



К. С. ГАЛИЦКОВ  
М. Н. БАРАНОВА  
А. С. БОЛХОВЕЦКИЙ

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТАВА ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА НА ВНУТРЕННЕЕ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЕ В ПРОЦЕССЕ ЕГО АВТОКЛАВНОЙ ОБРАБОТКИ

RESEARCHING OF THE INFLUENCE OF THE STRUCTURAL-PHASE COMPOSITION  
OF CELLULAR CONCRETE ON THE INTERNAL HEAT RELEASE IN THE PROCESS  
OF ITS AUTOCLAVE TREATMENT

*Рассматриваются вопросы влияния фазового состава ячеистого бетона на величину внутреннего тепловыделения при образовании гидросиликатов в его структуре. Проведен рентгенофазовый анализ, электромикроскопия и петрография образцов ячеистого бетона, отобранных из разных частей массива. На основании полученных данных произведена качественная и количественная оценка их фазового состава. Определены границы отклонения количества тоберморита по объему исследуемого ячеисто-бетонного массива. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов в рамках данного исследования.*

**Ключевые слова:** тоберморит, ксонотлит, рентгенофазовый анализ, электронная микроскопия, петрография, ячеистый бетон, автоклавная обработка, автоматизация

В строительной отрасли широкое применение находят ячеисто-бетонные изделия автоклавного твердения. Получение такого рода прочных и легких пористых бетонов сопряжено с высокими энергозатратами [1], а также с трудностями идентификации теплофизических процессов [2], протекающих при изготовлении данного вида строительных материалов.

Известно, что технология производства (литьевая или ударная) оказывает существенное влияние на фазовый состав ячеистого бетона [3] и, в том числе, на формирование

*The questions of the influence of the phase composition of cellular concrete on the value of internal heat release during the formation of hydrosilicates in its structure are considered. X-ray phase analysis, electromicroscopy and petrography of cellular concrete samples taken from different parts of the massif were carried out. Based on the data obtained, a qualitative and quantitative assessment of their phase composition was made. The limits of the deviation of the amount of tobermorite in terms of the volume of the studied cellular concrete mass were determined. A comparative analysis of the results obtained within the framework of this study was carried out.*

**Keywords:** tobermorite, xonotlite, x-ray phase analysis, electron microscopy, petrography, cellular concrete, autoclave treatment, automation

оптимального соотношения прочностно-плотностных характеристик готовой продукции. В частности, в процессе автоклавной обработки при определенных начальных условиях происходит синтез гидросиликатов кальция при кристаллизации тоберморита и ксонотлита в структуре ячеистого бетона, причем количественное соотношение, равномерность распределения фаз и характер пористой структуры определяют конечные показатели прочности готовой продукции, а также влияют на динамику изменения температуры во внутренней среде автоклава [2].

Поэтому исследования, направленные на анализ структурно-фазового состава ячеистого бетона, в том числе на идентификацию физико-химических процессов, протекающих при его автоклавной обработке с целью получения удобных для инженерной практики моделей, актуальны.

Исследования проводились в лаборатории рентгеновской дифрактометрии, электронной и зондовой микроскопии СамГТУ на примере продукции завода газосиликатных изделий «Теплон» (г. Ульяновск), производимой по ударной технологии.

Образцы ячеистого бетона плотностью D500 и размерностью 100x100x100 мм были отобраны и выпилены в соответствии с требованиями «ГОСТ 12852.00-77» с поверхности (I) и внутренней части (II) готового изделия, а также из нижней части блока (III), где наблюдается распространенная в практике производства ячеисто-бетонных изделий зона потемнения бетона. Следует отметить, что первые попытки объяснить появление зон потемнения выполнены М.В. Кафтаевой в работе [3]. Установлено, что образцы в зонах потемнения серо-черного цвета имеют меньшую прочность, чем контрольные, однако предположение о причине появления зон потемнения, связанной с недостаточной степенью вакуумирования на этапе автоклавной обработки, проверить не представлялось возможным. Следовательно, можно сделать вывод, что в зонах потемнения бетон должен оставаться несозревшим и после автоклавной обработки, с характерным для него оттенком серо-зеленого цвета, что не соответствует действительности.

