упрочнения цементной матрицы межпоровых перегородок. Наибольшего упрочнения цементной матрицы, исследования на первом этапе удалось достичь при введении диопсида и волластонита. Оптимальное их количество, приводящее к наибольшему упрочняющему эффекту, составляло 7 мас. % от портландцемента.

Влияние данных минеральных добавок на эксплуатационные свойства ячеистых бетонов изучалось на неавтоклавных газо- и пенобетонах. Для этого готовилась сухая газобетонная смесь, путем совместного сухого диспергирования портландцементного клинкера, кремнеземистого компонента, гипсового



**Рис. 5.** Дифрактограмма цементного камня: а – бездобавочного состава; б – состава, содержащего известняк.  
\* –  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ; □ – C-S-H; ○ – C-A-H; ● –  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$

## СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

камня и минеральных добавок [33]. Затем данная сухая смесь затворялась алюминиевой суспензией и водой. Свойства полученного газобетона приведены в таблице 7.

Исследования показали, что при модифицировании газобетона волластонитом или диопсидом происходит значительное упрочнение. Прочность при этом увеличивается с 1,7 до 3,1 (при введении волластонита) и до 3,3 МПа (при добавлении диопсида). Плотность модифицированного газобетона при этом изменяется незначительно (в пределах 5%). Наибольшее увеличение прочности газобетона наблюдается при введении диопсида. Увеличение прочности при этом составляет 18%. При модифицировании газобетона минеральными добавками снижается теплопроводность с 0,14 до 0,12 Вт/(м·°С), морозостойкость увеличивается с F50 до F75. Индекс изоляции воздушного шума однослойными ограждающими конструкциями, полученный расчетным способом, составляет 69,13 дБ, что значительно больше величин, требуемых по нормативным документам. Стеновые изделия из неавтоклавного газобетона могут использоваться при устройстве стен, перегородок в жилых и административных зданиях.

Полученный газобетон неавтоклавного твердения по совокупности эксплуатационных показателей является конструкционно-теплоизоляционным, который целесообразно применять как стеновой материал для несущих стен и перегородок или в качестве основного стенового материала для малоэтажного строительства. Следует отметить, что при этом про-

исходит экономия трудозатрат и сокращаются сроки строительства.

Для того чтобы определить наиболее целесообразный метод введения минеральных добавок при приготовлении пенобетона, исследовали три способа: минеральные добавки вводили в воду затворения (режим I), в растворную смесь (II) и в сухую смесь (III) (табл. 8). За контрольный состав был принят состав смеси без добавок.

Наилучшие показатели стойкости пены соответствуют третьему технологическому режиму, при введении волластонита и диопсида в сухую смесь. Кроме того, статистическая обработка полученных данных (плотность, прочность при сжатии пенобетона) фиксирует заметное снижение коэффициентов вариации указанных характеристик при введении дисперсных волластонита и диопсида в пенобетонную смесь. Это может свидетельствовать о большей стабильности свойств и однородности структуры разработанных материалов.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ экспериментальных данных влияния вида и количества минеральных добавок на свойства пенобетона показал, что введение минеральных добавок повышает стойкость пены в растворной смеси до 30%.

Зерна минеральных добавок в смесителях создают механические препятствия при сильном завихрении в турбулентных слоях пенобетонных потоков, что

Таблица 7. Влияние вида минеральной добавки на свойства газобетона

Наименование минеральной добавки	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Индекс изоляции воздушного шума, дБ	Марка по морозостойкости
Диопсид	580	3,3	0,12	69,13	F75
Волластонит	600	3,1	0,13	68,61	F75
Без добавок	610	1,7	0,14	67,28	F50

