

Известия вузов. Строительство. 2023. № 3. С. 52–60.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2023; (3): 52–60.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 691.327: 666.973.6

DOI: 10.32683/0536-1052-2023-771-3-52-60

## ПОЛУЧЕНИЕ НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА С ВВЕДЕНИЕМ ОКСИДА ГРАФЕНА И ПЛАСТИФИЦИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ

Дхафер Зейд Мохаммед Альджабуи<sup>1</sup>, Ирина Владимировна Буракова<sup>1</sup>,  
Александр Евгеньевич Бураков<sup>1</sup>, Рами Джозеф Слдозьян<sup>2</sup>,  
Алексей Григорьевич Ткачев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

<sup>2</sup>Технологический университет, Багдад, Ирак

**Аннотация.** Разработана новая комплексная добавка для неавтоклавного газобетона на основе оксида графена и пластифицирующей добавки – лигносульфоната. Представлен способ получения образцов неавтоклавного газобетона. С помощью сканирующей электронной микроскопии изучена морфология продуктов гидратации неавтоклавного газобетона в возрасте 28 дней. Введение наночастиц графена играет существенную роль в росте гидросиликатов кальция в процессе твердения неавтоклавного газобетона и обеспечивает формирование цементного камня с более высокой кристалличностью. Полученный эффект в свою очередь влияет на прочностные характеристики ячеистого бетона. Результаты механических испытаний показали увеличение прочности на сжатие на 54 % и прочности на изгиб на 45 %.

**Ключевые слова:** строительные материалы, ячеистые бетоны, газобетон неавтоклавного твердения, портландцемент, оксид графена, лигносульфонат, механические испытания

**Благодарности:** авторы выражают благодарность доцентам кафедры «Конструкции зданий и сооружений» Тамбовского государственного технического университета А.А. Мамонтову и С.А. Мамонтову за помощь в проведении механических испытаний.

**Для цитирования:** Альджабуи Д.З.М., Буракова И.В., Бураков А.Е., Слдозьян Р.Д., Ткачев А.Г. Получение неавтоклавного газобетона с введением оксида графена и пластифицирующей добавки // Известия вузов. Строительство. 2023. № 3. С. 52–60. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-771-3-52-60.

Original article

## PRODUCTION OF NON-AUTOCLAVED AERATED CONCRETE WITH GRAPHENE OXIDE AND PLASTICIZER ADDITIVES

Dhafer Z.M. Aljaboobi<sup>1</sup>, Irina V. Burakova<sup>1</sup>, Alexander E. Burakov<sup>1</sup>,  
Rami J. Sldozian<sup>2</sup>, Alexey G. Tkachev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tambov State Technical University, Tambov, Russia

<sup>2</sup>University of Technology, Baghdad, Iraq

**Abstract.** A new complex additive for non-autoclaved aerated concrete based on graphene oxide and a plasticizing additive, lignosulfonate, were developed. A method for obtaining samples of non-autoclaved aerated concrete was presented. Using scanning electron microscopy, the morphology of hydration products of non-autoclaved aerated concrete at the age of 28 days was studied. The introduction of graphene nanoparticles plays a significant role in the growth of calcium hydrosilicates during the hardening of non-autoclaved aerated concrete and ensures the formation of a cement stone with a higher crystallinity. The resulting effect, in turn, affects the strength characteristics of cellular concrete. The mechanical tests showed an increase in compressive strength by 54 % and flexural strength by 45 %.

**Keywords:** building materials, cellular concrete, non-autoclaved aerated concrete, portland cement, graphene oxide, lignosulfonate, mechanical tests

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

**For citation:** 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.

**Введение.** Важнейшим направлением развития современного строительного комплекса и производства различных строительных материалов и конструкций является применение высокотехнологичных инноваций, позволяющих существенно улучшить функциональные свойства конечных изделий, в частности, энергосбережение. Повышение энергоэффективности зданий и иных конструкций в настоящее время одна из наиболее актуальных задач архитектурно-строительного комплекса, направленных на сохранение и бережное взаимодействие с окружающей средой. В условиях необходимости энергетической экономии технология изготовления строительных материалов должна отличаться пониженной энергоемкостью. К таким материалам относят ячеистый бетон – неавтоклавный газобетон (НГБ), являющийся хорошим теплоизолятором.