Попадание в состав смеси остатков смазочных материалов для форм вместе с обратным шламом может также являться причиной появления на поверхности материала зон потемнения. В процессе автоклавной обработки на этапах продувки и вакуумирования происходит частичное удаление попавших с обратным шламом органических примесей из объема массива, а оставшаяся органика в зоне примыкания бетона к металлическому поддону при термическом воздействии темнеет, образуя характерные пятна. Для верификации высказанных предположений требуется провести химический качественный анализ проб материала, отобранного из зон потемнения, на наличие посторонних веществ, что не является целью статьи. В рамках данного исследования будет рассматриваться только отклонение величины содержания гидросиликатных фаз в указанной зоне по сравнению с внутренней и поверхностной частями испытуемых проб материала.

Электронное сканирование проводилось с помощью электронного микроскопа JSM-6390A фирмы «Jeol» при увеличении от 30 до 2500 крат для каждого из представленных образцов. В результате получены снимки (рис. 1), анализ которых позволяет сделать следующие выводы.

Средний размер макропор, определенный по снимкам с увеличением в 30 раз, составляет около 650-1000 мкм, а равномерность пористой структуры сходна во всех трех образцах. При увеличении в 1000 раз на образце I, взятом с поверхности массива, заметна характерная кристаллическая структура с явно выраженными центрами кристаллизации. В образцах II и III кристаллическая структура выражена неявно, однако соответствует данным, опубликованным в работах [3, 6].

Фазовый состав образцов ячеистого бетона, изготовленного по ударной технологии, выполнен методом рентгенографического анализа на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA фирмы «Thermo Fisher Scientific». Результаты рентгенографического анализа (РФА) образцов I-III представлены на дифрактограммах (рис. 2). Анализ результатов показывает, что каждому минералу, т. е. каждой кристаллической решетке, соответствует собственная характерная дифрактограмма. Однако необходимо заметить, что аморфные тела дифрактограмм не дают.

На представленных дифрактограммах указаны характерные пики в 1,82-1,86 Å, 11,3-11,4 Å, и 2,8 Å, 3,07-3,08 Å, принадлежащие тоберморитовой и ксонотлитновой фазам соответственно [5, 6]. Наиболее выраженный пик в 3,357 Å принадлежит кварцу, а небольшой пик 5,47-5,5 Å – гидроалюминатным соединениям. Пик 4,27 Å может соответствовать как кварцу, так и ксонотлиту [6].

Полученные дифрактограммы имеют характерные для ячеистого бетона пики при соответствующих углах гониометра, что также соответствует данным, представленным в работах М.В. Кафтаевой для ячеистого бетона, изготовленного по литьевой технологии [3,6], однако необходимо отметить, что интенсивность пиков, представленных на рис. 2, имеет некоторые отличия от результатов, представленных в работе [6].

Количественная оценка фаз, входящих в состав исследуемых образцов, как правило, производится либо путем оценки относительной интенсивности и ширины пиков на графиках РФА, или с применением рентгеновского микроанализатора или петрографии. Для количественной оценки кристаллической и аморфной фаз в исследуемых авторами образцах