Таблица 8. Влияние способа введения минеральной добавки на свойства пенобетона

Наименование минеральной добавки	Технологический режим	Стойкость пены в растворной смеси	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент вариации, %	Прочность при сжатии, МПа	Коэффициент вариации, %	Усадка пластическая, мм/м
Диопсид	I	0,86	498	6,30	2,31	15,30	7,04
	II	0,89	477	5,90	0,83	14,20	6,83
	III	0,90	467	5,60	0,88	12,70	6,58
Волластонит	I	0,84	502	5,80	1,00	10,20	6,47
	II	0,89	476	4,50	1,03	7,60	5,85
	III	0,93	435	3,30	1,19	4,10	5,03
Без добавок		0,74	547	6,80	1,22	17,40	7,20

## СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

приводит к дополнительному воздухововлечению (14–20%). При этом, перейдя в физически связанное состояние, часть объемной воды также должна переместиться из межчастичного объема в пленки. Это способствует повышению вязкости смеси на 13,5%, а также и ее агрегативной устойчивости. Таким образом, определены оптимальные составы пенобетона (табл. 9).

В табл. 10 представлены физико-механические свойства для разработанных составов неавтоклавного пенобетона с минеральными добавками.

На основании экспериментальных данных по водопоглощению образцов был определен наибольший объем условно закрытых пор (табл. 11), который соответствует пенобетону с добавками диопсида (52,9%) и волластонита (53,8%).

По данным ртутной порометрии, введение волластонита уменьшает в 2,34 раза объем пор в пенобетоне диаметром более 0,1 мкм, введение диопсида – на 8,2%. Этим обусловлено увеличение морозостой-

кости до F25. Вследствие увеличения в 1,5 раза закрытых пор в структуре пенобетона и преобладания равномерно распределенных пор размерами до 2 мм (рис. 6б, 6в) снижается коэффициент теплопроводности до 0,069–0,070 Вт/(м·°С) за счет уменьшения конвекционной теплопередачи.

По данным сканирующей электронной микроскопии (рис. 7), межпоровые перегородки пенобетона представлены коллоидными продуктами гидратации, просматриваются округлые агрегаты.

На снимках (рис. 7) просматриваются игольчатые новообразования, микроармирующие структуру цементной матрицы межпоровых перегородок пенобетона. Таким образом, можно отметить, что минеральные добавки, обладая высоким химическим сродством к продуктам гидратации портландцемента, активизируют процессы кристаллизации продуктов гидратации цемента.

Таким образом, улучшение эксплуатационных показателей ячеистых бетонов связано с изменением

Таблица 9. Оптимальные составы пенобетона

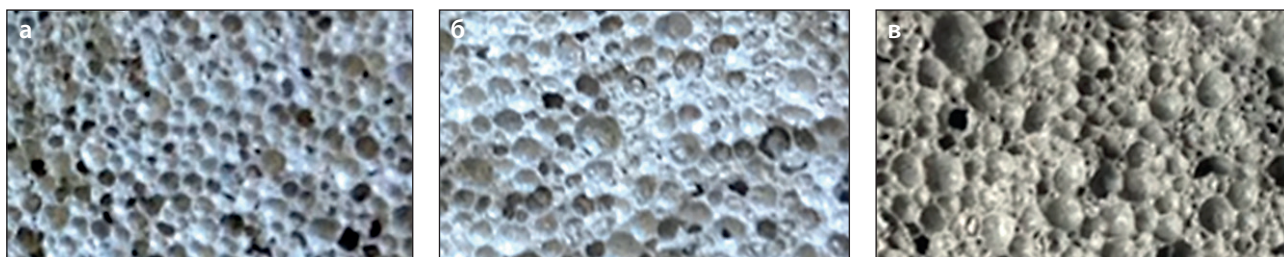
Компоненты	Наименование минеральной добавки		
	диопсид	волластонит	без добавок
Портландцемент, кг	163	225	330
Зола-уноса, кг	98	135	200
Пенообразователь, л	0,69	0,95	1,44
Вода, л	148	205	267
Добавка, кг	1,63	2,25	0

