

ВЛИЯНИЕ ВВЕДЕНИЯ ПЕНОГРАФИТА НА ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОГО РАСТВОРА

Р.А. Живцова¹, Б.Я. Трофимов¹, Р.М. Ахмедьянов², М.С. Живцов²

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

² ООО «УралНИИСтром», г. Челябинск, Россия

В данной статье рассматриваются основные эффекты от введения добавки пенографита. Пенографит, метод его введения в состав смесей и дозировка выбраны на основании низких затрат, но значительной эффективности. С помощью пенографита удалось достичь высоких значений физико-механических характеристик при замене значительной части портландцемента отходом металлургического производства. Проведенное сравнение выявило увеличение прочностных характеристик цементного камня на основе портландцемента, молотого доменного гранулированного шлака и их смеси при хранении в нормальных условиях и вследствие тепло-влажностной обработки при введении добавки пенографита. Наибольший эффект при добавлении пенографита имеет состав, содержащий 60 % доменного гранулированного шлака от массы вяжущего. На основании полученных результатов пенографит является конкурентоспособной добавкой по сравнению с другими, имеющими популярность на рынке добавок. В том числе за счет простого получения и введения добавка пенографита не уступает по эффективности графену.

Ключевые слова: портландцемент, доменный гранулированный шлак молотый, пенографит, прочность при сжатии.

Введение

В настоящее время проведено множество исследований в области строительных материалов с использованием нанодобавок различных аллотропных форм углерода: трехмерных (графит), двумерных (графен), одномерных (нанотрубки) и нульмерных (фуллерены) [1–3]. Уникальность свойств углеродных наноструктур рассмотрена многими авторами [4–10].

Несмотря на явные преимущества от использования нанодобавок в бетон, высокая стоимость не позволяет использовать наномодификаторы в промышленном масштабе. Основными препятствиями использования нанодобавок в промышленных масштабах является энергозатратная и дорогостоящая технологии их получения [11, 12], а также обеспечение равномерности распределения нанодобавок в матрице материала.

Наиболее приемлемым представителем нанодобавок с точки зрения стоимости, способа получения и метода введения в состав, обеспечивающего однородное распределение [13, 14], является графит и его производное – пенографит.

Пенографит обладает частью свойств графена [15–17], но его размеры на порядок выше, что является преимуществом, поскольку размеры частиц пенографита и портландцемента отличаются незначительно. Преобладающий размер частиц портландцемента находится в диапазоне от 5 до 50 мкм, пенографита – 100–500 мкм с крупными порами между слоями. За счет крупных пор

имеется возможность измельчения [18, 19] пенографита до частиц менее 100 мкм.

Материалы и методы

Эффект введения пенографита оценивали по изменению прочности на сжатие цементно-песчаных растворов. Для этого изготавливали образцы, состоящие из вяжущего и песка для строительных работ в соотношении 1:3, поликарбонатного суперпластификатора (СП), пенографита (ПГ) и воды затворения. В качестве вяжущего применяли портландцемент (ПЦ), доменный гранулированный шлак молотый (ДГШ) и их смеси. Сухие компоненты – вяжущее, ПГ и СП всех составов – подвергали совместному перемешиванию в лабораторном истирателе ЛИ-1 в течение 1 минуты для достижения однородного распределения пенографита в вяжущем и его доизмельчения. Воду затворения вводили в количестве, обеспечивающем одинаковую консистенцию теста вяжущего.

Для получения достоверных результатов прочности при сжатии использовали утвержденные методики испытаний [20] с применением поверенного оборудования. Образцы растворов испытывали на сжатие в возрасте 1 сут и 28 сут с момента изготовления после твердения в нормальных условиях (температура воздуха $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха не менее 90 %), а также после тепловлажностной обработки (ТВО) по режиму: равномерный подъем температуры с 20°C до $(85 \pm 5)^\circ\text{C}$ в течение (180 ± 10) мин

со скоростью 15 °С/ч, изотермический прогрев при температуре (85±5) °С – (360±10) мин, остывание образцов в закрытой камере ТВО при отключенном подогреве – (120±10) мин.

