

**Высокоэффективный тяжелый бетон с использованием
углеродсодержащего модификатора****Ольга Игоревна Селезнёва^{1✉}, Виктор Сергеевич Орлов²,
Павел Александрович Шустов³**^{1,2}Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия³Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Россия³Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия¹sel_olga@mail.ru✉²orlovvs1@tyuiu.ru³shustovpa@mail.ru

Аннотация. Актуальной задачей строительной индустрии является снижение расхода цемента в производстве бетонных смесей. Цель исследования заключается в оптимизации структуры бетонного камня путем подбора гранулометрического состава компонентов, вплоть до наноразмерных величин. К подобным микронаполнителям относятся микрокремнезем, метакаолин, зола, графит/графен и т.д. Перспективным направлением является получение добавок комплексного действия – обладающих пластифицирующей способностью, а также содержащих в своем составе тонкодисперсные наполнители, образующие соединения с вяжущими свойствами. При помощи ультразвуковой ванны с генератором мощностью 80 Вт была выполнена диспергация в водной среде терморасширяющегося графита и его ультразвуковая обработка. Анализ гранулометрического состава графитсодержащей суспензии проводился на лазерном дифракционном приборе измерения размера частиц *Fritsch NanoTec* с блоком диспергирования в жидкой среде (диапазон измерения от 0,01 до 2100 мкм). Микроскопическое исследование проводилось с применением сканирующего (растрового) электронного микроскопа *TESCAN Mira 3* с диапазоном увеличения до 1 000 000 крат. В статье приведены данные исследований физико-механических характеристик тяжелого бетона с введением модифицированного окисленного терморасширяющегося графита. Представлены результаты микроскопического анализа и изучения гранулометрического состава графитсодержащей суспензии. Проведенные исследования свидетельствуют об эффективности ультразвуковой обработки графитсодержащей суспензии и ее влиянии на прочностные характеристики бетона. Представленные результаты позволяют сделать вывод о возможности применения ультразвуковой обработки для дополнительного измельчения частиц графита в графитсодержащей суспензии и об улучшении физико-механических характеристик бетонного камня при введении данной суспензии в его состав.

Ключевые слова: графит, окисленный терморасширяющийся графит, ультразвуковое диспергирование графита, высокоэффективный бетон

Для цитирования: Селезнёва О. И., Орлов В. С., Шустов П. А. Высокоэффективный тяжелый бетон с использованием углеродсодержащего модификатора // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 4. С. 654–661. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-4-654-661>.

Original article**High-performance heavyweight concrete containing carbon modifier****Olga I. Selezneva^{1✉}, Victor S. Orlov², Pavel A. Shustov³**^{1,2}Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia³Angarsk State Technical University, Angarsk, Russia³Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia¹sel_olga@mail.ru✉²orlovvs1@tyuiu.ru³shustovpa@mail.ru

Abstract. Reducing the consumption of cement in the production of concrete mixtures has been a topical issue in the construction industry. The study aims to optimise the structure of concrete stone by selecting the particle size distribution of the components to nanoscale values. Such microfillers include silica fume, metakaolin, ashes, nanographite/graphene, etc. Thus, producing additives of complex action having a plasticising ability, as well as containing finely dispersed fillers forming binding material, is promising. Expandable graphite was dispersed in an aqueous medium and subjected to ultrasonic treatment using an ultrasonic bath with an 80 W generator. The particle size distribution in the graphite-containing suspension was studied using a laser diffraction particle analyser *Fritsch NanoTec* with a wet dispersion system (measuring range of 0.01 to 2100 µm). Microscopic examination was carried out using a scanning electron microscope *TESCAN Mira 3* with a magnification range of up to 1,000,000 times. In the present work, the physical-mechanical properties of heavyweight concrete containing modified oxidised expandable graphite were investigated. The results of microscopy and particle size distribution analysis of the graphite-containing suspension are presented. The research indicates the efficiency of ultrasonic treatment of a graphite-containing suspension and its effect on the strength characteristics of concrete. The presented results demonstrate the potential of ultrasonic treatment for additional disintegration of graphite particles in a graphite-containing suspension improving the physical and mechanical characteristics of a concrete stone by adding this suspension to its composition.