Неавтоклавный газобетон относится к ячеистым бетонам с замкнутой структурой пор в цементном камне, образованных в результате взаимодействия порообразователя (алюминиевой пудры или алюминиевой пасты), цемента в процессе гидратации и наполнителей (песок, доломитовая мука, известь), твердеющий при естественных условиях или при электропрогреве [1].

Газобетоны широко применяются в качестве стеновых блоков, панелей, плит перекрытий. Изделия из газобетона служат как для устройства наружных ограждающих конструкций, так и для возведения внутренних перегородок, а также для каркасного высотного домостроения. Преимущества НГБ: низкие значения теплопроводности, плотности, водопоглощения, повышенная стойкость к высоким температурам, хорошая обрабатываемость, высокая долговечность, экологичность [1].

Учитывая простоту и низкую стоимость безавтоклавной технологии, необходимо обеспечить требуемые показатели физико-механических и эксплуатационных свойств газобетонов.

Один из вариантов решения данной проблемы – введение модифицирующих добавок, оказывающих влияние на протекание процессов минералообразования, направленных на повышение прочности межпорового пространства НГБ. Применение различных типов углеродных наноматериалов (оксид графена (ОГ), углеродные нанотрубки (УНТ) и т.п.) для структурирования цементных матриц в бетонах плотной и ячеистой структуры показывает улучшение качественных показателей бетонных изделий [2, 3].

В последние годы множество авторов публикуют положительные результаты использования в качестве модификатора цементных композитов графеновых наноструктур, выступающих армирующей добавкой и способствующих результативному структурообразованию [4–11].

Проведенные исследования продемонстрировали существенное увеличение физико-механических характеристик наномодифицированных цементных композитов (в частности, прочность на сжатие и изгиб возрастала на 20–70 %) [10, 11], а также значительно снижалось водопоглощение и увеличивалась долговечность бетона. Однако, несмотря на замечательные результаты, достигнутые при использовании графеновых структур в качестве модификатора, для крупнотоннажного производства изделий архитектурно-строительного комплекса данные материалы остаются достаточно дорогостоящими добавками, что в настоящее время ограничивает возможность их использования. В то же время добиться схожего положительного эффекта либо превзойти его способны комплексные модификаторы на основе графеновых структур и иных бюджетных строительных добавок, хорошо себя зарекомендовавших ранее в изделиях из цементных композитов, в частности, газобетонах [12–15].

Использование подобного комплексного подхода формирования состава модификаторов позволяет рассчитывать на проявление синергетического эффекта при реализации положительных свойств каждого компонента состава. Одним из перспективных материалов подобного рода является лигносульфонат (ЛС) – самый популярный и бюджетный суперпластификатор на мировом рынке [16].

Этот компонент добавляют для получения высокотекучих бетонов, обладающих значительной прочностью. Использование лигносульфоната в качестве пластификатора увеличивает удобоукладываемость бетона при низком водовязущем соотношении, что позволяет повысить прочность на сжатие и долговечность. Кроме того, лигносульфонаты обладают доступностью,

дешевизной, хорошей растворимостью в воде, возможностью их получения в жидком, порошкообразном, гранулированном виде, отсутствием неприятных запахов, нетоксичностью, достаточно высокими исходными реологическими свойствами [17–20].

В настоящей работе авторы исследовали влияние комплексного модификатора на основе оксида графена и лигносульфоната, применяемого при изготовлении неавтоклавного газобетона, на физико-механические характеристики бетонных композиций (прочность на сжатие и изгиб).

