

Научная статья

УДК 666.973.6

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-2/77-90>

## Управление структурообразованием газобетона с помощью модифицированного кремнеземистого компонента

Александр Алексеевич Баранов✉, Александр Олегович Шанин

ООО ПК «Куби Блок Егорьевский», Егорьевск, Российская Федерация

✉ [baranov.gazobeton@list.ru](mailto:baranov.gazobeton@list.ru)

**Аннотация.** В статье приведены результаты апробации модифицированного кремнеземистого компонента в сравнении с базовым кремнеземистым компонентом. Актуальность работы обусловлена совершенствованием технологии путем максимально полного использования потенциала исходного сырья и активации его внутренних резервов. Доказана возможность регулирования реологии ячеистобетонной смеси на этапе формирования структуры. Показаны изменения размера и объема пор, а также их количества по видам пористости. Анализ образцов после тепловлажностной обработки выявил различия в дисперсности и морфологии поверхности новообразований. На основании полученных данных выявлены причинно-следственные связи и показаны пути повышения качества газобетона. Для марки по средней плотности D600 при использовании литьевой и ударной технологий производства установлено: увеличение коэффициента конструктивного качества с 8,67–8,98 до 9,46–9,57; снижение отпускной влажности с 24,9–20,5 до 22,2–17,3%; уменьшение теплопроводности с 0,153–0,154 до 0,144–0,150 Вт/м·°С; увеличение паропроницаемости с 0,171–0,175 до 0,186–0,195 мг/(м·ч·Па); сокращение усадки при высыхании с 0,149–0,104 до 0,133–0,102 мм/м соответственно. В результате раскрыт высокий потенциал применения модифицированного кремнеземистого компонента для решения практических технологических задач.

**Ключевые слова:** газобетон, модифицированный кремнеземистый компонент, структурообразование, пористость, морфология поверхности

**Для цитирования:** Баранов А.А., Шанин А.О. Управление структурообразованием газобетона с помощью модифицированного кремнеземистого компонента // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 2(59). С. 77–90.

Original article

## Control of the structure formation of aerated concrete using a modified silica component

Aleksandr A. Baranov✉, Aleksandr O. Shanin

LLC PC «Cubi Block Yegoryevsky», Yegoryevsk, Russian Federation

✉ [baranov.gazobeton@list.ru](mailto:baranov.gazobeton@list.ru)

**Abstract.** The study presents the results of approbation of the modified silica component and comparison with the basic silica component. The relevance of the work is due to the improvement of technology due to the fullest possible use of the potential of the feedstock and the activation of its internal reserves. The possibility of regulating the rheology of a cellular concrete mixture at the stage of structure formation is proved. Changes in the size and volume of pores, as well as their number by type of porosity, are shown. The analysis of samples after heat and moisture treatment revealed differences in the dispersion and morphology of the surface of neoplasms. Based on the data obtained, the authors established causal relationships and demonstrated ways to improve the quality of aerated concrete. For the D600 medium density brand, when using injection molding and impact production technologies, it is established: an increase in the coefficient of structural quality from 8.67–8.98 to 9.46–9.57; a decrease in the release humidity from 24.9–20.5% to 22.2–17.3%; a decrease in

thermal conductivity from 0.153–0.154 to 0.144–0.150 W/m<sup>°C</sup>; an increase in vapor permeability from 0.171–0.175 to 0.186–0.195 mg/(m·h·Pa); reduction of shrinkage during drying from 0.149–0.104 to 0.133–0.102 mm/m, respectively. Thus, the study reveals the wide potential of using a modified silica component to solve practical technological problems.

**Keywords:** aerated concrete, modified silica component, structure formation, porosity, surface morphology

**For citation:** Baranov A.A., Shanin A.O. Control of the structure formation of aerated concrete using a modified silica component. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 2(59), pp. 77–90. (In Russ.).

## Введение

Характеристики поровой структуры и межпоровой перегородки определяют физико-механические и теплотехнические свойства изделий из газобетона автоклавного твердения. Ключевая роль в стабильном выпуске качественной продукции заключается как в бездефектности однородного распределения пор с учетом их количества и размера, так и в формировании прочного каркаса композита. Поэтому актуально не только использование знаний основ структурообразования, но и поиск новых механизмов его управления.

В ряде работ выделяются приоритетные факторы, отвечающие за пористость газобетона [1–4]. Первый фактор – кинетика газовыделения, зависящая от характеристик газообразователя, активности по СаО смеси и температуры протекающих реакций; второй – изменения вязкопластичных свойств массы во времени, которые связаны с водотвердым отношением (В/Т), технологическими особенностями, параметрами сырья и рецептурным составом. Именно согласование и синхронизация этих двух процессов является залогом формирования совершенной структуры.

Современная концепция регулирования структурообразования материалов автоклавного твердения заключается в получении изделий с наилучшим сочетанием свойств благодаря максимальному полному применению возможностей исходного сырья и активации его внутренних резервов [5]. Также отмечено, что качественное преобразование конечного продукта возможно благодаря модифицирующему воздействию на сырьевую смесь. Повышение технико-экономических показателей не должно быть сопряжено с усложнением этапов изготовления и, как следствие, с увеличением материальных расходов.

Авторы данной статьи считают обратный шлам (возвратный отход) компонентом полифункционального действия. Раскрытие потенциала его использования по предложенному способу [6] обладает технической новизной, которая подтверждена патентным поиском. Актуальность обусловлена совершенствованием технологии производства газобетона. На основании полученных ранее результатов [7] отмечается перспективность применения модифицированного кремнеземистого компонента. Эффективное управление структурообразующими процессами как на ранних стадиях реологии газобетонной массы, так и в ходе автоклавной обработки возможно в результате: повышения седиментационной и агрегативной устойчивости самой смеси, регулирования ее рН и рецептуры, изменения количества свободной воды затворения при равном и пониженном В/Т, увеличения удельной поверхности модифицированного кремнеземистого компонента, частичной аморфизации его частиц, образования в нем первичных гидросиликатов кальция.

Цель работы – оценить применение модифицированного кремнеземистого компонента по сравнению с базовым и исследовать изменения в качественных характеристиках как газобетонной смеси, так и готовой продукции. Поставлена задача: для марки по средней плотности D600 при использовании литьевой и ударной технологий производства установить коэффициент конструктивного качества, отпускную влажность, теплопроводность, паропроницаемость и усадку при высыхании, а также выявить причинно-следственные связи с учетом реологических свойств, макро- и микроструктурных изменений.

## Материалы и методы

Экспериментальная часть выполнена на базе предприятия по производству неармированных газобетонных блоков автоклавного твердения ООО ПК «Куби Блок Егорьевский»

(Московская обл., г. Егорьевск, технологическая линия Masa-Henke Vario-Block, Германия).