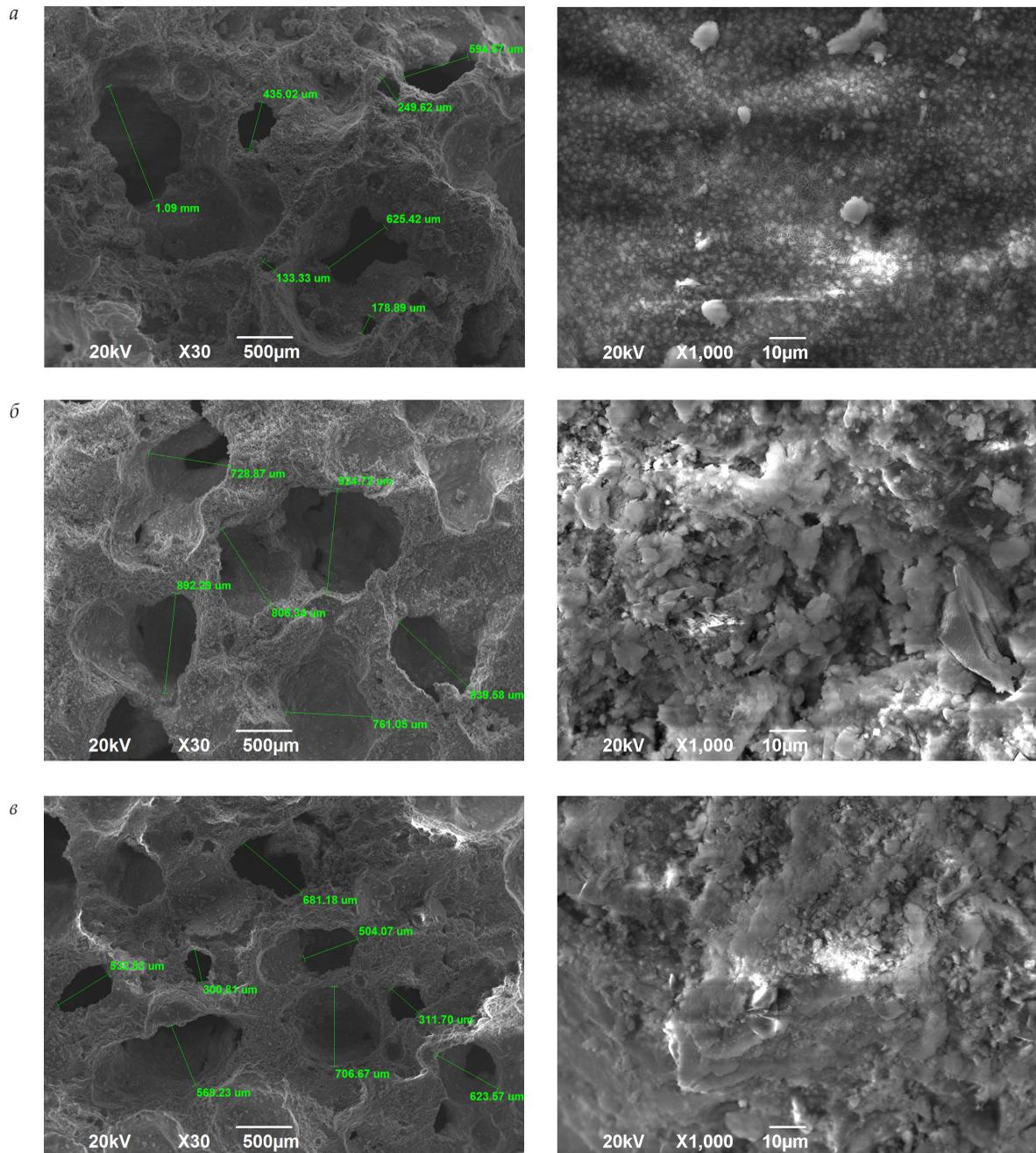


Рис. 1. Электронная микроскопия исследуемых образцов:  
*a* – образец I (с поверхности); *б* – образец II (с внутренней части); *в* – образец III (с нижней части)

выполнено петрографическое исследование по методике, разработанной А.П. Ананьевым и А.Д. Потаповым [7].

Микроскопические исследования выполнены на поляризационном микроскопе МИН-8 с рабочим увеличением 25-56 крат на предварительно подготовленных образцах в виде плоских сколов и порошковых препаратов, путем их растирания в фарфоровой ступке.