**Материалы и методы исследования.** Для приготовления смесей неавтоклавного газобетона были использованы следующие сырьевые компоненты: портландцемент М500 (Paladium, г. Жуковский), песок сухой ГОСТ 8736–2014, строительная гашеная карбонатно-известковая мука (ООО «СтройКомплект», г. Воронеж), алюминиевая пудра, водопроводная вода (соотношение вода/цемент составляло 0,4). Для определения прочности на сжатие были изготовлены бетонные кубики размером 70×70×70 мм, а для нахождения прочности на изгиб – 40×40×160 мм. После укладки смеси в формы производилось уплотнение бетонной смеси на вибрационной площадке, отвечающее требованиям ГОСТ 17674–72 с обязательным наличием вертикальной составляющей колебаний. На 7-й день формы разбирались, кубики вынимались для продолжения набора прочности (28 дней). Для определения предела прочности на сжатие использовали пресс ИП-500 с максимальным усилием 50 т (ЗАО «ЗИПО», г. Армавир), а прочности на изгиб – одноосную испытательную машину с мощностью 2000 кН и применяемой нагрузкой 0,4 МПа/с.

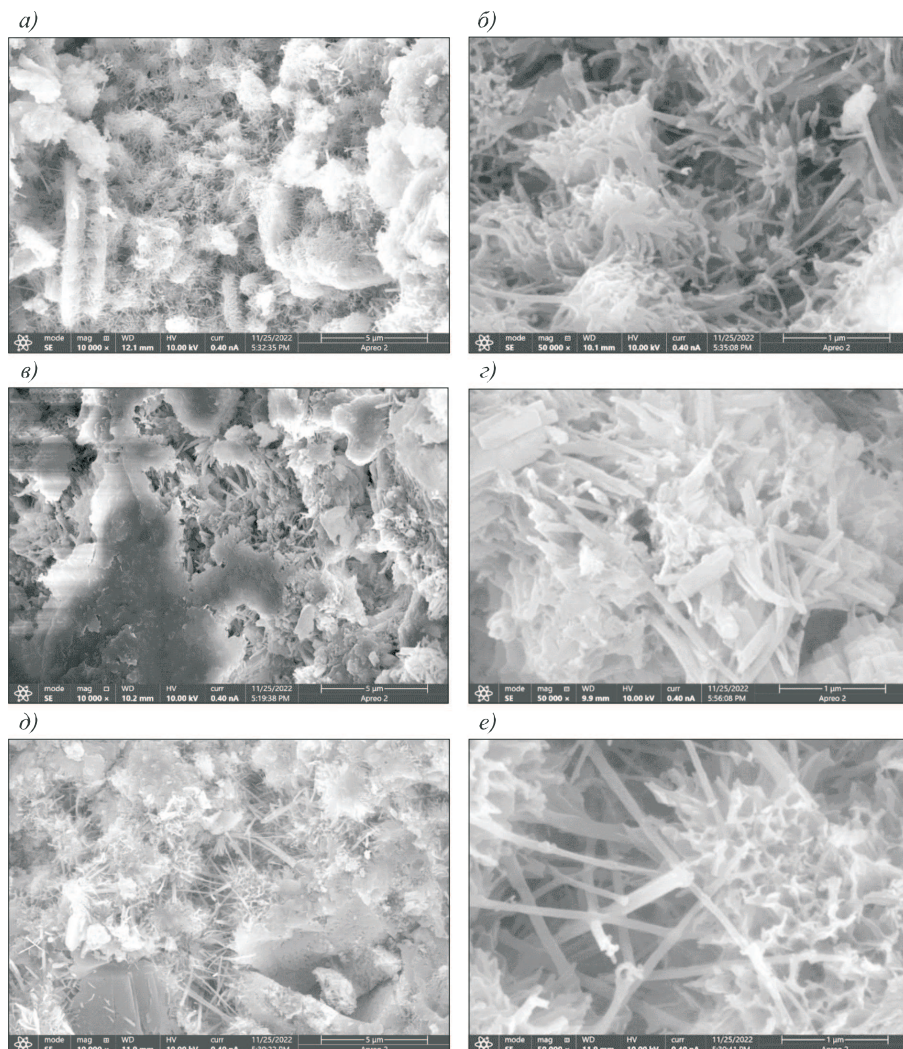
В качестве модифицирующей добавки применяли оксид графена, лигносульфонат и их композицию в различных массовых соотношениях. ОГ представлен в виде водной суспензии (1 % по сухому веществу) (производство ООО «НаноТехЦентр», г. Тамбов), лигносульфонат порошкообразный (ООО «АКВАХИМ», г. Казань).

