

Научная статья

УДК 691.54: 666.973.6

ВЛИЯНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ДОБАВКИ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ГРАФЕНА И ЛИГНОСУЛЬФОНАТА НА ВОДОПОГЛОЩЕНИЕ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА

Д. З. М. Альджабуи¹, И. В. Буракова^{1*}, А. Е. Бураков¹, Р. Д. Слдозьян², А. Г. Ткачев¹

¹Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

²Технологический университет, Багдад, Ирак

ИНФОРМАЦИЯ

История статьи:

Поступила 21.12.2023

Одобрена 22.01.2024

Принята 5.02.2024

Ключевые слова:

неавтоклавный газобетон, портландцемент, оксид графена, лигносульфонат, кристаллообразование в растворе, кристаллические фазы, теплопроводность, водопоглощение.

АННОТАЦИЯ

Проведена оценка влияния внесения в состав неавтоклавного газобетона (НАГ) различных модификаторов: оксида графена (ОГ) в виде водной суспензии, лигносульфоната (ЛС) и комплексной добавки ОГ/ЛС. В рамках исследования формовали образцы газоблоков, содержащие ОГ – 0,0001 %, 0,0002 %, 0,003 %; ЛС – 0,032 %, 0,16 %, 0,32 % от массы цемента и их различные комбинации. Испытания по теплопроводности и водопоглощению проводились для образцов стандартного и модифицированного НАГ в возрасте 28 дней. Результаты исследований подтвердили положительный эффект снижения показателей теплопроводности и водопоглощения, варьирующийся в зависимости от количества и типа добавки. При внесении ЛС наблюдается сокращение водопоглощения на 12–34 %, ОГ – 30–50 %, ОГ/ЛС (0,0002/0,16 мас. %) – 63 %. Величина коэффициента теплопроводности НАГ, модифицированного ЛС, уменьшается на 6–12 %, ОГ – 14–18 %, ОГ/ЛС (0,0002/0,16 мас. %) – 29 %. Предполагается, что в результате внесения комплексного наномодификатора ОГ/ЛС увеличивается степень кристалличности и однородность, а также изменяется состав и размер минеральных новообразований цементного камня. Таким образом, путем изменения структуры силикатной матрицы за счет введения разработанной автоклами модифицирующей добавки достигается улучшение эксплуатационных свойств теплоизоляционного ячеистого бетона.

DOI:

10.18083/LCAppl.2024.1.69

Для цитирования:

Альджабуи Д. З. М., Буракова И. В., Бураков А. Е., Слдозьян Р. Д., Ткачев А. Г. Влияние наноструктурированной добавки на основе оксида графена и лигносульфоната на водопоглощение и теплопроводность неавтоклавного газобетона // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2024. Т. 24, № 1. С. 69–76.

*Адрес для переписки: iris_tamb68@mail.ru

© Альджабуи Д. З. М., Буракова И. В., Бураков А. Е., Слдозьян Р. Д., Ткачев А. Г., 2024

Original Article**EFFECT OF NANOSTRUCTURED ADDITIVE BASED ON GRAPHENE OXIDE AND LIGNOSULPHONATE ON WATER ABSORPTION AND THERMAL CONDUCTIVITY OF NON-AUTOCLAVED AERATED CONCRETE**

D. Z. M. Aljaboobi¹, I. V. Burakova^{1*}, A. E. Burakov¹, R. J. Sldozian², A. G. Tkachev¹

¹Tambov State Technical University, Tambov, Russia

²University of Technology, Baghdad, Iraq

ARTICLE INFO:**Article history:**

Received 21 December 2023

Approved 22 January 2024

Accepted 5 February 2024

Key words:

non-autoclaved aerated concrete,
Portland cement,
graphene oxide,
lignosulfonate,
crystal formation in solution,
crystalline phases,
thermal conductivity,
water absorption