Метод заключается в подсчете количества кристаллов и стекломассы. В проходящем свете микроскопа все зерна подготовленной пробы имеют серый цвет. При включенном анализаторе и поляризаторе (в скрещенных николях) просвечивают кристаллические образования, а стекломасса становится черной (рис. 3). При подсчете зерен кристаллические образования составляют около 8-10 % от общего

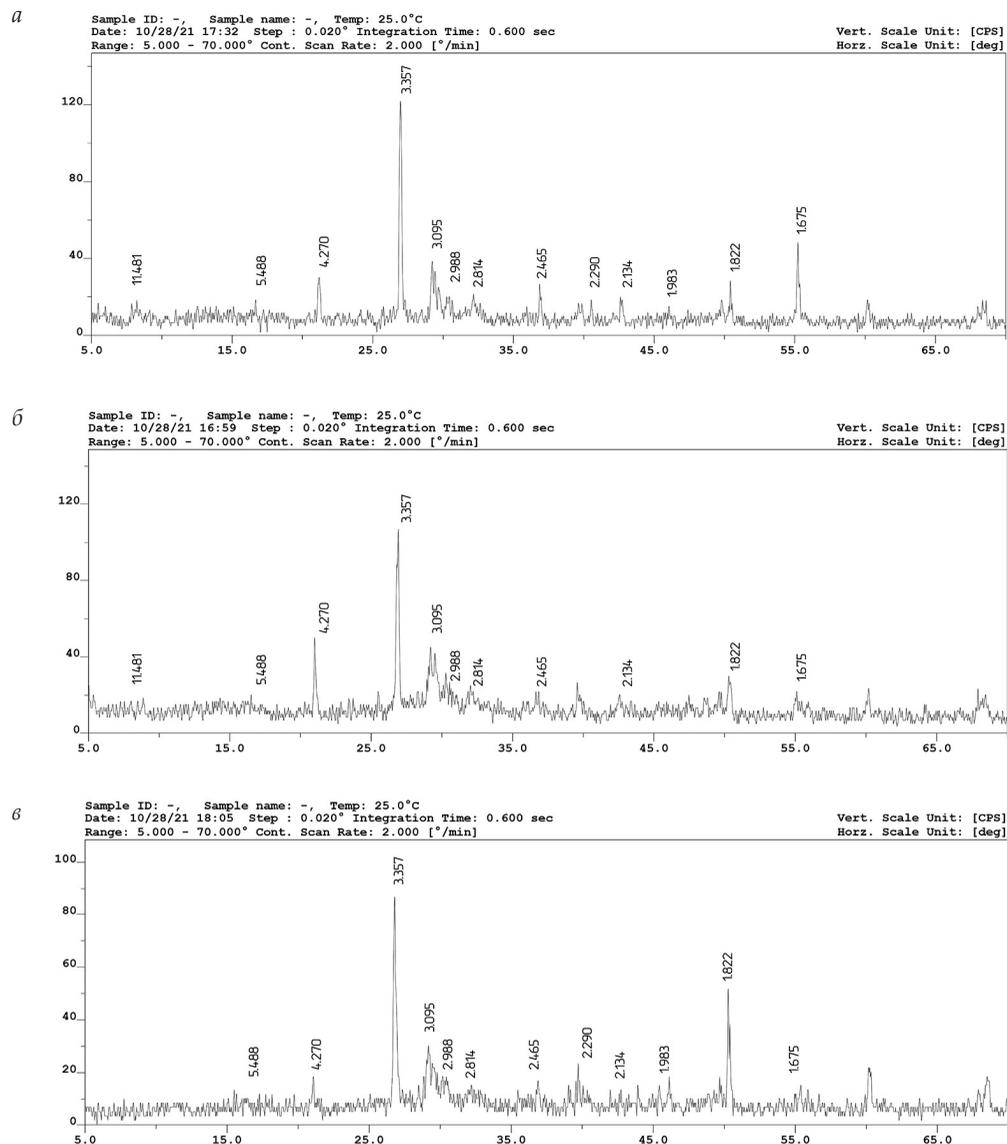


Рис. 2. Дифрактограмма образцов ячеистого бетона:

*a* – образец I (с поверхности); *б* – образец II (с внутренней части); *в* – образец III (с нижней части)

объема исследуемого препарата, причем минимальная величина содержания кристаллической фазы соответствует образцу, отображенному из зоны массива ячеистого бетона, имеющего описанное ранее потемнение. Полученные результаты не противоречат известным данным.