Микроструктуру цементной матрицы газобетона оценивали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) «LEO EVO 50» (Zeiss, Германия).

**Результаты и обсуждение.** Микроструктура межпоровых перегородок в исходном НГБ характеризуется наличием рыхлой структуры, представленной гидросиликатами кальция аморфной и пластинчатой структуры на рисунке (а, б).

Добавка ОГ (рис., в, г) приводит к структурированию матрицы с изменением морфологии новообразований – образуются переплетенные кристаллы тоберморита пластинчатой формы [21]. При введении комплексной графеновой добавки ОГ/ЛС отмечается существенное изменение морфологии кристаллизующихся новообразований. Согласно СЭМ-изображениям цементная матрица представлена волокнами геля С–S–Н и гидросиликатов кальция преимущественно в виде тоберморита в форме «flowers», которые покрывают поверхность межпоровых перегородок газобетона (рис., д, е).





Морфология продуктов гидратации цементной матрицы образцов  
*a, б* – контрольного без добавок; *в, г* – с добавкой ОГ в количестве 0,0002 мас. %;  
*д, е* – с добавкой ОГ/ЛС в количестве 0,0002/0,16 мас. %

Morphology of the cement matrix hydration products  
*a, b* – control sample without additives; *c, d* – with the addition of GO in the amount of  
 0.0002 wt. %; *e, f* – with the addition of GO / LS in the amount of 0.0002/0.16 wt. %

Результаты механических испытаний НГБ приведены в таблице.

В рамках проведенных экспериментальных исследований максимальное повышение прочности неавтоклавного газобетона достигается при введении комплексной добавки ОГ по сухому веществу в количестве 0,0002 % от массы цемента и лигносульфоната 0,16 %. В данном случае прочность на сжатие НГБ в сравнении с контрольным образцом повышается на 54 %, а на изгиб на 45 %.

Дальнейшее увеличение количества добавки приводит к нивелированию эффекта от ее присутствия в составе бетонной смеси. Вероятно, при более высоких концентрациях происходит агломерация наночастиц вследствие

**Прочность на сжатие и на изгиб образцов НГБ при различных модифицирующих добавках****Compressive and bending strength of NAC samples with various modifying additives**

Содержание ОГ, мас. %	Прочность образцов НГБ, МПа, при содержании ЛС, мас. %				
	0	0,032	0,16	0,32	0,64
На сжатие					
0	1,25	1,32	1,45	1,43	1,38
0,0001	1,41	1,54	1,59	1,58	1,51
0,0002	1,53	1,74	<b>1,92</b>	1,84	1,78
0,0003	1,46	1,53	1,57	1,61	1,59
0,0005	1,32	1,49	1,52	1,54	1,61
На изгиб					
0	1,15	1,2	1,38	1,32	1,29
0,0001	1,18	1,26	1,49	1,34	1,31
0,0002	1,27	1,52	<b>1,67</b>	1,54	1,48
0,0003	1,23	1,31	1,45	1,37	1,32
0,0005	1,19	1,28	1,36	1,38	1,31

действия ван-дер-ваальсовых сил, что вызывает локализацию напряжений в продукте гидратации в точках внедрения добавки. Следует отметить, что по отдельности ОГ и ЛС не дают таких высоких значений прочности нежели их комплексное введение.