Таблица 10. Физико-механические свойства неавтоклавного пенобетона

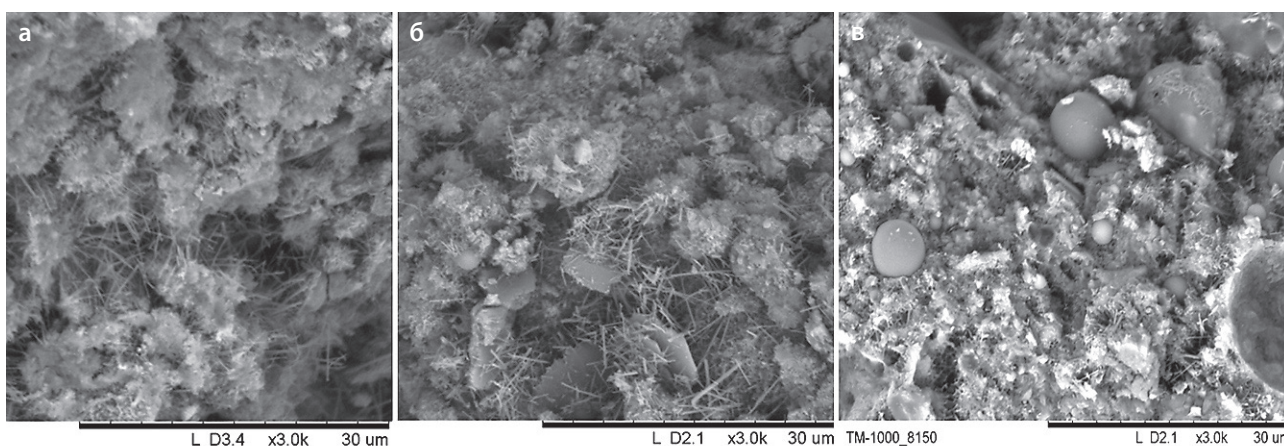
Показатели	Наименование минеральной добавки		
	диопсид	волластонит	без добавок
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	274	345	547
Предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток, МПа	0,57	1,00	1,22
Класс бетона по прочности	B 0.5	B 0.75	B 0.75
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	0,074	0,082	0,132
Марка по морозостойкости	F 25	F 25	F 20
Усадка пластическая, мм/м	6,08	5,70	7,20
Усадка при высыхании, мм/м	2,0	1,7	2,6
Водопоглощение по объему, %	12,3	13,8	15,3

Таблица 11. Пористость неавтоклавного пенобетона

Показатели	Наименование минеральной добавки		
	диопсид	волластонит	без добавок
Полный объем пор, %	87,0	81,0	67,0
Объем условно закрытых пор, %	52,9	53,8	35,9



**Рис. 6.** Макроструктура пенобетона с добавками: а – диопсида; б – волластонита; в – без добавок (увеличение  $\times 5$ )



**Рис. 7.** Микроструктура пенобетона с добавками: а – диопсида; б – волластонита; в – без добавок (увеличение  $\times 3000$ )

их поровой структуры и фазового состава гидратных новообразований [33].

### ВЫВОДЫ по 2-й части

Таким образом, повышение эксплуатационных показателей ячеистых бетонов научно обосновано положениями научной гипотезы, доказанными на первом этапе.

1. Улучшение эксплуатационных показателей ячеистых бетонов связано с изменением их поровой структуры и фазового состава гидратных новообразований.

2. Модифицирование газобетона приводит к его упрочнению на 18%. Наибольшее увеличение прочности газобетона наблюдается при введении диопсида.

3. При модифицировании газобетона минеральными добавками снижается его средняя плотность до 5% и теплопроводность с 0,14 до 0,12 Вт/(м $\cdot$ °С).

4. Морозостойкость модифицированного газобетона увеличивается с F50 до F75. Индекс изоляции воздушного шума однослойными ограждающими конструкциями из газобетона составляет 69,13 дБ,

что значительно больше величин, требуемых по нормативным документам.