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

В качестве основных сырьевых компонентов применялись:

- камень гипсовый, 3 сорт, ТУ 08.11.20-002-01250242-2020, производство ООО «Кнауф Гипс Новомосковск», г. Новомосковск (фракция 0–50 мм, содержание  $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$  – 81,9%, удельная эффективность естественных радионуклидов менее 22 Бк/кг);

- цемент ЦЕМ II / А-И 42.5Н ГОСТ 31108-2020, производство ООО «Холсим (Рус) СМ», г. Коломна (содержание минеральных добавок (известняк) – 11%, нормальная плотность цементного теста – 28,6%, начало / конец схватывания – 190 / 245 мин, средняя прочность на сжатие в возрасте 2 / 28 суток – 21,7 / 50,3 МПа);

- известь карбонатная негашеная, 2 сорт, ТУ 5744-001-00121270-200, производство ООО «Придонхимстрой Известь», г. Россошь (активные  $\text{CaO} + \text{MgO}$  – 85,4%, активные  $\text{MgO}$  – 0,8%,  $\text{CO}_2$  – 3%, температура гашения – 81 °С, время гашения – 6 мин, остаток на сите 02 / 009 – 0,17 / 4,4%);

- газообразователь ПАП-2, ТУ 24.42.21-001-98948328-2017, производство ООО «СУАЛ-ПМ», г. Шелехов (массовая доля влаги – 0,03%, химический состав –  $\text{Fe} / \text{Si} / \text{Cu} / \text{Mn} < 0,5 / < 0,4 / < 0,05 / < 0,01\%$ , кроющая способность на воде – 11000  $\text{cm}^2/\text{г}$ , жировые добавки – 3,4%, остаток на сите 0056 / 0045 – 0,1 / 0,3%, доля активного  $\text{Al}$  – 91,1%);

- базовый кремнеземистый компонент (КК) – песок кварцевый мытый, II класс ГОСТ 8736-2014, производство ООО «Алмаз», карьер «Есино», г. Электросталь (насыпная плотность – 1,58  $\text{г}/\text{см}^3$ , влажность – 1,8%, остаток на сите 0.63 – 15,19%, модуль крупности – 1,96, содержание глинистых, илистых и пылевидных частиц – 0,88%; химический состав – см. табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

**Химический состав базового и модифицированного кремнеземистых компонентов**  
 Chemical composition of the basic and modified silica components

Материал	Содержание оксидов, %											п.п.п
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{SO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{TiO}_2$	$\text{Mn}_2\text{O}$	
КК	95,4	0,96	0,58	0,82	0,09	0,69	0,43	0,33	0,02	0,10	0,02	0,56
МКК	93,8	1,08	0,66	1,80	0,14	0,61	0,44	0,33	0,02	0,10	0,02	0,99

Получение модифицированного кремнеземистого компонента (МКК) выполнено по запатентованному авторами настоящего исследования способу RU 2804062 С1 [6]. Согласно формуле изобретения п. 1: «Способ применения обратного шлама для получения сырьевой смеси при производстве ячеистого бетона автоклавного твердения, включающий подачу обратного шлама в заливочную смесь в качестве компонента, отличающийся тем, что происходит разделение обратного шлама на две части, при этом первая часть обратного шлама, составляющая  $15 \pm 2\%$  (в пересчете на сухое вещество от массы сухих компонентов смеси) и имеющая плотность  $1,40 \pm 0,05 \text{ г}/\text{см}^3$ , подается непосредственно в заливочную смесь, а вторая часть обратного шлама, составляющая 3–7% (в пересчете на сухое вещество от массы сухих компонентов смеси) и имеющая плотность  $1,30 \pm 0,15 \text{ г}/\text{см}^3$ , поступает в шаровую мельницу для мокрого помола совместно с кварцевым песком и для получения таким образом модифицированного кремнеземистого компонента, который, в свою очередь, подается в заливочную смесь»; п. 2: «Способ по п.1, отличающийся тем, что для мокрого помола дополнительно используется гипсовый камень с содержанием  $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$  80–85% и размером фракции 0–50 мм, при этом количество подаваемого гипсового камня должно обеспечить содержание  $\text{SO}_3$  в модифицированном кремнеземистом компоненте 1,0–3,0%» [6]. Качественные характери-

стики применяемого в данном исследовании МКК: плотность – 1,73 г/см<sup>3</sup>; удельная поверхность  $S_{уд}$  – 2479 см<sup>2</sup>/г; истинная плотность – 2,57 г/см<sup>3</sup>; pH – 9,12; химический состав – см. табл. 1 [7].

Шифр и состав сырьевой смеси приведены в табл. 2. Маркировка Л и У обозначает технологию производства – литьевая и ударная. Маркировка 20, 17 и 14 – процент по массе от общих сухих компонентов обратного (возвратного) шлама. Маркировка КК и МКК – применение в качестве песчаного (прямого) шлама базового кремнеземистого компонента и модифицированного кремнеземистого компонента.

Таблица 2 / Table 2

**Состав сырьевой смеси**  
Composition of the raw mixture

Компонент	Шифр							
	Л				У			
	20/КК	20/МКК	17/МКК	14/МКК	20/КК	20/МКК	17/МКК	14/МКК
Цемент, мас. %	19,0			18,0	15,0			14,0
Известь, мас. %	10,5			10,0	12,5			12,0
Обратный шлам, мас. %	20,0		17,0	14,0	20,0		17,0	14,0
Песчаный шлам, мас. %	50,5		53,5	58,0	52,5		55,5	60,0
Газообразователь, кг/м <sup>3</sup> смеси	0,31				0,38			
Водотвердое отношение	0,56			0,53	0,48			0,46

Последовательность и время смешивания сырьевой смеси: свободная вода и шламовые массы – 30 с.; известь – 15 с.; цемент – 40 с.; алюминиевая суспензия (газообразователь) – 45 с.

Реологические свойства газобетонной массы отслеживали, используя вискозиметр Суттарда (внутренний диаметр цилиндра – 50±0,1 мм, высота цилиндра – 100±0,1 мм), измеритель температуры ИТ-7 (диаметр зонда – 4 мм, длина зонда – 300 мм), стальной конус (длина – 10 см, диаметр – 1,5 см, вес – 30 г), линейку измерительную металлическую ГОСТ 427-75.

Автоклавная обработка выполнена по режиму: подъем до 11,35 бар за 170 мин; изотермическая выдержка – 350 мин при температуре 188–189 °С; спуск до 0 бар за 80 мин.

Макроструктурная оценка ячеистой пористости выполнена фазоконтрастным методом анализа неоднородностей изображения на ПО «Неровнота» ИВГПУ (Россия). В условиях температуры окружающей среды 25 °С, относительной влажности воздуха 60% и освещенности помещения 300 лк выполнена оцифровка в черно-белом режиме с 161 яркостью и контрастностью образцов-шлифов размером 150×150 мм.