Дальнейшее повышение концентрации добавки позволяет получить значения прочности выше, чем у контрольного образца. Однако все же приводит к незначительному снижению прочности цементной матрицы. Последующее увеличение концентрации ОГ и ЛС невыгодно с экономической точки зрения.

**Выводы.** В качестве модификатора цементной матрицы неавтоклавного газобетона была предложена комплексная добавка на основе суспензии оксида графена и пластифицирующего вяжущего – лигносульфоната. Наномодифицирующая добавка вводилась на стадии смешения исходных компонентов бетонной смеси. С помощью СЭМ было изучено изменение морфологии цементного камня в результате модифицирования НГБ. Установлено, что введение комплексной добавки существенно влияет на процесс гидратации цемента и приводит к наилучшей кристаллизации новообразований. В результате механических испытаний отмечается, что комплексная добавка ОГ (0,0002 %)/ЛС(0,16 %) дает наибольшую прибавку прочности на сжатие в 54 % и прочности на изгиб в 45 %. Таким образом, можно утверждать, что совместное введение модифицирующей добавки ОГ и ЛС улучшает прочностные характеристики неавтоклавного газобетона.

**Список источников**

1. *Недвецкий Е.С.* Стеновые блоки из неавтоклавного газобетона // Актуальные проблемы технологии бетона и строительных материалов: материалы 67-й студ. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2011. С. 70–73.

2. Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Полянских И.С., Керене Я., Мачулайтис Р., Пудов И.А., Сеньков С.А., Политаева А.И., Гордина А.Ф., Шайбадуллина А.В. Наноструктурирование композитов в строительном материаловедении. Ижевск: Изд-во ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2014. 196 с.
3. Keriene J., Kligys M., Laukaitis A., Yakovlev G., Špokauskas A., Aleknevičius M. The influence of multi-walled carbon nanotubes additive on properties of non-autoclaved and autoclaved aerated concretes // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 49. P. 527–535.
4. Han B., Zheng Q., Sun S., Dong S., Zhang L., Yu X., Ou J. Enhancing mechanisms of multi-layer graphenes to cementitious composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017. Vol. 101. P. 143–150.
5. Indukuri C.S.R., Nerella R. Enhanced transport properties of graphene oxide-based cement composite material // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 37. P. 102174.
6. Sreeja K., Naresh Kumar T. Effect of graphene oxide on fresh, hardened and mechanical properties of cement mortar // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 46. P. 2235–2239.
7. Devi S.C., Khan R.A. Mechanical and durability performance of concrete incorporating graphene oxide // *Journal of Materials and Engineering Structures*. 2019. Vol. 6. P. 201–214.
8. Mohammadi M.R., Ahmadi J., Mohammadi S. The effect of graphene nano particle on the mechanical and durability properties of Portland cement concrete // *Concrete Research*. 2020. Vol. 12, no. 1. P. 109–118.
9. Строчкова В.В., Лакетич С.К., Нелюбова В.В., Ёе Женмао. Оксид графена как модификатор цементных систем: анализ состояния и перспективы развития // *Строит. материалы*. 2021. № 1-2. С. 37–90.
10. Sldozian R.J., Tkachev A.G., Burakova I.V., Mikhaleva Z.A. Improve the mechanical properties of lightweight foamed concrete by using nanomodified sand // *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 34. P. 101923.
11. Tolchkov Yu.N., Aljaboobi D.Z.M. Research into the process of synthesis of carbon nanomaterials on the cement binder // *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 2022. Vol. 7. P. 290–298.
12. Akarsh P.K., Marathe S., Bhat A.K. Influence of graphene oxide on properties of concrete in the presence of silica fumes and M-sand // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 268.
13. Mowlaei R., Lin J., Basquiroto de Souza F., Fouladi A., Habibnejad Korayem A., Shamsaei E., Duan W. The effects of graphene oxide-silica nanohybrids on the workability, hydration, and mechanical properties of Portland cement paste // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 266. P. 121016.
14. Li G., Zhuang Z., Lv Y., Wang K., Hui D. Enhancing carbonation and chloride resistance of autoclaved concrete by incorporating nano-CaCO<sub>3</sub> // *Nanotechnology Reviews*. 2020. Vol. 9, no. 1. P. 998–1008.
15. Leontev S., Saraykina K., Golubev V., Yakovlev G. et al. Research into influence of ultra- and nanodisperse size additives on the structure and properties of heat insulating autoclaved aerated concrete // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 172. P. 649–656.
16. Elsener B., Angst U. *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Netherlands: Elsevier, 2016. P. 321–339.
17. Сергеева В.Н., Тарнаруцкий Г.М., Грибанова Н.В., Тельешева Г.М. Лигносультфонаты как пластификаторы цемента // *Химия древесины*. 1979. № 3. С. 3–12.
18. Mezhov A., Kovler K. Effect of sodium lignosulfonate superplasticizer on the early hydration of cement with different contents of cubic C3A // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 660. P. 012037.