Keywords: graphite, oxidized thermally expandable graphite, ultrasonic dispersion of graphite, high performance concrete

For citation: Selezneva O. I., Orlov V. S., Shustov P. A. High-performance heavyweight concrete containing carbon modifier. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021;11(4):654-661. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-4-654-661>.

Введение

В настоящее время актуальным вопросом является получение высокоэффективных бетонов с заданными свойствами [1–5].

Применение тонкодисперсных углеродсодержащих модификаторов позволяет улучшить физико-механические и эксплуатационные характеристики бетонного камня [6–10]. Так как получение чистого графена в производстве проблематично, его применение в качестве добавки в цементные композиты экономически нецелесообразно. Согласно литературным данным, существуют различные способы получения нанографита (содержащего графен) из графита [11–14]. Перспективным является направление, связанное с управлением свойствами тяжелого цементного бетона на микроуровне: таким образом повышаются физико-механические и эксплуатационные характеристики конечного продукта [15–17].

Открытым остается вопрос об оптимальном способе получения тонкодисперсной углеродсодержащей добавки для достижения максимального положительного эффекта в производстве тяжелого бетона.

Методы

В исследовании применялись следующие сырьевые материалы:

– портландцемент Сухоложского цементного завода марки ЦЕМ II/В-Ш 32,5Н;

– гранитный щебень фракций 5–10 мм, 10–20 мм Курманского каменного щебеночного месторождения;

– кварцевый песок с карьера ООО «Тюменьнеруд» с модулем крупности 2,3;

– окисленный терморасширяющийся графит;

– диспергированный с применением ультразвука (УЗ) графит.

Базовый состав без добавки и составы с исследуемыми добавками были приготовлены вручную.

Отдозированные щебень, песок и портландцемент перемешивались в сухом состоянии до однородной смеси и затворялись водой. Далее полученная смесь тщательно перемешивалась в течение 5 мин. У бетонной смеси определялись плотность и технологические свойства.

Из свежеприготовленных бетонных смесей формовались образцы-кубы размером 100х100х100 мм, которые в дальнейшем твердели при нормальных условиях (температура $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительная влажность воздуха не менее 90 %). Через двое суток образцы были расформованы и помещены в камеру нормального твердения до достижения ими классового возраста. В 28 суток исследовались

плотность и прочность бетона при сжатии в соответствии с ГОСТ 10180-2012¹.

Исследование структуры полученной углеродсодержащей добавки выполнено с использованием электронного сканирующего микроскопа *TESCAN Mira 3* с диапазоном увеличения до 1 000 000 крат².

Результаты и их обсуждение

Изучены физико-механические свойства бетонной смеси и бетона. Проектирование состава бетона произведено с использованием эмпирических формул, связывающих прочность бетона со свойствами вяжущего, заполнителей и водоцементным отношением. Характеристики базового состава представлены в табл. 1.

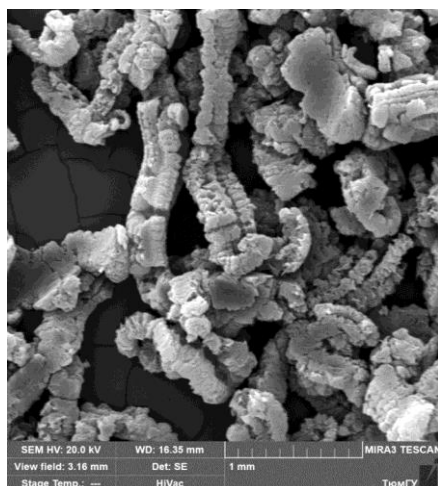
Таблица 1. Характеристики базового состава бетонной смеси и бетона