Основные декларируемые для газобетона автоклавного твердения физико-механические и теплотехнические характеристики определены в соответствии с ГОСТ 31360-2007 и ГОСТ 31359-2007.

Определение истинной плотности бетонной матрицы (межпоровой перегородки) выполнено на приборе Ле-Шателье по ГОСТ 12730.1-2020.

Для измерения удельной поверхности методом БЭТ, STSA, получения данных об объеме пор и их распределения по размерам использован прибор Сорби-MS ЗАО «МЕТА» (Россия). Построение изотерм адсорбции и десорбции проведено в диапазоне парциальных давлений 0,02–0,98 P/P<sub>0</sub>. В качестве газа-адсорбата в данной модификации применим азот газообразный ГОСТ 9293-74 (особой чистоты, объемная доля не менее 99,999%), в качестве газаносителя – газообразный гелий ТУ 0271-001-45905715-02 (марка 6, объемная доля не менее

99,9999%). Для работы с прибором использовалось специализированное программное обеспечение SoftSorbi-II. Перед исследованием образцы материалов измельчались и подвергались термической обработке в токе инертного газа (гелия) при температуре 150 °С в течение 30 мин для удаления влаги и адсорбированных газов. Объем образца ограничивался рабочим объемом ампулы (1 мл).

Для оценки морфологии поровой и межпоровой поверхностей газобетона образцы наклеивали на медные пластины при помощи двустороннего электропроводного скотча. Напыление платиной производили в камере катодного напыления установки Val-Tec-SCD-005 (Лихтенштейн) в течение 130 с. в атмосфере аргона. Далее образцы исследовали на сканирующем электронном микроскопе LEO-1430-VP (Германия) в условиях высокого вакуума с использованием детектора 4QBSD обратноотраженных электронов при комнатной температуре, ускоряющем напряжении 20 кВ и рабочем расстоянии от детектора WD.

### Результаты и их обсуждение

Для получения широкого диапазона данных и изучения реологических свойств, отличных по способу вспучивания смесей, применялась литьевая и ударная технологии производства. В целях объективного анализа расход газообразователя был подобран для изготовления образцов максимально равной средней плотности. Значения технологических параметров позволяют напрямую или косвенно оценить согласование процессов структурообразования (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

**Технологические параметры сырьевой смеси**  
Technological parameters of the raw material mixture

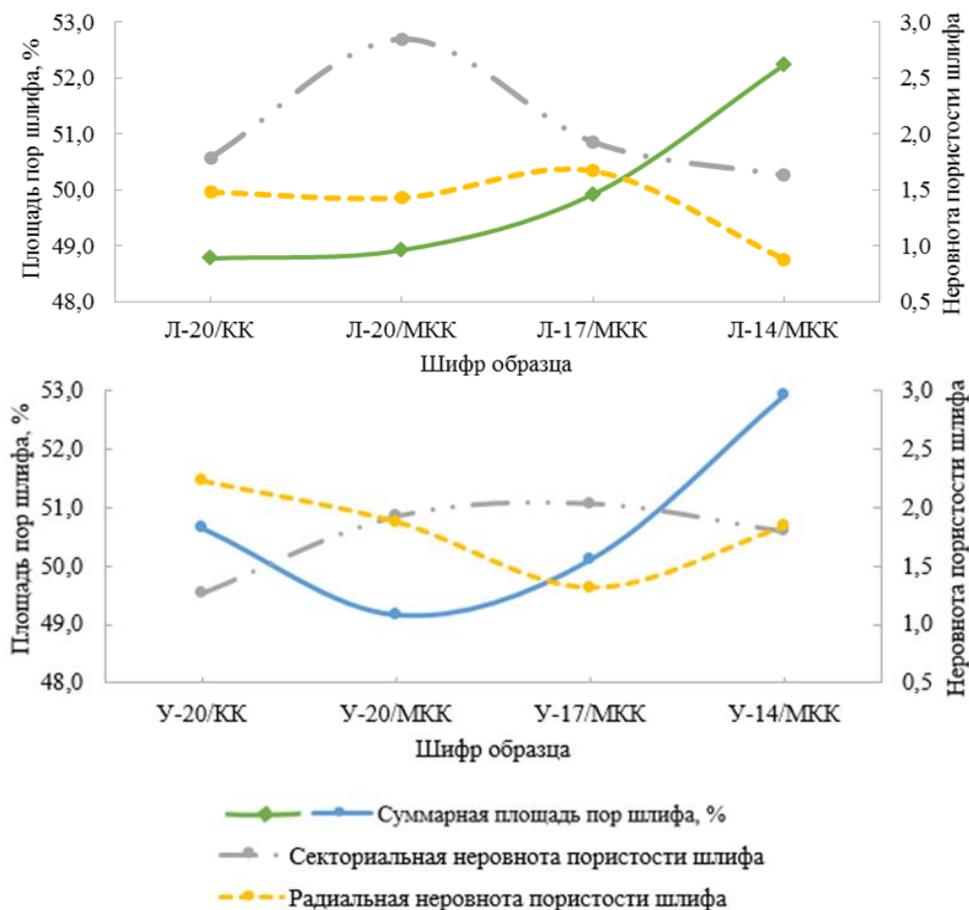
Параметр	Шифр							
	Л				У			
	20/КК	20/МК	17/МКК	14/МКК	20/КК	20/МКК	17/МКК	14/МКК
Температура заливки, °С	41,0	41,0	41,3	41,4	41,1	41,6	41,4	41,0
Расплыв по Сутгарду, см	29,0	28,5	30,5	28,0	23,5	24,0	26,0	23,5
Температура «кипения», °С	60,1	61,0	60,6	58,9	59,8	60,7	59,9	58,1
Время «кипения», мин	43	42	42	39	32	31	30	29
Глубина погружения конуса, см	7,5	7,0	6,0	8,5	6,0	5,5	5,0	7,0
Осадка смеси после «кипания», см	1,4	1,1	0,8	1,5	0,7	0,5	0,3	1,0

Благоприятными условиями формирования ячеистой структуры являются невысокий показатель предельного напряжения сдвига, медленное нарастание вязкости смеси в начале газовыделения и интенсивное – при завершении [8]. МКК, обладая большей дисперсностью по сравнению с базовым КК ( $S_{уд} - 2045 \text{ см}^2/\text{г}$ ), предрасположен к повышению водопотребления. Однако непосредственно в сырьевую смесь он подается в виде шлама, поэтому негативное влияние на общую текучесть минимально. Это подтверждает разнонаправленное и незначительное изменение расплыва по Сутгарду для Л-20/КК ↔ Л-20/МКК и У-20/КК ↔ У-20/МКК. Наличие в МКК первичных гидросиликатов кальция («затравки») способствует появлению ранних центров кристаллизации новообразований, что позволяет повысить газодерживающую способность. Уменьшение глубины погружения конуса в момент «кипания» и меньшая осадка смеси в случае применения 20/МКК по сравнению с 20/КК как для Л, так и для У свидетельствуют о лучшей согласованности набора пластической прочности и поровой структуры бетона.