19. Yousf M., Mollah A., Polta P., Hess Th., Vempati R.R.K., Cocks D.L. Chemical and physical effect of sodium LignoSulphonate Superplasticizer on the hydration of portland cement and solidification/ Stabilization consequences // *Cement and Concrete Research*. 1995. Vol. 25. P. 671–682.
20. Topçu İ.B., Ateşin Ö. Effect of high dosage lignosulphonate and naphthalene sulphonate based plasticizer usage on micro concrete properties // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 120. P. 189–197.
21. Liu Y., Kumar D., Zhu W. et al. Utilization of coarse non-ferrous fraction of incineration bottom ash as aerating agent in autoclaved aerated concrete // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 375. P. 130906.

### References

1. Nedvetskiy E.S. Wall blocks from non-autoclaved aerated concrete. Actual problems of technology of concrete and building materials: materials of the 67th student scientific and technical conference. Minsk: BNTU, 2011. P. 70–73. (In Russ.).
2. Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Polyanskikh I.S. et al. Nanostructuring of composites in building materials science. Izhevsk: Publishing house of IzhGTU im. M.T. Kalashnikova, 2014. 196 p. (In Russ.).
3. Keriene J., Kligys M., Laukaitis A., Yakovlev G., Špokauskas A., Aleknevičius M. The influence of multi-walled carbon nanotubes additive on properties of non-autoclaved and autoclaved aerated concretes. *Construction and Building Materials*. 2013; 49: 527–535.
4. Han B., Zheng Q., Sun S., Dong S., Zhang L., Yu X., Ou J. Enhancing mechanisms of multi-layer graphenes to cementitious composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017; 101: 143–150.
5. Indukuri C.S.R., Nerella R. Enhanced transport properties of graphene oxide-based cement composite material. *Journal of Building Engineering*. 2021; 37: 102174.
6. 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.
7. Devi S.C., Khan R.A. Mechanical and durability performance of concrete incorporating graphene oxide. *Journal of Materials and Engineering Structures*. 2019; 6: 201–214.
8. Mohammadi M.R., Ahmadi J., Mohammadi S. The effect of graphene nano particle on the mechanical and durability properties of Portland cement concrete. *Concrete Research*. 2020; 12(1): 109–118.
9. Strokova V.V., Laketich S.K., Nelyubova V.V., Ye Zenmao. Graphene oxide as a modifier of cement systems: analysis of the state and development prospects. *Stroitel'nyye materialy = Building materials*. 2021; (1-2): 37–90. (In Russ.).
10. Sldozian R.J., Tkachev A.G., Burakova I.V., Mikhaleva Z.A. Improve the mechanical properties of lightweight foamed concrete by using nanomodified sand. *Journal of Building Engineering*. 2020; 34: 101923.
11. Tolchkov Yu.N., Aljaboobi D.Z.M. Research into the process of synthesis of carbon nanomaterials on the cement binder. *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 2022; 7: 290–298.
12. Akarsh P.K., Marathe S., Bhat A.K. Influence of graphene oxide on properties of concrete in the presence of silica fumes and M-sand. *Construction and Building Materials*. 2021; 268.
13. Mowlaei R., Lin J., Basquioto de Souza F., Fouladi A., Habibnejad Korayem A., Shamsaei E., Duan W. The effects of graphene oxide-silica nanohybrids on the workability, hydration, and mechanical properties of Portland cement paste. *Construction and Building Materials*. 2021; 266: 121016.