Table 1. Characteristics of the basic composition of concrete mix and concrete

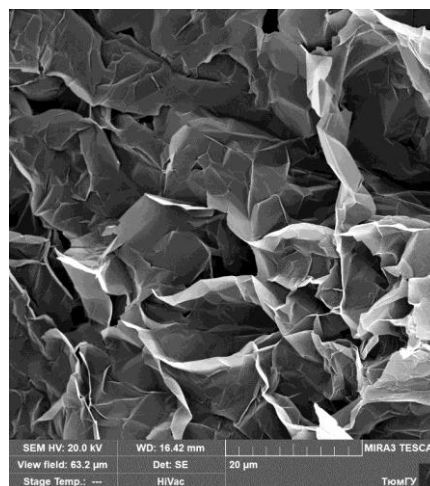
Сырьевые материалы	Количество компонентов, кг	Плотность бетонной смеси, кг/м ³	Подвижность бетонной смеси, см	Плотность бетона, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа
Цемент	410	2310	11,5	2470	42,86
Песок	800				
Щебень	1040				
Вода	205				

Далее бетонная смесь была модифицирована синтезированным окисленным терморасширяющимся графитом путем кратковременного воздействия, не превышающего 10 секунд, электромагнитного (СВЧ) излучения (частота 2450МГц) мощностью 1000 Вт [18]. Полученное

вещество представляет собой вытянутые высокопористые хлопья с большим содержанием пустот. Окисленный терморасширяющийся графит содержит до 99,9 % углерода без посторонних примесей. Результаты электронной микроскопии представлены на рис. 1 а, b [19].



а



б

Рис. 1. Микроструктура окисленного терморасширяющегося графита

Fig. 1. Microstructure of oxidized thermally expanding graphite

Следующим этапом эксперимента являлось исследование реологических характеристик и физико-механических свойств состава с добавкой окисленного терморасширяющегося графита. Была проанализирована совместная работа цементного композита и углеродсодержащего вещества. Результаты испытаний представлены в табл. 2. Добавление данного вещества не оказало выраженного эффекта.

Увеличение прочностных характеристик незначительно. Можно заключить, что окисленный терморасширяющийся графит в материале является только микрозаполнителем, не меняющим структуру цементных композитов. Также остается открытым вопрос об однородном перемешивании бетонной смеси и вкраплении в нее добавки.

¹ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М.: Стандартинформ, 2018.

²Зимакова Г. А., Селезнева О. И., Радаев С. С., Орлов В. С. Методы исследования состава и свойств строительных материалов: учеб. пособ. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2021. 126 с.

Таблица 2. Характеристики модифицированного окисленным терморасширяющимся графитом состава бетонной смеси и бетона

Table 2. Characteristics of the concrete mix and concrete composition modified by oxidized thermally expanding graphite

Сырьевые материалы	Количество компонентов, кг	Плотность бетонной смеси, кг/м ³	Подвижность бетонной смеси, см	Плотность бетона, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа
Цемент	410	2315	11	2480	44,95
Песок	800				
Щебень	1040				
Вода	205				
Окисленный терморасширяющийся графит	0,41				

По результатам исследования сделаны выводы, что применение окисленного терморасширяющегося графита является экономически нецелесообразным. Расщепление графита путем термоактивации оказалось малоэффективным. Вероятно, необходимо создать более жесткие условия деструкции. При термическом воздействии происходит механическое разрушение по слабым местам, дефектам. В жидкой среде, в присутствии ультра-

звука диспергирование существенно увеличивает дробление и по прочно соединенным слоям, создавая тем самым разрушения в местах спайности. Следует отметить, что в случае отключения источника УЗ-воздействия в течение десяти минут происходит агрегация частиц порошка в суспензии практически до первоначальных значений. График распределения частиц после их агрегации представлен на рис. 2.