5. Наилучшие показатели стойкости пены получены при добавлении минеральных добавок в сухую смесь. Введение волластонита и диопсида повышает стойкость пены в растворной смеси до 54%.

6. Модифицирование пенобетонной смеси дисперсными добавками (волластонит, диопсид) заметно снижают коэффициенты вариации по прочности при сжатии (с 17,4% до 3,2 и 8,4% соответственно) и средней плотности (с 6,8% до 2,9 и 4,8% соответственно), что свидетельствует о большей однородности структуры и стабильности свойств пенобетона.

7. Введение дисперсных добавок волластонита и диопсида в пенобетонную смесь обеспечивает дополнительное вовлечение 14–20% воздуха, которое объясняется тем, что частицы минеральных добавок в пенобетонносмесителях создают механические препятствия в турбулентных слоях при сильном завихрении пенобетонных потоков.

8. Модифицирование пенобетона дисперсными минеральными добавками приводит к изменению его поровой структуры: увеличивается в 1,5 раза объем закрытых пор, преобладание равномерно распределен-

ных пор размерами до 2 мм. Введение волластонита уменьшает в 2,34 раза объем пор в пенобетоне диаметром более 0,1 мкм, введение диоксида — на 8,2%.

9. Изменение поровой структуры модифицированного пенобетона приводит к увеличению его морозостойкости и снижению коэффициента теплопроводности до 0,069–0,070 Вт/(м·°С) за счет уменьшения конвекционной теплопередачи.

10. Полученный ячеистый бетон неавтоклавного твердения является теплоизоляционным и конструктивно-теплоизоляционным. Его целесообразно применять как стеновой материал для ненесущих стен и перегородок или в качестве основного стенового материала для малоэтажного строительства. При этом снижается трудоемкость и сокращаются сроки строительства.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Доклад о реализации плана деятельности Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации за 2024 год. Утвержденный Министром строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации И.Э. Файзулиным 28.02.2025 г. № 3-П/01. Электронный ресурс <https://minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/4ca/gr9lvtgntxnpa0hh6bmepq6dd3a2l0tb/3-%D0%9F01.pdf>.

2. Калашников В.И., Тараканов О.В., Володин В.М., Ерофеева И.В., Абрамов Д.А. Бетоны переходного и нового поколений. Состояние и перспективы. *Технологии бетонов*. 2023;2(187):33–38. EDN: AJRFJA.

3. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Дондуков В.Г. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов. *Строительные материалы*. 2017;11:4–10. EDN: ZWUFVB.

4. Калашников В.И., Тараканов О.В. О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения. *Строительные материалы*. 2017;1–2:62–67. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-745-1-2-62-67>. EDN: XXHSZ.

5. Лесовик В.С., Федюк Р.С. Композиты нового поколения для специального строительства. *Строительные материалы*. 2021;3:9–17. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-9-17>. EDN: VBNYRB

6. Тараканов О.В., Фишер Х.Б. Принципы получения высокопрочных бетонов с использованием местных сырьевых ресурсов. *Эксперт: теория и практика*. 2024;3(26):112–117. [https://doi.org/10.51608/26867818\\_2024\\_3\\_112](https://doi.org/10.51608/26867818_2024_3_112). EDN: ATYJDC.

7. Тараканов О.В., Акчурин Т.К., Белякова Е.А., Душко О.В. Перспективы применения комплексных органоминеральных добавок в бетонах нового поколения. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2023;2(91):88–98. EDN: VXWGFN.

8. Тараканов О.В., Акчурин Т.К., Душко О.В., Стефаненко И.В., Санягина Я.А. Формирование ранней структуры и прочности модифицированных цементных материалов. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2023;5(93):71–81. EDN: WIAUJE.