ABSTRACT

The assessment of the effect of various modifiers introduced into the composition of non-autoclaved aerated concrete (NAC) was made. The modifiers were graphene oxide (GO) in the form of an aqueous suspension, lignosulfonate (LS) and a complex GO/LS additive. The samples of gas blocks containing GO – 0.0001, 0.0002, 0.003 wt. %; LS – 0.032, 0.16, 0.32 wt. % by weight of cement and their various combinations were molded. Thermal conductivity and water absorption tests were carried out on the samples of standard and modified NAC aged for 28 days. The research results confirmed the positive effect of reducing thermal conductivity and water absorption, which varied depending on the amount and type of additive. After the addition of LS, GO and GO/LS (0.0002/0.16 wt. %) modifiers, there was a corresponding reduction in water absorption by 12–34 %, 30–50 % and 63 %, respectively, and a decrease in the thermal conductivity coefficient by 6–12 %, 14–18 %, and 29 %, respectively. It is assumed that the introduction of the complex nanomodifier GO/LS increases the degree of crystallinity and homogeneity, as well as changes the composition and size of mineral neoformations of cement stone. Consequently, by changing the structure of silicate matrix through the addition of a modifier developed by the authors, an improvement in the performance properties of thermal insulating cellular concrete was achieved.

DOI:

10.18083/LCAppl.2024.1.69

For citation:

Aljaboobi D. Z. M., Burakova I. V., Burakov A. E., Sldozian R. J., Tkachev A. G. Effect of nanostructured additive based on graphene oxide and lignosulphonate on water absorption and thermal conductivity of non-autoclaved aerated concrete. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2024, **24** (1), 69–76 (in Russ.).

*Corresponding author: iris_tamb68@mail.ru

© Aljaboobi D. Z. M., Burakova I. V., Burakov A. E., Sldozian R. J., Tkachev A. G., 2024

Введение

Следуя стратегиям экологичности и устойчивого развития, необходимо вести поиск эффективных решений для повышения энергоэффективности и сокращения выбросов углекислого газа при строительстве специальных и бытовых конструкций. Затраты на отопление и охлаждение здания являются основной частью эксплуатационных расходов в течение жизненного цикла здания, а также одним из основных источников выбросов углекислого газа [1]. Следовательно, отличные изоляционные строительные материалы считаются важными при проектировании и строительстве различных зданий.

Газобетон (ГБ) является одним из наиболее широко используемых специальных видов бетона и представляет собой вспененный материал малой плотности и, как следствие, низкой прочности. Обычно он изготавливается из связующих веществ (цемента и извести), дополнительного вяжущего материала, богатого кремнеземом (шлак, летучая зола или микрокремнезем), мелкого заполнителя (кремнезема и кварцевого минерального заполнителя), расширяющего агента-порообразователя (алюминиевого порошка (Al)), и воды [2, 3]. Однако его состав и пропорции смеси могут варьироваться и зависят от области конкретного применения. Например, для ГБ, который сочетает в себе изоляционные и структурные конструкционные возможности, используемые для стен или крыш, может потребоваться большее количество связующего и кремнеземного компонента, чем только для элементов изоляции. По способу производства различают автоклавный газобетон (АГ) и неавтоклавный газобетон (НАГ). Производство НАГ не требует среды насыщенного пара под давлением, что дорого и требует больших энергозатрат, поэтому для многих применений НАГ предпочтителен [4, 5].

НАГ представляет собой двухфазный материал, имеющий связанную систему из бетонной матрицы и содержащегося в ней воздуха. На стадии смешения компонентов минералы выпадают из насыщенного раствора в виде кристаллов различной формы, образуя с течением времени пространственный «армирующий» гель. Одной из наиболее важных особенностей ГБ является его пористая структура. Пористый объем образуется в результате химической реакции между порошком Al (расширяющим агентом) и щелочами в цементирующих смесях, в результате которой образуется газо-

образный водород, формирующий макропоры. Эта химическая реакция образует миллионы равномерно распределенных воздушных пустот одинакового размера, заключенных в бетонной матрице. Пористость обычных классов ГБ находится в пределах 75–90 % [3]. Благодаря этому ГБ имеет низкую теплопроводность (λ) от 0,15 до 0,20 Вт/м·К, малую плотность в сухом состоянии от 240 до 1900 кг/м³ и низкую прочность на сжатие от 2,5 до 10 МПа [6, 7]. Величина теплопроводности зависит от средней плотности пенобетона, его структуры (размера и характера пор) и влажности. Способ твердения и влажность бетона также влияют на тепловые свойства бетона. Более того, Ким и др. [8] сообщили, что основными термическими факторами, влияющими на значения λ бетона, были объемная доля заполнителя, соотношение воды и связующего (В/Ц), тип добавки (модификатора) и влажность образца бетона.