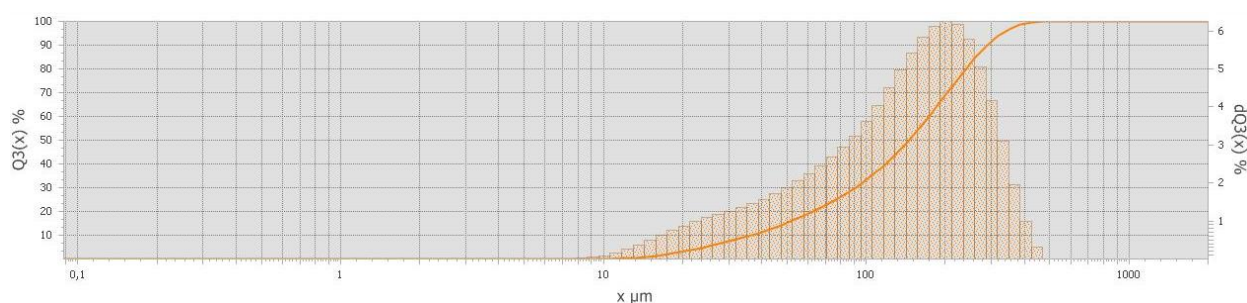


Рис. 2. Гранулометрический состав агрегированных частиц графита в суспензии без ультразвукового воздействия

Fig. 2. Granulometric composition of aggregated graphite particles in suspension without ultrasonic action

Результаты испытаний бетонной смеси и бетона с использованием диспергированного с применением ультразвука графита представлены в табл. 3. На рис. 3 а, б изображено

определение технологических характеристик бетона. На рис. 4 а, б приведены фотографии микроструктуры модифицированного добавкой бетона.



a



b

Рис. 3. Оценка технологических характеристик бетона
Fig. 3. Assessment of technological characteristics of concrete

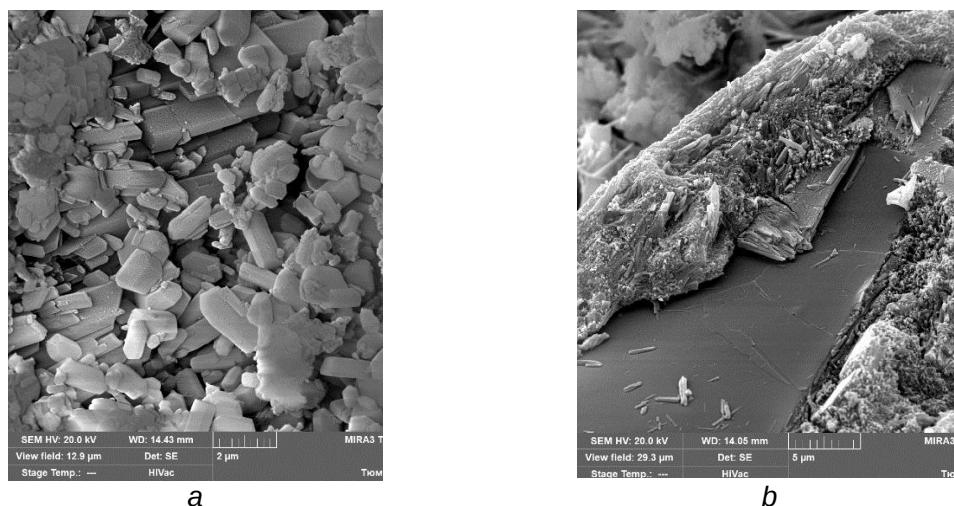


Рис. 4. Микроструктура бетона с добавкой суспензии обработанного ультразвуком терморасширяющегося графита
Fig. 4. Microstructure of concrete with the addition of a suspension of sonicated thermally expanding graphite

Таблица 3. Характеристики модифицированного диспергированным с применением ультразвука графитом состава бетонной смеси и бетона
Table 3. Characteristics of the modified concrete mixture and concrete composition dispersed with the use of ultrasound graphite

Сырьевые материалы	Количество компонентов, кг	Плотность бетонной смеси, кг/м ³	Подвижность бетонной смеси, см	Плотность бетона, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа
Цемент	410	2365	13	2520	50,11
Песок	800				
Щебень	1040				
Вода	205				
Диспергированный с применением ультразвука графит	0,41				