9. Калашников В.И., Суздальцев О.В., Дрянин Р.А., Сехспосян Г.П. Роль дисперсных наполнителей в бетонах нового поколения. *Известия вузов. Строительство*. 2014;7:11–21. EDN: SZGIBV.

10. Тараканов О.В., Ивашенко Ю.Г., Ерофеева И.В. Влияние карбонатных минеральных добавок на формирование микроструктуры и прочность минеральных вяжущих веществ. *Региональная архитектура и строительство*. 2024;1(58):47–58. [https://doi.org/10.54734/20722958\\_2024\\_1\\_47](https://doi.org/10.54734/20722958_2024_1_47). EDN: DQBVJX.

11. Калашников В.И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего. Часть 01. Изменение составов и прочности бетонов. *Строительные материалы*. 2016;1-2:96–103. EDN: VPWHMH.

12. Величко Е.Г., Шумилина Ю.С. К проблеме формирования дисперсного состава и свойств высокопрочного бетона. *Вестник МГСУ*. 2020;15:235–243. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.2.235-243>. EDN: MTNVMX.

13. Ильина Л.В., Самченко С.В., Раков М.А., Зорин Д.А. Моделирование процессов кинетики цементных композитов, модифицированных кальций-содержащими добавками. *Нанотехнологии в строительстве*. 2023;15(5):494–503. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-494-503>. EDN: WVIFWH.

14. Ilina L.V., Mukhina I.N., Semenova M.M. Hardening cement conglomerates by mining industries waste. *Solid State Phenomena*. 2021; 316: 1061–1066. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.316.1061>. EDN: MAULDR.