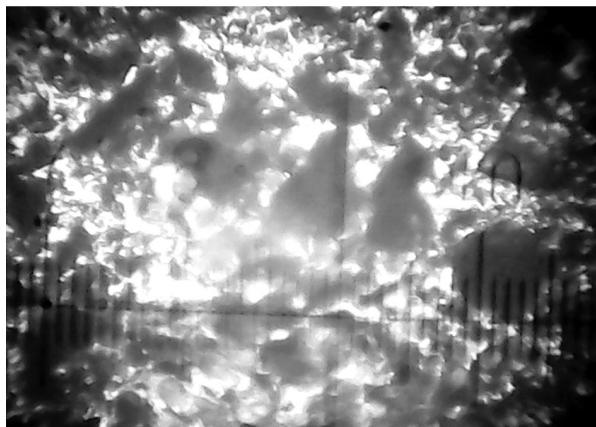
В результате проведенного рентгенографического исследования и петрографии определен фазовый состав и дана количественная оценка тоберморитовой фазы в структуре исследуемого ячеистого бетона, изготовленного по ударной технологии.

Сравнительный анализ исследований с результатами, полученными в [3,6] для ячеистого бетона, изготовленного по литевой техноло-

гии, показал удовлетворительное совпадение наличия тоберморитовой фазы в автоклавном бетоне.

Количественная оценка содержания кристаллических фаз показывает вариативность степени кристаллизации в пределах 8-10 % для исследуемых образцов и 12 % для автоклавного бетона, изготовленного по литевой технологии. В результате, для дальнейших исследований влияния внутреннего тепловыделения с учетом известной энтальпии при образовании тоберморита в структуре автоклавируемых изделий [2], степень кристаллизации может рассматриваться в виде величины, параметры которой изменяются в известных границах от

а



б

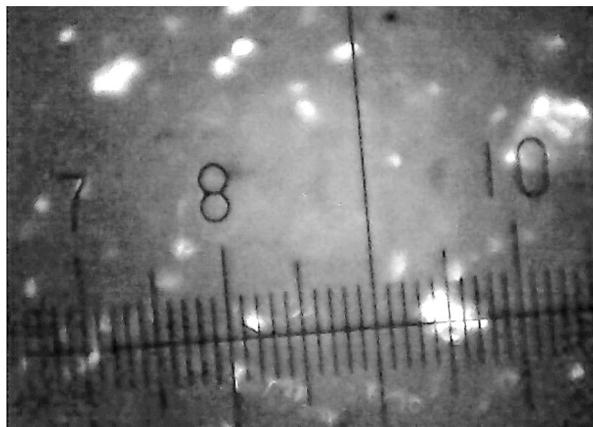


Рис. 3. Образец ячеистого бетона: а – в проходящем свете микроскопа; б – в скрещенных николях

8 до 12 %. Это позволит определить границы отклонения величины внутреннего тепловыделения и учесть ее в форме возмущающего воздействия при исследовании динамики температурного поля внутри массива ячеистого бетона в процессе автоклавной обработки и дальнейшем синтезе системы автоматического управления процессом автоклавной обработки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Галицков С.Я., Фадеев А.С. Оценка снижения энергозатрат на производство керамзита при использовании алгоритма согласованного управления печью // Градостроительство и архитектура. 2013. № 4(12). С. 95–98.
2. Галицков С.Я., Михелькевич В.Н., Болховецкий А.С. Идентификация тепловыделения при автоклавировании ячеистого бетона // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XVIII Международной конференции. Самара: Офорт, 2016. С. 347–350.
3. Кафтаева М.В., Рахимбаев И.Ш. Тепловыделение при синтезе гидросиликатной связки автоклавного газобетона // International journal of applied and fundamental research. 2013. № 10. С. 373–376.
4. Кафтаева М.В. Теоретическое обоснование совершенствования автоклавной технологии производства энергоэффективных газосиликатов: автореф. дис. ... доктора технических наук / Белгород. гос. техн. ун-т им. В.Г. Шухова. Белгород, 2014. 300 с.
5. Фекличев В.Г. Диагностические константы минералов: справочник. М.: Недра, 1989. 479 с.
6. Кафтаева М.В., Рахимбаев Ш.М., Поспелова Е.А. Исследование фазового состава автоклавных ячеистых бетонов // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. С. 12–15.
7. Ананьев А.П., Потопов А.Д. Основа геологии, минералогии и петрографии. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2008. 400 с.