Закключение

В результате изучения графита и его различных модификаций, которые применяются в качестве добавки в бетон, можно сделать вывод о том, что использование углеродсодержащих компонентов улучшает физико-механические и, как следствие, эксплуатационные характеристики композитов. Добавление окисленного терморасширяющегося графита не произвело заметного эффекта. Свой-

ства материала увеличились незначительно, на 4,8 % относительно контрольного состава. Использование данной добавки является экономически нецелесообразной. Применение суспензии графита, диспергированной в присутствии ультразвука, дало увеличение прочностных показателей на 16,9 %. Это показывает возможность использования модификации графита в качестве добавки в состав тяжелых бетонов на цементном вяжущем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Pan Z., He L., Qiu L., Korayem A. H., Li G., Zu J. W., et al. Mechanical properties and microstructure of a grapheme oxide – cement composit // Cement and Concrete Composites. 2015. Vol. 58. p. 140-147. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.02.001>.
- Chuah S., Pan Z., Sanjaan J. G., Wang C. M., Duan W. H. Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from grapheme oxide // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 73. p. 113-124. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.040>.

3. Миляев И. В. Оптимизация свойств модифицированного цементного камня // Научный вестник ВГАСУ. 2009. № 5. С. 102–104.
4. Федорова Г. Д., Александров Г. Н., Смагулова С. А. Исследование устойчивости водной суспензии оксида графена // Строительные материалы. 2015. № 2. С. 15–21.
5. Федорова Г. Д., Александров Г. Н., Смагулова С. А. К вопросу применения оксида графена в цементных системах // Строительные материалы. 2016. № 1-2. С. 21–26.
6. Moxmmed A., Sanjayn J. G., Duan W. H., Nazari A. Incorporating grapheme oxide in cement composites: A study of transport properties // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 84. p. 341-347. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.083>.
7. Sedaghat A., Ram M. K., Zayed A., Kamal R., Shanahan N. Investigation of Physical Properties of Graphene-Cement Composite for Structural Applications // Open Journal of Composite Materials. 2014. Vol. 4. № 1. p. 41685. <https://doi.org/10.4236/ojcm.2014.41002>.
8. Баженов Ю. М., Алимов Л. А., Воронин В. В. Развитие теории формирования структуры и свойств бетонов с техногенными отходами // Известия вузов. Строительство. 1996. № 4. С. 55–58.
9. Al Muhit B. A., Nam B. H., Zhai Lei, Zuyus J. Effects of microstructure on the compressive strength of graphene oxide-cement composites // Nanotechnology in Construction. 2015. URL: https://pantherfile.uwm.edu/sobolev/www/NICO-M-5/13_Nam.pdf (23.11.2015).
10. Хархардин А. Н. Структурная топология дисперсных систем взаимодействующих микро- и наночастиц // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2011. № 5. С. 119–125.
11. Raki L., Beaudoin J. J., Alizadeh R., Makar J. M., Sato T. Cement and concrete nanoscience and nanotechnology // Materials. 2010. Vol. 3. p. 918-942. <https://doi.org/10.3390/ma3020918>.
12. Horszczaruk E., Mijowska E., Kalenczuk R. J., Aleksandrak M., Mijowska S. Nanocomposite of cement/graphene oxide - Impact on hydration kinetics and Young's modulus // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 78. p. 234-242. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.009>.
13. Wang Q., Wang J., Lu C., Lie B., Jang R., Li C. Influence of grapheme oxide additions on the microstructure and mechanical strength of cement // New Carbon Materials. 2015. Vol. 30. Iss. 4. p. 349-359. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(15\)60194-9](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(15)60194-9).
14. Pan Z., Duan W. H., Li D., Collins F. Graphene oxide reinforced cement and concrete. Patent WO2013096990A1. Declared 21.12.2012. Published 04.07.2013.
15. Selezneva O., Orlov M., Shustov P. Oxidized thermally expanded graphite as a raw material for the production of cement composites // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Conference "Investments. Construction. Real estate: new technologies and targeted development priorities-2020" (Irkutsk, 23–24th April 2020). Vol. 880. Irkutsk, 2020. p. 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/880/1/012019>.
16. Кожухова Н. И., Бондаренко А. И., Строкова В. В. Зависимость механизма структурообразования от химического состава как ключевого фактора вяжущей системы // Строительный комплекс России. Наука. Образование. Практика: мат-лы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления и строительного факультета (г. Улан-Удэ, 11–14 июля 2012 г.). Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2012. С. 162–164.
17. Фаликман В. Р. Наноматериалы и нанотехнологии в современных бетонах // ALITin-form: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2011. №5-6. С. 34–48.
18. Voiry D., Yang J., Kupferberg J., Fullon R., Lee C., Jeong H. Y., et al. High-quality graphene via microwave reduction of solution-exfoliated graphene oxide // Science. 2016. Vol. 353. Iss. 6306. p. 1413-1416. <https://doi.org/10.1126/science.aah3398>.
19. Орлов В. С., Селезнева О. И., Шустов П. А. Структура и гранулометрический состав углеродсодержащей добавки в тяжелых бетонах // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2020. Т. 10. № 4. С. 594–601. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-4-594-601>.