Нарайанан и Рамамурти [9] писали, что увеличение влажности на 1 % по массе увеличивает теплопроводность ГБ на 42 %. Джин и др. [10] проанализировали влияние содержания влаги на теплопроводность газобетона, используя для моделирования метод переходного плоского источника. Они пришли к выводу, что более высокое значение содержания влаги и более низкое значение пористости привело к более высокому значению λ . Джерман и др. [11] исследовали гигроскопические, термические и долговечные свойства АГ. В результате исследований авторы установили, что теплопроводность АГ возрастает с увеличением влажности. Таким образом, авторы сообщили, что содержание влаги является ключевым фактором, влияющим на теплопроводность ГБ, и более высокое значение содержания влаги приводит к более высокой теплопроводности. Вода в порах газобетона увеличивает его теплопроводность, поскольку $\lambda_{\text{воды}}$ в 25 раз превышает $\lambda_{\text{воздух}}$ ($\lambda_{\text{воды}} = 0,569$ Вт/(м·К), $\lambda_{\text{воздух}} = 0,023$ Вт/(м·К)).

Авторами данного исследования предложено для производства теплоизоляционного газобетона неавтоклавного твердения использовать технологию с применением высокотехнологичного наноструктурного материала, являющегося функциональным агентом. В качестве модификатора цементной матрицы неавтоклавного газобетона предложена комплексная добавка на основе суспензии оксида графена и пластифицирующего вяжущего – лигносульфоната. Наномодифицирующая добавка вводилась на стадии смешения исходных компо-

нентов бетонной смеси [12, 13]. Использование подобного комплексного подхода формирования состава модификаторов позволяет рассчитывать на проявление синергетического эффекта при реализации положительных свойств каждого компонента состава.

Применение в качестве модификатора цементных композитов различных графеновых материалов (оксид графена (ОГ), углеродных нанотрубок (УНТ) и т.п.) для структурирования силикатных матриц показывает улучшение качественных показателей бетонных изделий [14–17]. Однако в настоящее время использование графеновых наноматериалов, производимых в промышленных масштабах для такой крупнотоннажной отрасли, как строительство, является излишне дорогостоящим и труднореализуемым. Решением данной проблемы может являться применение комплексных модифицирующих систем на основе графеновых структур. Еще одним из перспективных материалов подобного рода является лигносульфонат (ЛС) – один из самых популярных и бюджетных суперпластификаторов на мировом рынке. Лигносульфонаты, являющиеся побочными продуктами возобновляемого ресурса – древесной массы, экологичны, обладают доступностью и дешевизной, хорошей растворимостью в воде, нетоксичностью, достаточно высокими реологическими свойствами.

В настоящей работе авторы исследовали влияние комплексного модификатора на основе оксида графена и лигносульфоната, применяемого при изготовлении неавтоклавного газобетона, на важнейшие характеристики бетонных изделий – теплопроводность и водопоглощение, связанные между собой.

Эксперимент

Исходным сырьем для получения НАГ служили: портландцемент М500 (Палладиум, г. Жуковский, Россия), песок сухой ГОСТ 8736-2014, строительная гашеная карбонатно-известковая мука (ООО «СтройКомплект», г. Воронеж, Россия), алюминиевая пудра, водопроводная вода (соотношение вода/цемент составляло 0,4), лигносульфонат порошкообразный (ООО «АКВАХИМ», г. Казань, Россия), водная суспензия ОГ (1 % по сухому веществу) (производство ООО «НаноТехЦентр», г. Тамбов). Подробно методика получения ком-

плексной добавки ОГ/ЛС описана в [13]. Водопоглощение НАГ определяли по ГОСТ 12730.1–2020, 12730.3–2020. Для этого получали бетонные балки размером 40 × 40 × 160 мм. Для вычисления теплопроводности применяли ГОСТ 7076-99. Измерение коэффициента теплопроводности (λ) осуществляли с помощью измерителя ИТП-МГ4 (ООО «СКБ Стройприбор», г. Челябинск) (при стационарном тепловом режиме) на образцах размером 100 × 100 × 10 мм в воздушно-сухом состоянии. Для испытаний использовали образцы в возрасте 28 дней.