Исследуемые составы приведены в табл. 1.

Результаты и обсуждение

Определение прочности на сжатие цементно-песчаного раствора является базовым методом для установления эффективности введения ПГ. По результатам, полученным в данной работе, для дальнейшего исследования будут выбраны наиболее оптимальные дозировки ПЦ и ДГШ в составе вяжущего.

В табл. 2 и на рисунке представлены полученные значения прочности на сжатие цементно-песчаных растворов составов с ПГ и без ПГ.

Исходя из полученных данных, видим, что при введении ПГ происходит прирост прочности на сжатие цементно-песчаного раствора от 4 до 34 % – в возрасте 1 суток, от 20 до 34 % – в воз-

расте 28 суток, от 1 до 11 % – после ТВО в зависимости от рассматриваемого вяжущего.

В первые сутки нормального твердения все составы, содержащие добавку пенографита, имеют прочность на сжатие выше, чем составы без ПГ. Полученные данные подтверждают исследования [19].

Результаты состава № 4 наиболее интересны с точки зрения замещения дорогостоящего компонента растворной смеси – портландцемента более дешевым – молотым доменным гранулированным шлаком. Прочность на сжатие образцов состава № 4 (ПЦ: ДГШ, 40:60 %) в возрасте 28 суток и после ТВО наибольшая среди исследуемых составов. Прочность на сжатие образцов состава № 4 в возрасте 28 суток превышает прочности после ТВО. Однако, прочность на сжатие образцов, хранившихся в нормальных условиях, будет увеличиваться с течением времени, а прочность, полученная после ТВО, не изменится, так как структура закристаллизована полностью и не содержит негидратированных частиц портландцемента и цементного геля.

Таблица 1

Исследуемые составы

№ состава	Вяжущее, %		Суперпластификатор Sika225 (сух.), % от массы вяжущего	Пенографит (ПГ), % от массы вяжущего
	Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ГОСТ 31108-2016 производства ООО «СЛК Цемент»	Доменный гранулированный шлак молотый GreenCems® GGBS-450 ТУ 38.32.22-012-99126491-2017 производства ООО «Мечел-Материалы»		
1	100	0	0,5	0,00
2	80	20		
3	60	40		
4	40	60		
5	20	80		
6	0	100		
1*	100	0	0,5	0,01
2*	80	20		
3*	60	40		
4*	40	60		
5*	20	80		
6*	0	100		

Таблица 2

Прочность на сжатие

№ состава	Прочность на сжатие, МПа		
	После ТВО	Определенная в возрасте, сут	
		1	28
1	63	55	66
2	68	53	78
3	66	46	83
4	63	32	85
5	51	14	64
6	25	9	49
1*	69	65	99
2*	69	56	103
3*	70	48	106
4*	71	36	109
5*	57	20	91
6*	26	14	61