#### REFERENCES

1. Galitskov S.Ya., Fadeev A.S. Assessment of reduction of power consumption for the production of expanded clay using the algorithm of coordinated control of the furnace. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Planning and Architecture], 2013, no.4, pp. 95–98. (In Russian)
2. Galitskov S.Ya., Mikhelkevich V.N., Bolkhovetsky A.S. Identification of heat release during autoclaving of cellular concrete. *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemah: Trudy XVIII Mezhdunarodnoy konferencii* [Problems of management and modeling in complex systems: Proceedings of the XVIII International Conference]. Samara, Ofort, 2016, pp. 347–350. (In Russian).
3. Kaftaeva M.V., Rakhimbaev I.Sh. Heat dissipation during synthesis of hydrosilicate bundle of autoclave aerated concrete. *International journal of applied and fundamental research*, 2013, no.10, pp. 373–376.
4. Kaftaeva M.V. *Teoreticheskoe obosnovanie sovershenstvovaniya avtoklavnoj tehnologii proizvodstva jenergojeffektivnykh gazosilikatov*. Avtoref. Doct. Diss. [Theoretical Justification for Improving Autoclave Technology for the Production of Energy-Efficient Gas Silicates. Avtoref. Doct. Diss.]. Belgorod, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova, 2014. 300 p. (In Russian)
5. Feklichev V.G. *Diagnosticheskie konstanty mineralov: spravochnik* [Diagnostic constants of minerals: reference book]. Moscow, Nedra, 1989. 479 p.
6. Kaftaeva M.V., Rakhimbaev S.M., Pospelova E.A. Phase composition study of autoclave cellular concretes. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2013, no.5, pp. 12–15. (In Russian)
7. Ananyev A.P., Potapov A.D. *Osnova geologii, mineralologii i petrografii. 3-e izd., pererab. i dop.* [Basis of geology, mineralogy and petrography. 3rd ed., Rev. and add.]. Moscow, Higher schoolb 2008. 400 p.

Об авторах:

**ГАЛИЦКОВ Константин Станиславович**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой механизации, автоматизации и энергоснабжения строительства Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: maes@samgtu.ru

**БАРАНОВА Маргарита Николаевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры строительной механики, инженерной геологии, оснований и фундаментов Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: mnbaranova@yandex.ru

**БОЛХОВЕЦКИЙ Андрей Сергеевич**

заведующий лабораторией, преподаватель кафедры механизации, автоматизации и энергоснабжения строительства Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: a.bolkhovetskiy@gmail.com

**GALITSKOV Konstantin S.**

PhD in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Mechanization, Automation and Energy Supply of Construction Chair Samara State Technical University Academy of Civil Engineering and Architecture 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: maes@samgtu.ru

**BARANOVA Margarita N.**

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Structural Mechanics, Structural mechanics, Engineering Geology, Bases and Foundations Chair Samara State Technical University Academy of Civil Engineering and Architecture 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: mnbaranova@yandex.ru

**BOLKHOVETSKIY Andrey S.**

Head of The Laboratory of The Department, Lecturer of Mechanization, Automation and Energy Supply of Construction Chair Samara State Technical University Academy of Civil Engineering and Architecture 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: a.bolkhovetskiy@gmail.com

Для цитирования: Галицков К.С., Баранова М.Н., Болховецкий А.С. Исследование влияния структурно-фазового состава ячеистого бетона на внутреннее тепловыделение в процессе его автоклавной обработки // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13, № 2. С. 73–78. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.02.10.

For citation: Galitkov K.S., Baranova M.N., Bolkhovetskiy A.S. Researching of the Influence of the Structural-Phase Composition of Cellular Concrete on the Internal Heat Release in the Process of its Autoclave Treatment. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2023, vol. 13, no. 2, pp. 73–78. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2023.02.10.