Результаты и их обсуждение

Для исследования водопоглощения и теплопроводности были получены образцы НАГ с модифицирующими добавками, указанными в таблице.

Таблица. Массовое содержание модифицирующих добавок неавтоклавного газобетона

Table. Mass content of modifying additives to non-autoclaved aerated concrete (NAC)

| Номер образца | Содержание ОГ, мас. % | Содержание ЛС, мас. % |
|---------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | – | – |
| 2 | 0,0001 | – |
| 3 | 0,0002 | – |
| 4 | 0,0003 | – |
| 5 | – | 0,032 |
| 6 | – | 0,16 |
| 7 | – | 0,32 |
| 8 | 0,0001 | 0,032 |
| 9 | 0,0001 | 0,16 |
| 10 | 0,0001 | 0,32 |
| 11 | 0,0002 | 0,032 |
| 12 | 0,0002 | 0,16 |
| 13 | 0,0002 | 0,32 |
| 14 | 0,0003 | 0,032 |
| 15 | 0,0003 | 0,16 |
| 16 | 0,0003 | 0,32 |

Результаты, полученные при реализации экспериментов по оценке водопоглощения образцов газобетона с различными составами внесенных добавок, представлены на рис. 1.

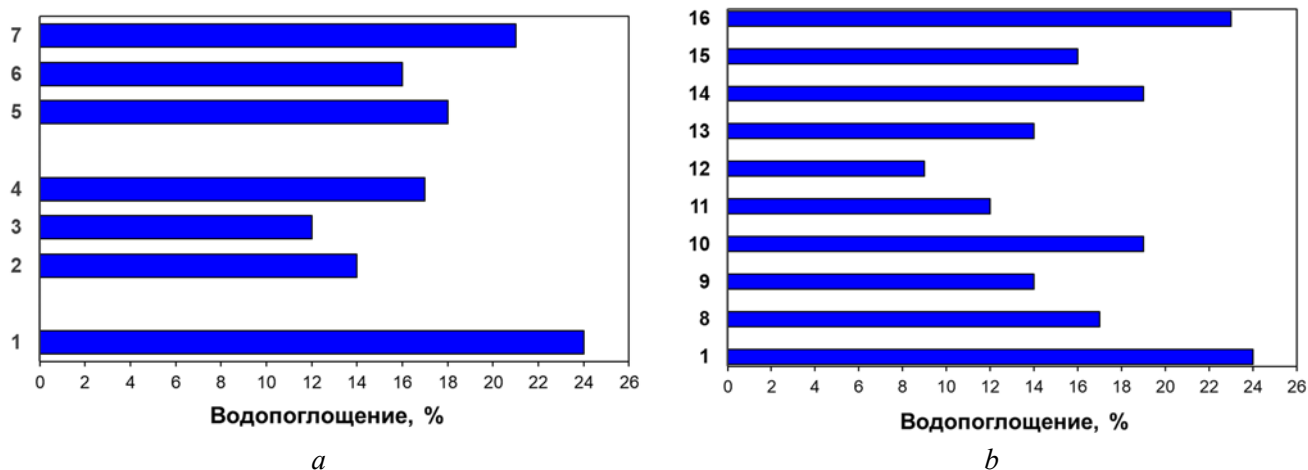


Рис. 1. Водопоглощение образцов НАГ: *a* – с содержанием в отдельности модифицирующей добавки ОГ и ЛС; *b* – с содержанием комплексной добавки. По оси Y указаны номера образцов по таблице

Fig. 1. Water absorption of NAC samples: *a* – containing separately the modifying additives GO and LS; *b* – with the content of a complex additive. The Y axis shows the sample numbers according to the table