Увеличение распыла по Суттарду у образцов Л-17/МКК и У-17/МКК закономерно. Оно вызвано повышением количества свободной воды в системе при убавлении содержания возвратных шламотходов. Благодаря меньшей вязкости в начальный период вспучивания смесь свободно деформировалась под действием газовой фазы. Так как высота заполнения форм на завершающем этапе газовыделения была максимальной (осадка составила 0,8 см для Л и 0,3 см для У), то составы Л-17/МКК и У-17/МКК обеспечивают наилучшую поризацию. Проявление еще большей газодерживающей способности по сравнению с 20/МКК и тем более 20/КК объясняется увеличением в сырьевой смеси массовой доли МКК в условиях сохранения заданной средней плотности.

По мнению авторов, сокращение времени от момента заливки до наступления «кипения» в ряду 20/КК → 20/МКК → 17/МКК для Л и У вызвано увеличением щелочности среды. МКК не инертен, в отличие от КК, и содержит активный СаО. Рост температуры «кипения» это также подтверждает.

Для Л-14/МКК и У-14/МКК, в силу изменения состава смеси, возникает многофакторность в управлении макро- и микроуровнями структурообразования. Отмечена необходимость компенсационных мероприятий при целенаправленном снижении В/Т отношения [4]. У образцов 14/МКК повышенная начальная вязкость и раннее наступление времени «кипения» частично ухудшили условия вспучивания массы. Однако ожидаемое уплотнение композита позволило спрогнозировать уменьшение открытой пористости.



**Рис. 1. Макроструктурная оценка пористости газобетона**  
 Fig. 1. Macrostructural assessment of aerated concrete porosity

Характер структуры – важный критерий ячеистых материалов. От взаимного расположения пор, их формы, целостности и количества зависит общая эффективность газобетона. Статистическая оценка пористости по анализу изображения приведена в работах [2, 9–11]. Макроструктурные изменения (рис. 1), выраженные через суммарную площадь пор шлифа,

для образцов Л в ряду 20/КК → 20/МКК → 17/МКК → 14/МКК свидетельствуют о планомерном увеличении объема ячеистых пор. В технологии У, несмотря на снижение у 20/МКК и 17/МКК, для 14/МКК также отмечен рост данного вида пористости. Согласно теории ячеистых структур [12] все образцы имеют кубическую одномодальную укладку макропор. Стоит отметить, что значения получены на шлифах, изготовленных перпендикулярно направлению вспучивания массы. Ячеистая пористость образцов при исследовании шлифов параллельно газовыделению была бы несколько выше, но в нашем случае важно было определить именно тренд. Также необходимо сказать, что чем меньше секториальная и радиальная неровнота пористости, тем равномернее и однороднее распределение макропор.

Общая пористость складывается из макроскопических ячеистых пор и микроскопических капиллярных и гелевых [12, 13]. Она определяет долю всех пор в единице объема и также может быть рассчитана по формуле [14]:

$$П = \left(1 - \frac{P_r}{P_k}\right) \cdot 100\%, \tag{1}$$

где  $P_r$  – плотность газобетона, кг/м<sup>3</sup>;

$P_k$  – плотность цементного камня (истинная плотность бетонной матрицы), кг/м<sup>3</sup>.

На основании полученных данных (табл. 4) по формуле (1) общая пористость для образцов Л составила 73,66% (20/КК) → 73,87% (20/МКК) → 73,89% (17/МКК) → 73,49% (14/МКК) и образцов У – 73,85% (20/КК) → 74,20% (20/МКК) → 74,38% (17/МКК) → 73,86% (14/МКК).

Таблица 4 / Table 4

**Физико-механические и теплотехнические характеристики газобетона**  
 Physico-mechanical and thermal characteristics of aerated concrete

Параметр	Шифр							
	Л				У			
	20/КК	20/МКК	17/МКК	14/МКК	20/КК	20/МКК	17/МКК	14/МКК
Средняя плотность ( $\rho$ ), кг/м <sup>3</sup>	600,5	603,6	595,3	601,8	598,7	595,9	584,2	596,0
Истинная плотность ( $\rho_n$ ), г/см <sup>3</sup>	2,28	2,31	2,28	2,27	2,29	2,31	2,28	2,28
Прочность ( $R_{сж}$ ), МПа	5,21	5,71	5,50	5,24	5,38	5,70	5,44	5,06
Влажность ( $W$ ), %	24,9	25,6	25,5	22,2	20,5	20,4	20,9	17,3
Теплопроводность ( $\lambda$ ), Вт/м·°С	0,153	0,154	0,149	0,144	0,154	0,153	0,155	0,150
Паропроницаемость ( $\mu$ ), мг/(м·ч·Па)	0,171	0,174	0,186	0,184	0,175	0,181	0,195	0,179
Усадка при высыхании ( $E_{35 \rightarrow 5\%}$ ), мм/м	0,149	0,133	0,155	0,135	0,104	0,102	0,107	0,109
Морозостойкость ( $F$ ), циклов	100							

Образцы 14/МКК обладают лучшей теплопроводностью в сухом состоянии ( $\lambda$ ) при технологии как Л, так и У. Повышение теплоэффективности связано с увеличением доли ячеистой (см. рис. 1) и сохранением или увеличением доли гелевой (закрытой) пористости с учетом расчетных значений общей. Данное утверждение основано и на оценке капиллярной пористости, которая выполнена экспериментальным методом [15] на этапе увлажнения образцов водой при испытании на морозостойкость. О снижении количества открытых пор говорит тот факт, что фактически набранная влажность для 14/МКК была меньше в среднем на 2,8–3,3% по сравнению с 20/КК, на 5,4–5,9% по сравнению с 20/МКК и на 1,8–3,9% по сравнению с 17/МКК.

Установлено, что при технологии У, за счет снижения В/Т отношения смеси, изменения расхода и степени гидратации цемента, не только меньше отпускная влажность ( $W$ ), но и ниже максимально возможное водопоглощение (на 9,6–12,0% по сравнению с Л). Следовательно, структура образцов У позволяет приобретать и сохранять наилучшие эксплуатационные свойства газобетона. Это относится: к усадке при высыхании ( $E_{35 \rightarrow 5\%}$ ), которую с практической точки зрения необходимо оценивать при снижении влажности кладки до равновесной 4–5%; к морозостойкости ( $F$ ), которая увеличивается при росте объема резервных пор. Эти поры образуют буферное пространство, выступающее в роли демпфера при расширении и переходе воды в состояние льда; также меньшее водопоглощение препятствует увеличению теплопроводности и падению прочности на сжатие, выраженному через коэффициент размягчения.