REFERENCES

1. Pan Z, He L, Qiu L, Korayem AH, Li G, Zu JW, et al. Mechanical properties and microstructure of a grapheme oxide - cement composit. *Cement and Concrete Composites*. 2015;58:140-147. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.02.001>.
2. Chuah S, Pan Z, Sanjaan JG, Wang CM, Duan WH. Nano reinforced cement and con-

- crete composites and new perspective from grapheme oxide. *Construction and Building Materials*. 2014;73:113-124. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.040>.
3. Milyaev IV. Optimization of the properties of modified cement stone. *Nauchnyi vestnik VGASU*. 2009;5:102-104. (In Russ.).
4. Fedorova GD, Aleksandrov GN, Smagulova SA. Research of Stability of Water Suspension of Graphene Oxide. *Stroitel'nye materialy*. 2015;2:15-21. (In Russ.).
5. Fedorova GD, Aleksandrov GN, Smagulova SA. The study of graphene oxide use in cement systems. *Stroitel'nye materialy*. 2016;1-2:21-26. (In Russ.).
6. Moxmmed A, Sanjayn JG, Duan WH, Nazan A. Incorporating grapheme oxide in cement composites: A study of transport properties. *Construction and Building Materials*. 2018;84:341-347. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.083>.
7. Sedaghat A, Ram MK, Zayed A, Kamal R, Shanahan N. Investigation of Physical Properties of Graphene-Cement Composite for Structural Applications. *Open Journal of Composite Materials*. 2014;4(1):41685. <https://doi.org/10.4236/ojcm.2014.41002>.
8. Bazhenov YuM, Alimov LA, Voronin VV. Development of the theory of the formation of the structure and properties of concrete with industrial waste. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 1996;4:55-58. (In Russ.).
9. Al Muhit BA, Nam BH, Zhai Lei, Zuyus J. Effects of microstructure on the compressive strength of graphene oxide-cement composites. *Nanotechnology in Construction*. 2015. Available from: https://pantherfile.uwm.edu/sobolev/www/NICOM-5/13_Nam.pdf [Accessed 23rd November 2015].
10. Kharkhardin AN. Structural topology of dispersed systems of interacting micro- and nanoparticles. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2011;5:119-125. (In Russ.).
11. Raki L, Beaudoin JJ, Alizadeh R, Makar JM, Sato T. Cement and concrete nanoscience and nanotechnology. *Materials*. 2010;3:918-942. <https://doi.org/10.3390/ma3020918>.
12. Horszczaruk E, Mijowska E, Kalenczuk RJ, Aleksandrak M, Mijowska S. Nanocomposite of cement/graphene oxide - Impact on hydration kinetics and Young's modulus. *Construction and Building Materials*. 2015;78:234-242. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.009>.
13. Wang Q, Wang J, Lu C, Lie B, Jang R, Li C. Influence of grapheme oxide additions on the microstructure and mechanical strength of cement. *New Carbon Materials*. 2015;30(4):349-359. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(15\)60194-9](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(15)60194-9).
14. Pan Z, Duan WH, Li D, Collins F. Graphene oxide reinforced cement and concrete. Patent WO2013096990A1. Declared 21.12.2012. Published 04.07.2013.
15. Selezneva O, Orlov M, Shustov P. Oxidized thermally expanded graphite as a raw material for the production of cement composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Conference "Investments. Construction. Real estate: new technologies and targeted development priorities-2020"* (Irkutsk, 23–24th April 2020). Vol. 880. Irkutsk, 2020. p. 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/880/1/012019>.
16. Kozhukhova NI, Bondarenko AI, Strokovva VV. Dependence of the mechanism of structure formation on the chemical composition as a key factor in the binding system. *Stroitel'nyi kompleks Rossii. Nauka. Obrazovanie. Praktika: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennye 50-letiyu Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i upravleniya i stroitel'nogo fakul'teta* (Ulan-Ude, 11-14 July 2012). Ulan-Ude: ESSUTM, 2012. p. 162-164. (In Russ.).
17. Falikman VR. Nanomaterials and nanotechnologies in advanced concrete. *ALITinform: Tsement. Beton. Sukhie smesi*. 2011;5-6:34-48. (In Russ.).
18. Voiry D, Yang J, Kupferberg J, Fullon R, Lee C, Jeong HY, et al. High-quality graphene via microwave reduction of solution-exfoliated graphene oxide. *Science*. 2016;3539(6306):1413-1416. <https://doi.org/10.1126/science.aah3398>.
19. Orlov VS, Selezneva OI, Shustov PA. Structure and granulometric composition of a carbon-containing additive for heavy concrete. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2020;10(4):594-601. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-4-594-601>.