Все модифицированные образцы демонстрируют снижение водопоглощения в сравнении с контрольным образцом стандартного состава газобетона (рис. 1). Однако более эффективными являются составы, содержащие комплексный состав добавки (состав № 12). Предположительно, это связано с механизмами влияния компонентов добавки, где ОГ и ЛС, представляющий собой водорастворимый анионный полимер на основе лигнина со значительным количеством функциональных групп на поверхности, оказывают структурообразующее воздействие, уплотняя межпоровые перегородки в процессе гидратации, а также формируя в газобетоне большее количество мелких замкнутых пор и делая структуру более однородной. С другой стороны, эти компоненты гидрофобизируют структуру бетонного камня, в том числе, адсорбируясь на поверхностях цементных частиц и минеральных новообразований [17]. Положительным фактором пониженного водопоглощения в материале можно рас-

сматривать улучшение его эксплуатационных характеристик, в частности, прочности на сжатие [12].

Установлено, что модифицирование образцов газобетона (состав № 12) неавтоклавного твердения позволяет добиться существенного снижения теплопроводности (рис. 2) – до 30 % по сравнению с контрольным образцом без добавок. Как известно, теплопроводность, прочность и плотность являются основными свойствами материала и напрямую зависят от количества пор, их распределения и прочности поровых перегородок [18]. Полученные результаты позволяют предполагать, что введение комплексной добавки ОГ/ЛС позволяет стабилизировать процесс структурообразования газобетона, формируя значительное количество однородно распределенных мелких закрытых пор, в результате чего существенно снижается плотность материала и происходит стабилизация реологических характеристик газобетона.

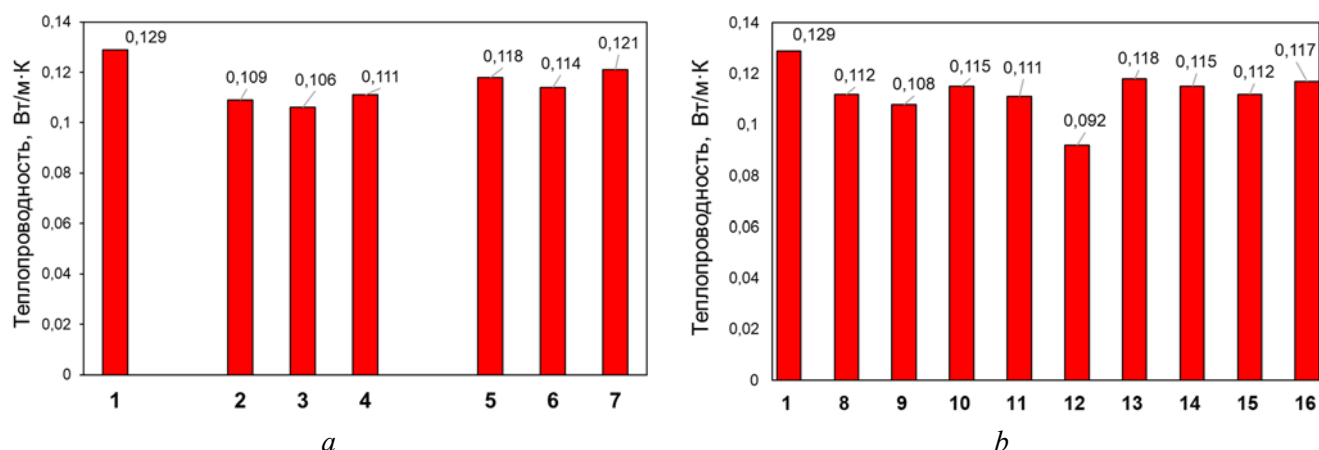


Рис. 2. Теплопроводность образцов НАГ: *a* – с содержанием в отдельности модифицирующей добавки ОГ и ЛС; *b* – с содержанием комплексной добавки. По оси X указаны номера образцов по таблице

Fig. 2. Thermal conductivity of NAC samples: *a* – containing separately the modifying additives GO and LS; *b* – with the content of a complex additive. The X axis shows the sample numbers according to the table