Образцы Л-17/МКК и У-17/МКК имеют значения паропроницаемости ( $\mu$ ) 0,186 и 0,195 мг/(м·ч·Па). Определяющим фактором ее роста в соответствующих рядах выступило увеличение общей пористости ( $\Pi$ ) – снижение средней плотности ( $\rho$ ).

Прочность на сжатие рассматривается как функция от параметров минеральной матрицы и структуры пористости газобетона [15]. Если в настоящем исследовании пренебречь изменениями в структурообразовании и оценивать только свойства твердой фазы, то для Л-20/МКК и У-20/МКК повышение истинной плотности ( $\rho_{и}$ ), упрочнение и снижение дефектности межпоровой перегородки определяют наибольшие значения прочности ( $R_{сж}$ ) и коэффициента конструктивного качества (ККК, рис. 2). Анализ МКК по сравнению с КК [7] раскрыл механизмы, которые позволяют этого достичь. Так, в результате механоактивации снижается степень кристалличности и образуется аморфная нарушенная структура. Также повышается дисперсность частиц, и гранулометрический состав становится оптимальным. В итоге повышается реакционное взаимодействие и наиболее полно используется эффект гидратационного твердения в силикатной системе. Поэтому закономерно улучшение механических характеристик готовой продукции.

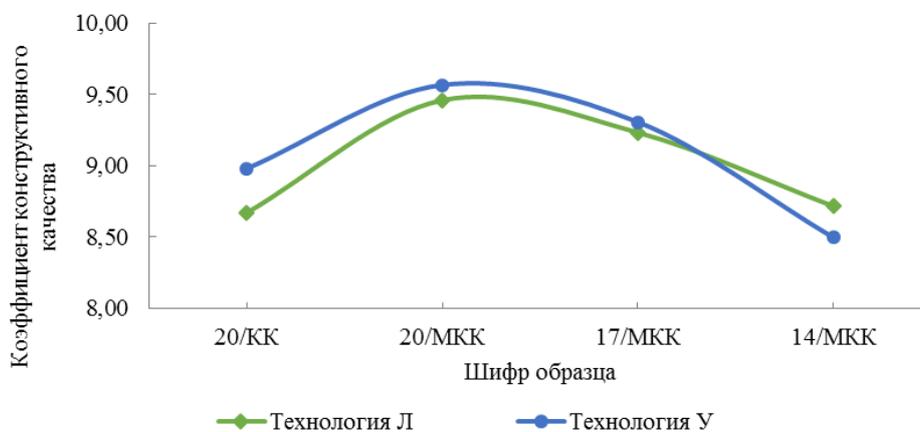


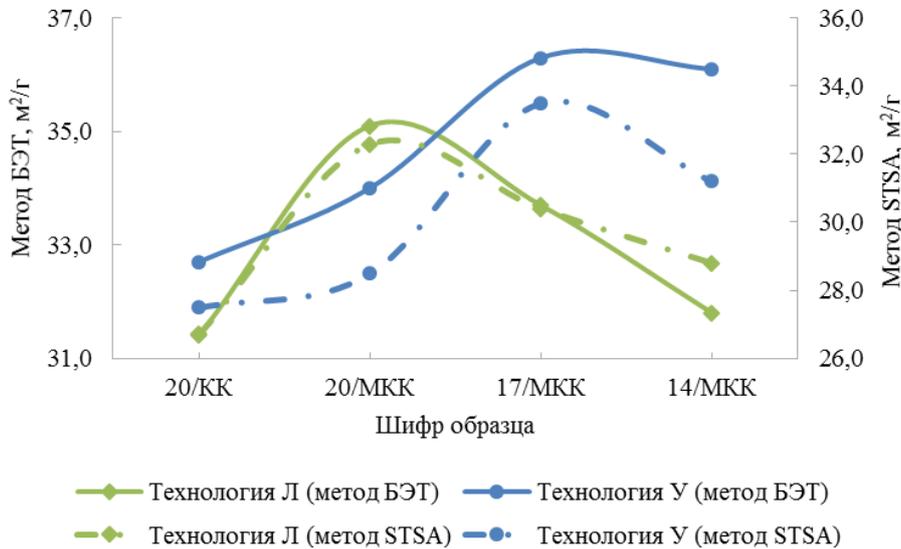
Рис. 2. Коэффициент конструктивного качества газобетона

Fig. 2. Structural quality coefficient of aerated concrete

При определении средней плотности и прочности (см. табл. 4) отмечено, что у образцов на МКК по сравнению с КК наблюдается снижение разницы единичных значений верхней и нижней частей по высоте формирования массива-сырца. При этом само разрушение кубов при испытании характеризуется как удовлетворительное, с соответствующим рисунком трещин, по форме напоминающим «песочные часы» [16]. Именно высокая седиментационная и агрегативная устойчивость МКК обеспечивают стойкость газобетонной смеси к образованию структурных дефектов в результате усадочных явлений. Как следствие, повышается однородность, а вероятность появления брака в виде «расслоения» снижается.

В эволюции структурообразования выделяют последовательные этапы – доавтоклавный и автоклавный. Макросвойства формируются в основном на первом уровне, тогда как на микрохарактеристики оказывает влияние период тепловлажностной обработки [4]. Отмечено

изменение  $S_{уд}$  образцов газобетона, а именно дисперсности новообразований (рис. 3). Увеличение количества возможных точек соприкосновения и большая их концентрация в единице объема наблюдается не только у 20/МКК и 17/МКК. Для 14/МКК, несмотря на снижение расхода цемента и извести в составе сырьевой смеси (см. табл. 2), за счет МКК достигается приемлемая взаимосвязь компонентов для приобретения развитой межфазной поверхности, не уступающей 20/КК.