15. Iliina L., Kudyakov A., Rakov M. Aerated dry mix concrete for remote northern territories. *Magazine of Civil Engineering*. 2022; 5(113): 11310. <https://doi.org/10.34910/MCE.113.10>. EDN: CDHQSU.
16. Бартењева Е.А., Медведев Е. Р. Влияние минеральных добавок на плотность и прочность неавтоклавногo пенобетона. *Эксперт: теория и практика*. 2025;2(29):20–25. [https://doi.org/10.51608/26867818\\_2025\\_2\\_20](https://doi.org/10.51608/26867818_2025_2_20). EDN: TGPUDP.
17. Ерофеев В.Т., Тараканов О.В., Ананьев С.В., Леснов В.В., Ерофеева И.В., Санягина Я.А., Сидоров Н.С., Ананьева Ю.С. Повышение эффективности дисперсного армирования в высокопрочных самоуплотняющихся каркасных бетонах. *Строительные материалы*. 2024;3:15–24. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-822-3-15-24>. EDN: JYBOPL.
18. Doughmi K., Baba K., Nounah A. Mechanical properties of eco-friendly cement based composite mortars plastic fiber reinforced partially replaced by natural pozzolan and marble waste. *Materials Today: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.203>. EDN: DTXAKL.
19. Ahmad J., Zhou Zh. Waste marble based self compacting concrete reinforced with steel fiber exposed to aggressive environment. *Journal of Building Engineering*. 2024; 81: 108142. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108142>. EDN: MNLTMW.
20. Senhadji Y., Escadeillas G., Mouli M., Khelafi H., Benosman. Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar. *Powder Technology*. 2014; 254: 314–323. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.01.046>
21. Salamanova M.Sh., Murtazaev S.-A.Yu., Alaskhanov A.Kh., Ismailova Z.Kh. Development of multicomponent binders using fine powders. *Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” dedicated to the 85<sup>th</sup> anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. 2019; 524–528. <https://doi.org/10.2991/isees-19.2019.58>. EDN: ENFCLS.
22. Dabbaghi F., Sadeghi-Nik A., Libre N.A., Nasrollahpour S. Characterizing fiber reinforced concrete incorporating zeolite and metakaolin as natural pozzolans. *Structures*. 2021; 34: 2617–2627. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.09.025>. EDN: OAVNVA.
23. Subash N., Avudaiappan S., Adish Kumar S., Amran M., Vatin N., Fediuk R., Aepuru R. Experimental investigation on geopolymers concrete with various sustainable mineral ashes. *Materials*. 2021; 14 (21). <https://doi.org/10.3390/ma14247596>. EDN: DFYXZX.
24. Ahmad J., Aslam F., Martinez-Garcia R., de-Prado-Gil J., Qaidi S., Brahmia A. Effects of waste glass and waste marble on mechanical and durability performance of concrete. *Scientific Reports*. 2021; 11: 21525. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00994-0>. EDN: MMFHXY.
25. Mousavi M.A., Sadeghi-Nik A., Bahari A. Cement paste modified by nano-montmorillonite and carbon nanotubes. *ACI Materials Journal*. 2022; 119 (3): 173–185. <https://doi.org/10.14359/51734612>. EDN: MJNZYY.
26. Hajimohammadi A., Provis J.L. The effect of silica availability on the mechanism of geopolymerisation. *Cement and Concrete Research*. 2011; 41(3): 210–216. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.02.001>. EDN: YCFZRB.
27. Das S.K. A simplified model for prediction of pozzolanic characteristics of fly ash, based on chemical composition. *Cement and Concrete Research*. 2006; 36(10): 1827–1832. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.02.020>
28. Uddin F, Shaikh A. Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2016; 5(2): 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.05.009>
29. Bouaissi A., Li L.Y., Abdullah M.M.A.B., Ahmad R., Razak R.A., Yahya Z. Fly ash as a cementitious material for concrete. *Sustainable Building Materials*. 2020. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90466>
30. Neupane K. Fly ash and GGBFS based powder-activated geopolymer binders: A viable sustainable alternative of portland cement in concrete industry. *Mechanics of Materials*. 2016; 103: 110–122. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2016.09.012>
31. Zhang Z., Yang F., Liu J.-C., Wang S. Eco-friendly high strength, high ductility engineered cementitious composites (ECC) with substitution of fly ash by rice husk ash. *Cement and Concrete Research*. 2020; 137: 106200. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106200>. EDN: QHPNPE.
32. Пичугин Е.А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов теплоэлектростанций. *Проблемы региональной экологии*. 2019; 4: 77–87. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2019-14077>. EDN: MNEMXS.
33. Илина Л.В., Раков М.А., Сколубович Я.Л. Aerated concrete, obtained by joint grinding of components. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018: 012044. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/456/1/012044>. EDN: TVLBAX.

34. Ильина Л.В., Молодин В.В., Гичко Н.О., Туляганов А.К. Повышение прочностных характеристик цементных конгломератов добавками направленного действия. *Строительные материалы*. 2023;7:36–42. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-36-42>. EDN: NZDKUO.

#### 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

**Ильина Лилия Владимировна** – доктор технических наук, профессор, директор института цифровых и инженерных технологий, советник РААСН, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, Новосибирск, ул. Тургенева, 159, Российская Федерация, nsklika@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8520-4453>

**Бартеньева Екатерина Анатольевна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных материалов, стандартизации и сертификации института цифровых и инженерных технологий, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, Новосибирск, ул. Тургенева, 159, Российская Федерация, e.bartenyeva@sibstrin.ru, <https://orcid.org/0009-0003-9171-2192>

#### ВКЛАД АВТОРОВ

**Ильина Л.В.** – научное руководство, разработка концепции и развитие методологии исследования, обработка и анализ экспериментальных данных, систематизация экспериментальных данных, составление итоговых выводов, литературный обзор.

**Бартеньева Е.А.** – проведение экспериментальной части, графическое и табличное представление результатов исследования, обработка и анализ экспериментальных данных с применением методов машинного обучения.

#### Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 28.02.2026; одобрена после рецензирования 01.06.2026; принята к публикации 03.06.2026.