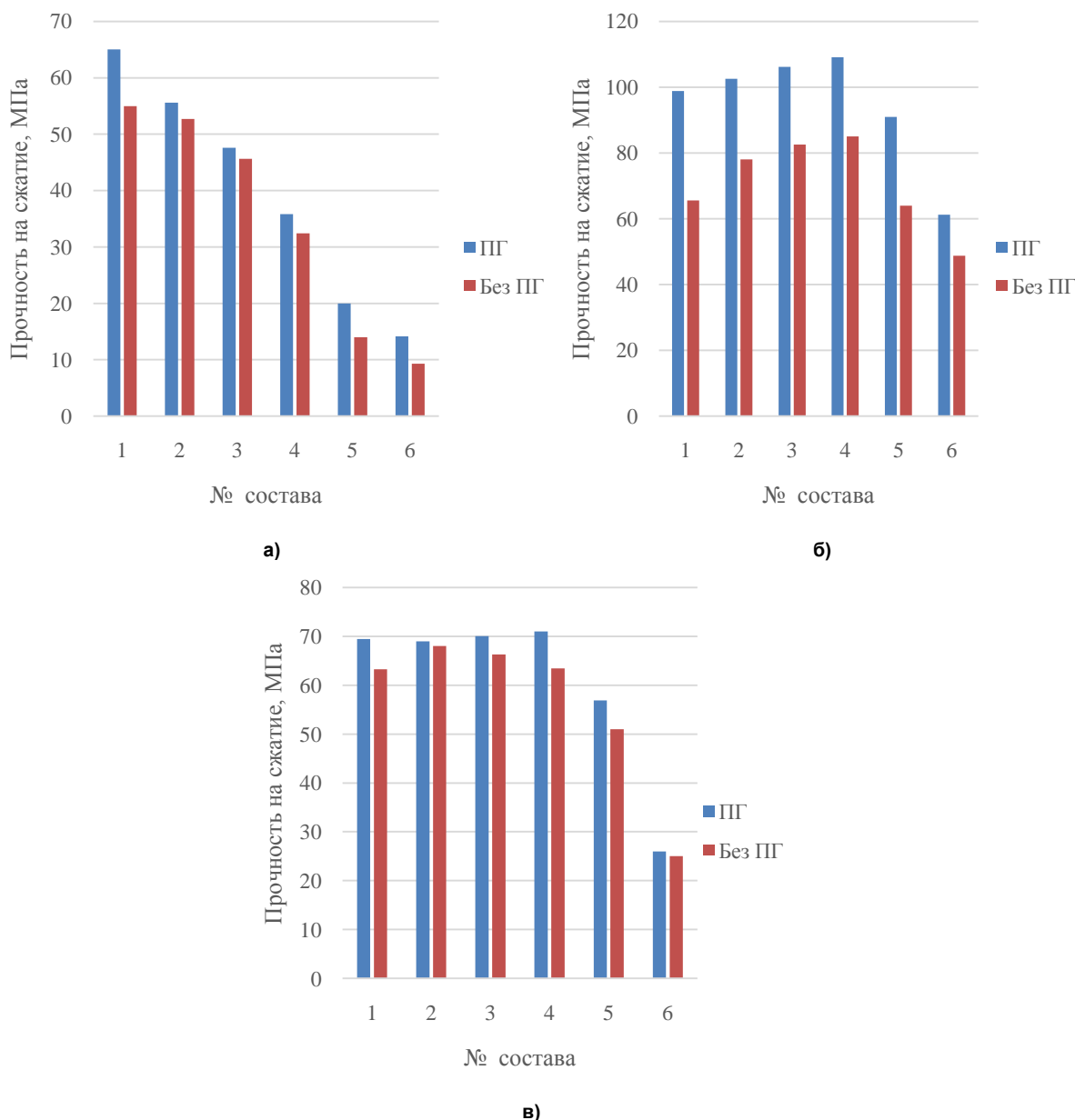


Диаграмма изменения прочности на сжатие цементно-песчаного раствора при введении ПГ: а) через 1 сутки с момента изготовления, б) через 28 суток после изготовления, в) после ТВО

Выводы

Введение ПГ в количестве 0,01 % от массы вяжущего в состав цементно-песчаного раствора приводит к увеличению прочности на сжатие. Наблюдается значительное увеличение прочности при сжатии цементного камня в возрасте 28 суток (до 34 %). Введение ПГ в количестве 0,01 % от массы вяжущего в состав комбинированного вяжущего, состоящего из 20–60 % молотого доменного гранулированного шлака, позволяет получить не только высокие результаты по прочности на сжатие, но и значительно снизить потребление портландцемента, благоприятно воздействуя на экологическую обстановку в мире.