**Рис. 3. Удельная поверхность газобетона**

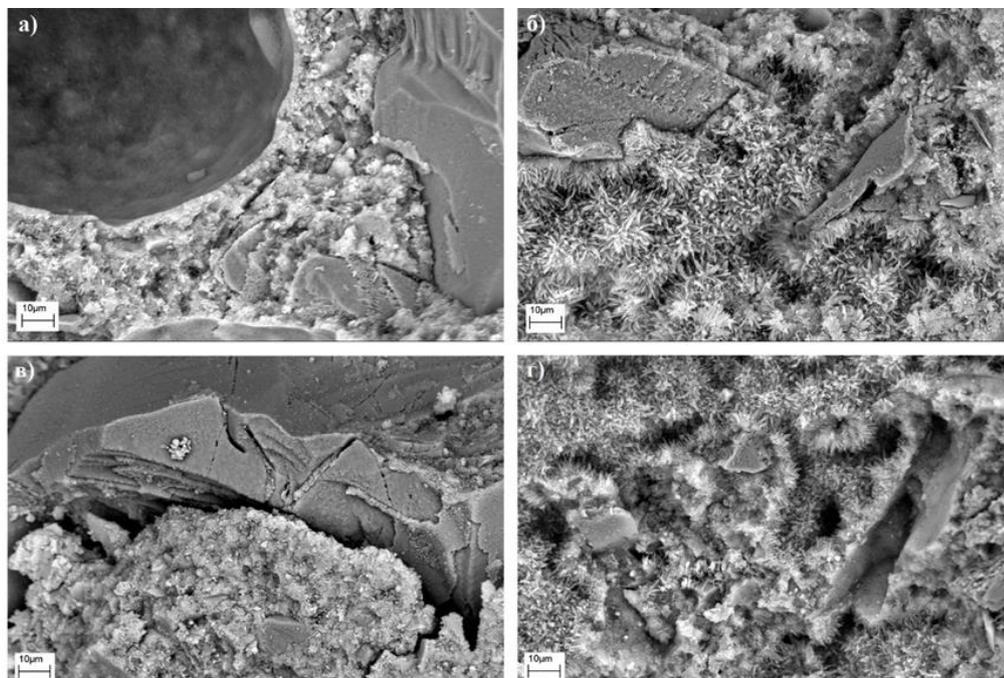
**Fig. 3. Specific surface area of aerated concrete**

Оценка экспериментальной адсорбции азота полученными порошками материала позволила установить, что у всех образцов изотерма относится к IV типу по классификации IUPAC. Наблюдается характерная петля гистерезиса, отражающая протекание капиллярной конденсации в мезопорах. Такого рода изотермы свойственны телам, имеющим преимущественно переходные поры размером 2–50 нм по классификации М.М. Дубинина. Выгнутый характер начального участка указывает на сильное взаимодействие адсорбат-адсорбент. Полный объем пор с  $R$ , меньшим 94,6 нм, для образцов Л составил 0,050 см³/г (20/КК) → 0,058 см³/г (20/МКК) → 0,056 см³/г (17/МКК) → 0,048 см³/г (14/МКК) и У – 0,056 см³/г (20/КК) → 0,062 см³/г (20/МКК) → 0,061 см³/г (17/МКК) → 0,054 см³/г (14/МКК). Микропоры размером менее 20 Å в количестве 0,001 см³/г были зафиксированы в Л-20/КК и У-20/КК, У-20/МКК. В остальных они отсутствуют. Макропоры размером более 500 Å в количестве 0,001–0,002 см³/г обнаружены во всех образцах, кроме Л-14/МКК и У-14/МКК. Данные распределения пор по размерам позволили установить медианное значение  $D_{50}$ . В ряду Л – 14,27 нм (20/КК) → 16,06 нм (20/МКК) → 18,05 нм (17/МКК) → 13,71 нм (14/МКК) и У – 17,39 нм (20/КК) → 17,54 нм (20/МКК) → 17,42 нм (17/МКК) → 15,16 нм (14/МКК). Снижение пористости скелета бетона 14/МКК согласуется с ранее сделанными утверждениями. Объем пор, их раздвижка, укладка и дислокация в упаковке, а также изменение толщин матрицы композита – всё это в совокупности предопределило физико-механические характеристики газобетона при использовании МКК.

Изменение морфологии поверхности стенки показано на рис. 4, а поры – на рис. 5. Для объективной оценки микрофотографии образцов автоклавного газобетона получены в равных условиях при одном фокусном расстоянии WD, увеличении Mag 2.00–2.03 К X (межпоровая) и Mag 4.00–4.05 К X (поровая).

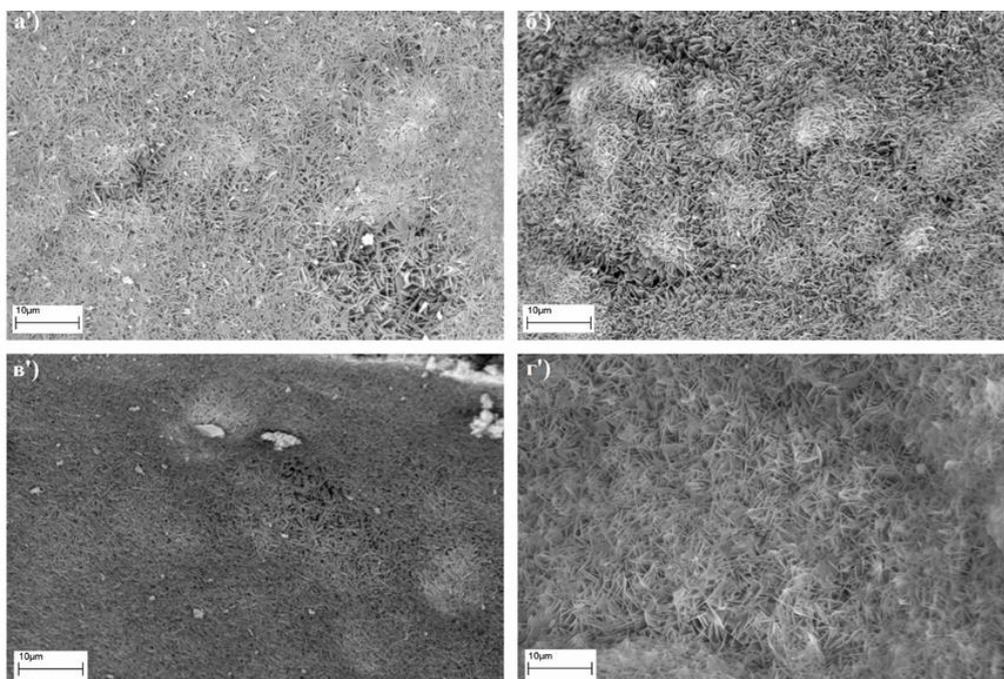
В случае использования базового КК (рис. 4 а, в) отмечено присутствие отдельных обнаженных частиц кварца, которые не цементированы новообразованиями. Однако при использовании МКК (рис. 4 б, г) имеет место максимально полное их омоноличивание. Зерна заполнителя менее заметны в общей массе вещества. Межпоровая перегородка прошита минералами

различного состава, формирующими разветвленный каркас. Наблюдаются как хорошо окристаллизованные пластинки и иголки, так и глобулярные образования. Вероятно, это происходит благодаря увеличению удельной поверхности МКК ( $S_{уд} = 2479 \text{ см}^2/\text{г}$ ) и изначальному наличию на его частицах намола компонентов обратного шлама, которые обеспечивают активирование и химическое сходство с вяжущими ячеистобетоной смеси.