Вышеописанные данные по водопоглощению и теплопроводности хорошо коррелируются с ранее полученными результатами рентгеноструктурного и дифференциально-термического анализа образцов газобетона [13]. Согласно рентгеновским дифрактограммам, исходные и модифицированные образцы НАГ содержат кристаллические фазы кварца (β -SiO₂); тоберморита ($5\text{CaO} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$); гидрограната кальция ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2 \cdot (6-2x)\text{H}_2\text{O}$); ксонотлита ($6\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$); C-S-H(I); кальцита CaCO₃. Дифракционная картина наномодифицированного комплексной добавкой ОГ/ЛС газобетона показывает существенное увеличение интенсивностей отражений прежде всего тоберморита, ксонотлита и кальцита. Таким образом, доказана эффективность введения комплексной добавки ОГ/ЛС за счет положительного эффекта на структурообразование цементного камня и морфологию продуктов гидратации – кристаллических новообразований газосиликата, тем самым обеспечивая повышение прочности газобетона за счет упрочнения межпоровых перегородок.

Выводы

Для серии образцов неавтоклавного газобетона (модифицированных добавкой ЛС, ОГ, а также комплексной – ОГ/ЛС, и стандартного состава срав-

нения) определены значения водопоглощения и теплопроводности. Содержание ОГ в образцах составляло 0,0001 %, 0,0002 %, 0,003 %; ЛС – 0,032 %, 0,16 %, 0,32 % от массы цемента. Установлено, что введение в состав НАГ комплексной добавки ОГ/ЛС в соотношении 0,0002/0,16 % от массы вяжущего компонента позволяет достичь уменьшения водопоглощения до 63 % и теплопроводности до 29 % в сравнении с контрольным образцом. Таким образом, коэффициент теплопроводности для модифицированного добавкой ОГ/ЛС образца составляет 0,092 Вт/м·К, а величина водопоглощения – 9 %. Полученные результаты позволяют предполагать, что при внесении данной добавки в НАГ формируется более однородный по распределению пор каркас с меньшей структурной дефектностью и более плотным и прочным материалом межпоровых перегородок.

Благодарность: авторы выражают благодарность доцентам кафедры «Конструкции зданий и сооружений» Тамбовского государственного технического университета А. А. Мамонтову и С. А. Мамонтову за помощь в проведение экспериментальных исследований.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to the associate professors of the department "Designs of buildings and structures" of the Tambov State Technical University Mamontov A.A. and Mamontov S.A. for assistance in experimental studies.