Информация об авторах

О. И. Селезнёва,

кандидат технических наук, доцент
кафедры строительных материалов,
Тюменский индустриальный университет,
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38,
Россия,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0178-7509>

В. С. Орлов,

заведующий лабораторией кафедры
строительной механики,
Тюменский индустриальный университет,
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38,
Россия,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5583-6989>

П. А. Шустов,

кандидат технических наук, доцент кафедры
строительного производства,
Ангарский государственный технический
университет,
665835, г. Ангарск, ул. Чайковского, 60,
Россия,
Иркутский национальный
исследовательский технический
университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2547-3579>

Information about the authors

Olga I. Selezneva,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
of the Department of Building Materials,
Industrial University of Tyumen,
38 Volodarskogo St., Tyumen, 625000, Russia,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0178-7509>

Victor S. Orlov,

Head of the Laboratory of the Department of
Structural Mechanics,
Industrial University of Tyumen,
38 Volodarskogo St., Tyumen, 625000, Russia,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5583-6989>

Pavel A. Shustov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
of the Department of Construction Production,
Angarsk State Technical University,
60 Chaikovskogo St., Angarsk, 665835, Russia,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2547-3579>

Вклад авторов

Селезнёва О. И., Орлов В. С., Шустов П. А.
имеют равные авторские права. Селезне-
ва О. И. несет ответственность за плагиат.

Contribution of the authors

Selezneva O. I., Orlov V. S., Shustov P. A.
have equal author's rights. Selezneva O. I.
bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Все авторы прочитали и одобрили оконча-
тельный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 20.10.2021.
Одобрена после рецензирования 17.11.2021.
Принята к публикации 19.11.2021.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests re-
garding the publication of this article.

The final manuscript has been read and ap-
proved by all the co-authors.

The article was submitted 20.10.2021.
Approved after reviewing 17.11.2021.
Accepted for publication 19.11.2021.