**Рис. 4. Морфология межпоровой поверхности газобетона:**  
**а) Л-20/КК; б) Л-14/МКК; в) У-20/КК; г) У-14/МКК**

**Fig. 4. Morphology of the interpore surface of aerated concrete:**  
**a) L-20/KK; б) L-14/MKK; в) U-20/KK; г) U-14/MKK**



**Рис. 5. Морфология поровой поверхности газобетона:**  
**а') Л-20/КК; б') Л-14/МКК; в') У-20/КК; г') У-14/МКК**

**Fig. 5. Morphology of the pore surface of aerated concrete:**  
**а') L-20/KK; б') L-14/MKK; в') U-20/KK; г') U-14/MKK**

Поверхности пор образцов (рис. 5) имеют схожие структуры срастания и прорастания, которые сформировались в результате многократных перекристаллизаций. Но при большом увеличении видно, что для 20/КК (рис. 5 а', в') характерно наличие несросшихся частиц и местами есть слабозакристаллизованные участки. У 14/МКК (рис. 5 б', г') дефектов структуры значительно меньше и матрица имеет выше плотность и сплошность.

МКК, как было сказано ранее, служит центром кристаллизации гидросиликатов кальция. Повышение количества новообразований на микроуровне в системе CaO/SiO<sub>2</sub> вызвано увеличением суммарной поверхности раздела фаз кварцевой и известковой составляющих. При этом в ходе автоклавной обработки благодаря повышению дисперсности и pH с нейтрального (базовый КК) до 9,12 у МКК возрастает растворимость, что приводит к ускоренному взаимодействию. О полноте протекания процессов фазообразования свидетельствует и уменьшение остаточной активности газобетона по CaO с 2,74% на КК до 2,31% на МКК. Объяснением этому может служить перераспределение системы с переизбытка известкового компонента (образование высокоосновных гидросиликатов кальция) к его отсутствию в свободной форме (образование низкоосновных гидросиликатов кальция).

### Заключение

В исследовании авторы оценили механизмы структурообразования сырьевой смеси и готовой продукции. Путем применения модифицированного кремнеземистого компонента в производстве газобетона автоклавного твердения выявлена возможность регулирования реологических свойств. Установлено:

- улучшение газодерживающей способности формируемой структуры благодаря наличию первичных гидросиликатов кальция («затравки»);
- большая поризация массива-сырца при меньшей вязкости в начальный период вспучивания;
- уплотнение композита за счет изменения расхода и степени гидратации цемента;
- максимально полное омоноличивание зерен заполнителя благодаря увеличению их удельной поверхности, активированию и химическому сходству с вяжущими.

Многофакторность влияния модифицированного кремнеземистого компонента на структурные процессы макро- и микроуровней раскрывает широкий потенциал для решения практических технологических задач.

В исследовании также показаны пути улучшения и оптимизации физико-механических и теплотехнических характеристик газобетона. Установлено:

- увеличение коэффициента конструктивного качества с 8,67–8,98 до 9,46–9,57 за счет упрочнения и снижения дефектности межпоровой перегородки;
- снижение отпускной влажности с 24,9–20,5% до 22,2–17,3% благодаря возможности сокращения водотвердого отношения газобетонной смеси и уменьшения доли открытых пор;
- уменьшение теплопроводности с 0,153–0,154 до 0,144–0,150 Вт/м·°С за счет увеличения ячеистой пористости;
- увеличение паропроницаемости с 0,171–0,175 до 0,186–0,195 мг/(м·ч·Па) благодаря снижению средней плотности газобетона;
- сокращение усадки при высыхании с 0,149–0,104 до 0,133–0,102 мм/м за счет лучшей кристаллизации гидросиликата кальция.

Дальнейшее исследование предполагает изучение дифрактограмм рентгенофазового анализа базового и модифицированного песчаных шламов, а также образцов готовой продукции в соответствии с текущим шифром сырьевых смесей. Ожидаются изменения в степени кристалличности, качественном и количественном фазовых составах. Также предусмотрена оценка экологического и экономического аспектов использования модифицированного кремнеземистого компонента.

## ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

А.А. Баранов – теоретический обзор, постановка цели и задач, руководство экспериментальной частью, оценка макро- и микроструктурных изменений, общий анализ полученных результатов и формулирование выводов исследования; А.О. Шанин – подготовка сырьевых компонентов и оборудования при проведении лабораторных и промышленных экспериментов, получение образцов. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

A.A. Baranov – theoretical review, setting goals and objectives, management of the experimental part, assessment of macro- and microstructural changes, general analysis of the results obtained and formulation of research conclusions; A.O. Shanin – preparation of raw materials and equipment during laboratory and industrial experiments, obtaining samples. All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | CONFLICT OF INTEREST

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мартыненко В.А., Морозова Н.В. Справочник специалиста лаборатории завода по производству газобетонных изделий. Днепропетровск: ПГАСА, 2009. 308 с.
2. Мирюк О.А. Формирование структуры ячеистых бетонов / Рудненский индустриальный институт. Рудный, 2015. 210 с.
3. Сулейманова Л.А. Управление процессом формирования пористой структуры ячеистых бетонов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 2. С. 69–76. EDN: VHIJVN
4. Шмитько Е.И., Резанов А.А., Бедарев А.А. Мультипараметрическая оптимизация структуры ячеистого силикатного бетона // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 3(38). С. 15–23. <https://doi.org/10.5862/MCE.38.2>
5. Нелюбова В.В. Эволюция подходов к проектированию материалов автоклавного твердения // Строительные материалы. 2019. № 1–2. С. 88–99. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-88-99>
6. Патент № 2804062 Российская Федерация, МПК С04В 40/00, С04В 38/02, С04В 28/04, С04В 18/04. Способ применения обратного шлама для получения сырьевой смеси при производстве ячеистого бетона автоклавного твердения № 2023101010; заявл. 18.01.2023; опубл. 26.09.2023 / А.А. Баранов, С.В. Новиков, М.В. Акулова, Н.И. Муковнин. EDN: HXJTRE
7. Баранов А.А., Шанин А.О., Акулова М.В. Свойства модифицированного кремнеземистого компонента – перспективного сырья при производстве газобетона // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2023. № 7. С. 8–16. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2023-8-7-8-16>
8. Лотов В.А., Митина Н.А. Регулирование реологических свойств газобетонной смеси различными добавками // Строительные материалы. 2002. № 10. С. 12–15. EDN: IBECNB
9. Алоян Р.М., Овчинников А.А., Акимов А.В., Семин О.А. Исследование структуры ячеистых бетонов на основе статистического метода анализа неоднородности изображения // Научное обозрение. 2014. № 11. С. 37–41. EDN: TJXMUL
10. Адилходжаев А.И., Шаумаров С.С. Структурно-имитационное моделирование макроструктуры лёгких бетонов для наружных ограждающих конструкций железнодорожных зданий // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2020. Т. 10, № 1. С. 43–52. <https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-43-52>
11. Sun D., Yin F., Deng Y., Liu K., Tang J., Shen C., Sun Y., Wang A., Huang N., Hu C. Utilization of Carbide Slag in Autoclaved Aerated Concrete (CS-AAC) and Optimization: Foaming, Hydration Process, and Physic-Mechanical Properties // Case Studies in Construction Materials. 2023. Vol. 19. Art. e02354. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02354>
12. Мартыненко В.А. Влияние характеристик межпоровой перегородки на физико-технические свойства ячеистого бетона // Строительные материалы и изделия. 2003. № 4(18). С. 35–37.
13. Feng W., Li Z., Long Q., Tang S., Zhao Y. Study on the Properties of Autoclaved Aerated Concrete with High Content Concrete Slurry Waste // Developments in the Built Environment. 2024. Vol. 17. Art. 100338. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100338>