Список источников / References

1. Tasdemir C., Sengul O., Tasdemir M. A. A comparative study on the thermal conductivities and mechanical properties of lightweight concretes. *Energy and Buildings*, 2017, **151**, 469–475. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.07.013.
2. Ropelewski L., Neufeld R. Thermal inertia properties of autoclaved aerated concrete. *Journal of Energy Engineering*, 1999, **125** (2), 59–75. DOI: 10.1061/(asce)0733-9402(1999)125:2(59).
3. Shrivastava A. Non-autoclaved aerated concrete (NAAC) blocks: an alternative building construction material. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 2017, **V(VIII)**, 808–812. DOI: 10.22214/ijraset.2017.8113.
4. Stel Makh S.A., Shcherban E.M., Beskopylny A.N., Mailyan L.R., Meskhi B., Beskopylny N., Dotsenko N.Y., Kotenko M. Influence of recipe factors on the structure and properties of non-autoclaved aerated concrete of increased strength. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2022, **12**, 6984. DOI: 10.3390/app12146984.
5. Shon C., Mukangali I., Zhang D., Ulykbanov A., Kim J. Evaluation of non-autoclaved aerated concrete for energy behaviors of a residential house in Nur-Sultan, Kazakhstan. *Buildings*, 2021, **11**, 610. DOI: 10.3390/buildings11120610.
6. Jones M.R., McCarthy A. Heat of hydration in foamed concrete: Effect of mix constituents and plastic density. *Cement and Concrete Research*, 2006, **36** (6), 1032–1041. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.01.011.
7. Ahmida F., Sayah G.M., Zineb D., Quéneudec-t'Kint M. Experimental study on the effect of lime and aluminium content on porosity, introduced porosity, compressive strength and thermal conductivity of a lightweight cellular concrete based on limestone sand. *Construction and Building Materials*, 2023, **392**, 131552. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131552.
8. Kim K.-H., Jeon S.-E., Kim J.-K., Yang S. An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement and Concrete Research*, 2002, **33** (3), 363–371. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00965-1.
9. Narayanan N., Ramamurthy K. Structure and properties of aerated concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 2000, **22** (5), 321–329. DOI: 10.1016/S0958-9465(00)00016-0.
10. Jin H.Q., Yao X.L., Fan L.W., Xu X., Yu Z.T. Experimental determination and fractal modeling of the effective thermal conductivity of autoclaved aerated concrete: Effects of moisture content. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, **92**, 589–602. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.103.
11. Jerman M., Keppert M., Výborný J., Černý R. Hygric, thermal and durability properties of autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*, 2013, **41**, 352–359. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.036.
12. Альджабуи Д. З. М., Буракова И. В., Бураков А. Е., Слдозян Р. Д., Ткачев А. Г. Получение неавтоклавного газобетона с введением оксида графена и пластифицирующей добавки // *Известия вузов. Строительство*. 2023. Т. 3, № 771. С. 52–60. [Aljaboobi D.Z.M., Burakova I.V., Burakov A.E., Sldozian R.J., Tkachev A.G. Production of non-autoclaved aerated concrete with graphene oxide and plasticizer additives. *News of Higher Educational Institutions. Construction*, 2023, **3**, 52–60 (in Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2023-771-3-52-60].
13. Aljaboobi D.Z.M., Burakova I.V., Burakov A.E., Yarkin V.O. Evaluation of the effect of a complex nanomodifying additive “lignosulfonate/graphene oxide” on the non-autoclaved aerated concrete hydration process. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 2023, **8** (4), 316–323. DOI: 10.17277/jamt.2023.04.pp.316-323.
14. Du S., Al Shareedah O., Wu J., Shi X. Nanotechnology in cement-based materials: A review of durability, modeling, and advanced characterization. *Nanomaterials*, 2019, **9** (9), 1213. DOI: 10.3390/nano9091213.
15. Tong T., Fan Z., Liu Q., Wang S., Tan S., Yu Q. Investigation of the effects of graphene and graphene oxide nanoplatelets on the micro- and macro-properties of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 2016, **106**, 102–114. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.092.
16. Sreeja K., Naresh Kumar T. Effect of graphene oxide on fresh, hardened and mechanical properties of cement mortar. *Materials Today: Proceedings*, 2021, **46**, 2235–2239. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.03.574.
17. Seddighi F., Pachideh G., Salimbahrami S.B. A study of mechanical and microstructures properties of autoclaved aerated concrete containing nano-graphene. *Journal of Building Engineering*, 2021, **43**, 103106. DOI: 10.1016/j.job.2021.103106.
18. Tasdemir C., Sengul O., Tasdemir M.A. A comparative study on the thermal conductivities and mechanical properties of lightweight concretes. *Energy and Buildings*, 2017, **151**, 469–475. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.07.013.

Вклад авторов:

¹Альджабуи Д. З. М. – получение экспериментальных образцов газобетона и их испытание.

²Буракова И. В. – разработка концепции научной работы, написание текста статьи.

³Бураков А. Е. – написание текста статьи, интерпретация полученных результатов.

⁴Слдозян Р. Д. – подготовка иллюстраций.

⁵Ткачев А. Г. – консультация по вопросам планирования, редактирование текста статьи.

Contribution of the authors:

¹*Aljaboobi D. Z. M.* – obtaining experimental samples of aerated concrete and testing them.

²*Burakova I. V.* – development of the scientific work concept, writing the article.

³*Burakov A. E.* – writing the article, interpreting the results obtained.

⁴*Slodzian R. D.* – preparation of illustrations.

⁵*Tkachev A. G.* – consultation on planning issues, editing the article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

¹ORCID: 0000-0002-8248-5050

²ORCID: 0000-0003-0850-9365

³ORCID: 0000-0003-4871-3504

⁴ORCID: 0000-0003-2056-9176

⁵ORCID: 0000-0002-1095-7311

Поступила 21.12.2023, одобрена 22.01.2024, принята 5.02.2024

Received 21.12.2023, approved 22.01.2024, accepted 5.02.2024