14. Li G., Zhuang Z., Lv Y., Wang K., Hui D. Enhancing carbonation and chloride resistance of autoclaved concrete by incorporating nano-CaCO<sub>3</sub>. *Nanotechnology Reviews*. 2020; 9(1): 998–1008.
15. Leontev S., Saraykina K., Golubev V., Yakovlev G. et al. Research into influence of ultra- and nanodisperse size additives on the structure and properties of heat insulating autoclaved aerated concrete. *Procedia Engineering*. 2017; 172: 649–656.
16. Elsener B., Angst U. Science and Technology of Concrete Admixtures. Netherlands: Elsevier, 2016. P. 321–339.
17. Sergeeva V.N., Tarnarutskiy G.M., Griбанова N.V., Telysheva G.M. Lignosulfonates as cement plasticizers. *Khimiya drevesiny = Wood Chemistry*. 1979; (3): 3–12. (In Russ.).
18. Mezhev A., Kovler K. Effect of sodium lignosulfonate superplasticizer on the early hydration of cement with different contents of cubic C3A. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2019; 660: 012037.
19. Yousef M., Mollah A., Polta P., Hess Th., Vempati R.R.K., Cocks D.L. Chemical and physical effect of sodium LignoSulphonate Superplasticizer on the hydration of portland cement and solidification/ Stabilization consequences. *Cement and Concrete Research*. 1995; 25: 671–682.
20. Topçu İ.B., Ateşin Ö. Effect of high dosage lignosulphonate and naphthalene sulphonate based plasticizer usage on micro concrete properties. *Construction and Building Materials*. 2016; 120: 189–197.
21. Liu Y., Kumar D., Zhu W. et al. Utilization of coarse non-ferrous fraction of incineration bottom ash as aerating agent in autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*. 2023; 375: 130906.

#### **Информация об авторах**

**Д.З.М. Альджабуи** – аспирант, aldjabubi.dzm@mail.tstu.ru

**И.В. Буракова** – кандидат технических наук, доцент, iris\_tamb68@mail.ru

**А.Е. Бураков** – кандидат технических наук, доцент, m-alex1983@yandex.ru

**Р.Д. Слдозян** – кандидат технических наук, преподаватель, rami\_j\_ag@yahoo.com

**А.Г. Ткачев** – доктор технических наук, профессор, nanotam@yandex.ru

#### **Information about the authors**

**D.Z.M. Aljaboobi** – Post-graduate Student, aldjabubi.dzm@mail.tstu.ru

**I.V. Burakova** – PhD, Ass. Professor, iris\_tamb68@mail.ru

**A.E. Burakov** – PhD, Ass. Professor, m-alex1983@yandex.ru

**R.J. Sldozian** – PhD, Lecturer, rami\_j\_ag@yahoo.com

**A.G. Tkachev** – DSc, Professor, nanotam@yandex.ru

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.01.2023  
Одобрена после рецензирования 27.02.2023  
Принята к публикации 03.03.2023

The article was submitted 27.01.2023  
Approved after reviewing 27.02.2023  
Accepted for publication 03.03.2023