14. Вылегжанин В.П., Пинскер В.А. Влияние пористости автоклавного газобетона на его теплопроводность и пути ее изменения за счет совершенствования подбора сырьевых компонентов // *Строительные материалы*. 2019. № 8. С. 36–38. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-36-38>
15. Жуков А.Д., Чугунков А.В., Гудков П.К. Геометрическая модель ячеистого бетона и прогнозирование его свойств // *Научно-практический Интернет-журнал «Наука. Строительство. Образование»*. 2012. Вып. 2.
16. Michellini E., Ferretti D., Miccoli L., Parisi F. Autoclaved aerated concrete masonry for energy efficient buildings: State of the art and future developments // *Construction and Building Materials*. 2023. № 402. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132996>

## REFERENCES

1. Martynenko V., Morozova N. Handbook of the Laboratory Specialist of the Plant for the Production of Aerated Concrete Products. Dnepropetrovsk, PGASA Publ., 2009. 308 p.
2. Miryuk O. Formation of Cellular Concrete Structure. Rudnensky Industrial Institute. Rudny, 2015. 210 p.
3. Suleymanova L. Management of the Process of Formation of the Porous Structure of Cellular Concrete. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 2016, no. 2, pp. 69–76. (In Russ.).
4. Shmitko E.I., Rezanov A.A., Bedarev A.A. Multiparameter Structure Optimization of the Cellular Silicate Concrete. *Magazine of Civil Engineering*, 2013, no. 3, pp. 15–23. (In Russ.). <https://doi.org/10.5862/MCE.38.2>
5. Nelyubova V.V. Evolution of Approaches to Design of Autoclave Hardening Materials. *Construction Materials*, 2019, no. 1–2, pp. 88–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-88-99>
6. Baranov A., Novikov S., Akulova M., Mukovnin N. Patent 2804062, Russian Federation, IPC C04B 40/00, C04B 38/02, C04B 28/04, C04B 18/04. Method of Using Reverse Sludge to Obtain a Raw Mixture in the Production of Autoclaved Cellular Concrete, No. 2023101010; appl. 18.01.2023; publ. 26.09.2023. (In Russ.).
7. Baranov A., Shanin A., Akulova M. Properties of the Modified Silica Component – a Promising Raw Material in the Production of Aerated Concrete. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 2023, vol. 8, no. 7, pp. 8–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2023-8-7-8-16>
8. Lotov V., Mitina N. Regulation of Rheological Properties of Aerated Concrete Mixture with Various Additives. *Construction Materials*, 2002, no. 10, pp. 12–15. (In Russ.).
9. Aloyan R.M., Ovchinnikov A.A., Akimov A.V., Semin O.A. Study of the Structure of Cellular Concretes on the Basis of the Statistical Method of Image Heterogeneity Analysis. *Scientific Review*, 2014, no. 11, pp. 37–41. (In Russ.).
10. Adilhodzaev A.I., Shaumarov S.S. Structural and Simulation Modeling of Machine Structure of Light Concrete for External Protecting Constructions of Railway Buildings. *Modern Problems of Russian Transport Complex*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 43–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-43-52>
11. Sun D., Yin F., Deng Y., Liu K., Tang J., Shen C., Sun Y., Wang A., Huang N., Hu C. Utilization of Carbide Slag in Autoclaved Aerated Concrete (CS-AAC) and Optimization: Foaming, Hydration Process, and Physic-Mechanical Properties. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, vol. 19, art. e02354. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02354>
12. Martynenko V.A. Influence of the Characteristics of the Interpore Partition on the Physical and Technical Properties of Cellular Concrete. *Construction Materials and Products*, 2003, vol. 4, no. 18, pp. 35–37. (In Russ.).
13. Feng W., Li Z., Long Q., Tang S., Zhao Y. Study on the Properties of Autoclaved Aerated Concrete with High Content Concrete Slurry Waste. *Developments in the Built Environment*, 2024, vol. 17, art. 100338. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100338>
14. Vylegzhanin V.P., Pinsker V.A. Influence of Porosity of Autoclaved Gas Concrete on Its Thermal Conductivity and Ways of Its Change due to Improvement in Selection of Raw Components. *Construction materials*, 2019, no. 8, pp. 36–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-36-38>
15. Zhukov A.D., Chugunkov A.V., Gudkov P.K. Geometrical model and forecasting properties of foam mortar. *Science, construction, education*, 2012, no. 2. (In Russ.).
16. Michellini E., Ferretti D., Miccoli L., Parisi F. Autoclaved Aerated Concrete Masonry for Energy Efficient Buildings: State of the Art and Future Developments. *Construction and Building Materials*, 2023, vol. 402, art. 132996. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132996>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Баранов Александр Алексеевич** – главный технолог, ООО ПК «Куби Блок Егорьевский», Егорьевск, Российская Федерация, baranov.gazobeton@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7358-5711>

**Aleksandr A. Baranov**, Chief Technologist, LLC PC “Cubi Block Yegoryevsky”, Yegoryevsk, Russian Federation, baranov.gazobeton@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7358-5711>

**Шанин Александр Олегович** – ведущий инженер-технолог, ООО ПК «Куби Блок Егорьевский», Егорьевск, Российская Федерация, shanin.a@cubi-block.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5435-0087>

**Aleksandr O. Shanin**, Leading Process Engineer, LLC PC «Cubi Block Yegoryevsky», Yegoryevsk, Russian Federation, shanin.a@cubi-block.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5435-0087>

Статья поступила в редакцию / Received: 29.01.2024.

Доработана после рецензирования / Revised: 16.02.2024.

Принята к публикации / Accepted: 10.06.2024.