Литература

1. Кондаков, А.И. Перспективы использования окисленного графена в строительных материалах / А.И. Кондаков, З.А. Михалева // Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение: сб. тр. науч.-практ. конф. – Тамбов: ИП Чеснокова А.В., 2015. – С. 55–56.
2. Булатова, И.М. Графен: свойства, получение, перспективы применения в нанотехнологии и нанокompозитах / И.М. Булатова // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 10. – С. 45–48.
3. A novel cement-based hybrid material / A.G. Nasibulin, S.D. Shandakov, L.I. Nasibulina et al. //

New Journal of Physics. – 2009. – № 11. – P. 023013, 2–11.

4. Preparation and mechanical properties of graphene oxide: cement nanocomposites / Fakhim Babak, Hassani Abolfazl, Rashidi Alimorad, P. Ghodousi // *Hindawi Publishing Corporation, The Scientific World Journal.* – 2014. – Vol. 2014. – P. 1–9.

5. Федорова, Г.Д. Исследование устойчивости водной структуры оксида графена / Г.Д. Федорова, Г.Н. Александров, С.А. Смагулова // *Строительные материалы: сб. тр. конф.* – М.: Рекламно-издательская фирма «Стройматериалы», 2015. – Вып. 2. – С. 15–24.

6. Графит, ИГ и ТРГ (краткий обзор). – <http://docplayer.ru/26062756-Grafit-ig-i-trg-kratkiy-obzor.html>.

7. Sheka E.F. Molecular theory of graphene oxide / E.F. Sheka, N.A. Popova // *Phys Chem.* – 2013. – P. 1–22.

8. Makar, J.M. Carbon nanotube/cement composites - early results and potential applications / J.M. Makar, J.C. Margeson, J. Luh // *Proceedings of the 3rd International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, Vancouver, 22–24 August 2005, P. 1–10.*

9. Xia Cuia, Mechanical, thermal and electromagnetic properties of nanographite platelets modified cementitious composites / Xia Cuia, Shengwei Sunb, Baoguo Hana // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* – 2017. – Vol. 93. – P. 49–58.

10. Алексенко, А.Г. Графен / А.Г. Алексеенко. – М.: Изд-во «Лаборатория знаний», 2014. – 177 с.

11. Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide-cement composite / Zhu Pan, Li He, Ling Qiu et al. // *Cement & Concrete Composites.* – 2015. – Vol. 58. – P. 140–147.

12. Snigdha Sharma, Comparative effects of pristine and ball-milled graphene oxide on physico-chemical characteristics of cement mortar nanocomposites / Snigdha Sharma, N.C. Kothiyal // *Construction and Building Materials.* – 2016. Vol. 115. – P. 256–268.

13. Carbon nanotubes and carbon nanofibers for enhancing the mechanical properties of nanocomposite cementitious materials / B.M. Tyson, Rashid K. Abu Al-Rub, Ardavan Yazdanbakhsh, Zachary Grasley // *Journal of Materials in Civil Engineering.* – 2011. – Vol. 23 (7). – P. 1028–1035.

14. Mechanical properties of nanocomposite cement incorporating surface-treated and untreated carbon nanotubes and carbon nanofibers / Rashid K. Abu Al-Rub, Bryan M. Tyson, Ardavan Yazdanbakhsh, Zachary Grasley // *Journal of Nanomechanics and Micromechanics.* – 2012. – Vol. 2(1). – P. 1–6.

15. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene / K.I. Bolotin, K.J. Sikes, Z. Jiang, M. Klima et al. // *Solid State Commun.* – 2008. – Vol. 146. – P. 351–355.

16. Morozov, S.V. Giant intrinsic carrier mobilities in graphene and its bilayer / S.V. Morozov, K.S. Novoselov, M.I. Katsnelson et al. // *Phys. Rev. Lett.* – 2008. – Vol. 100, 016602.

17. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene / C. Lee, X. Wei, J.W. Kysar, J. Hone // *Science.* – 2008. – Vol. 321. – P. 385–388.

18. Pershin, V. Improving functional and environmental performance of Portland cement-based materials by graphene nanostructures / V. Pershin, Ali Mashhadani, Denis Melekhin, A. Osipov // *MATEC Web Conf.* – 2020. – Vol. 315, 06006. – P. 1–8.

19. Аль-шиблави, К.А. Модифицирование цемента малослойным графеном / К.А. Аль-шиблави, В.Ф. Перишин, Т.В. Пасько // *Вектор науки ТГУ.* – 2018. – № 4 (46). – С. 6–11.

20. ГОСТ 310.4-81 Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии (с Изменениями № 1, 2). – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 17 с.

Живцова Регина Айратовна, аспирант кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), reshachoka@mail.ru

Трофимов Борис Яковлевич, профессор кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), tbya@mail.ru

Ахмедьянов Ренат Магафурович, заместитель генерального директора по научной работе ООО «УралНИИСтром» (Челябинск), arm20051@yandex.ru

Живцов Михаил Сергеевич, инженер-исследователь ООО «УралНИИСтром» (Челябинск), sheleznoeslovo@gmail.com

Поступила в редакцию 22 марта 2021 г.

THE EFFECT FROM INTRODUCING GRAPHITE FOAM ON THE STRENGTH OF THE CEMENT-SAND MORTAR

R.A. Zhivtsova¹, reshachoka@mail.ru

B.Ya. Trofimov¹, tbya@mail.ru

R.M. Akhmedyanov², arm20051@yandex.ru

M.S. Zhivtsov², sheleznoeslovo@gmail.com

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

² OOO UralNIIstrom, Chelyabinsk, Russian Federation

This article considers the main effects from introducing graphite foam additives. Graphite foam, the method of its introducing to the composition of mixtures and the dosage have been selected based on low costs but significant efficiency. With the use of graphite foam, high values of physical and mechanical characteristics, when replacing a significant part of Portland cement with waste from metallurgical production, have been achieved. The conducted comparison has revealed an increase in the strength characteristics of the cement stone based on Portland cement, ground granulated blast furnace slag and their mixture during storage under normal conditions and as a result of heat and moisture treatment with the introducing of graphite foam. The composition, containing 60% of granulated blast furnace slag by weight of the binder, provides the greatest effect when adding graphite foam. Based on the obtained results, graphite foam proves to be a competitive additive in comparison with other additives, which are popular in the market. In particular, due to the simple procedure of extracting and adding, the additive of graphite foam is not inferior in efficiency to graphene.

Keywords: Portland cement, granulated blast furnace slag, graphite foam, compressive strength.

References

1. Kondakov A.I., Mikhaleva Z.A. [Prospects of Use the Graphene Oxidized in Construction Materials]. *Grafen i rodstvennyye struktury: sintez, proizvodstvo i primeneniye: sb. tr. nauch.-praktich. konf.* [Graphene and Related Structures: Synthesis, Production and Application: Collection of Articles. Tr. Scientific and Practical Conf.]. Tambov, IP Chesnokova A.V. Publ., 2015, pp. 55–56. (in Russ.)
2. Bulatova I.M. [Graphene: Properties, Production, Prospects of Application in Nanotechnology and Nanocomposites]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the KNRTU], 2011, no. 10, pp. 45–48. (in Russ.)
3. Nasibulin A.G. Shandakov S.D., Nasibulina L.I., Cwirzen A., Mudimela P.R., Habermehl-Cwirzen K., Grishin D.A., Gavrilov Y.V., Malm J.E.M., Tapper U., Tian Y., Pentitala V., Kauppinen E.I. [A Novel Cement-Based Hybrid Material]. *New Journal of Physics*, 2009, vol. 11, iss. 2, pp. 023013/1-11. DOI: 10.1088/1367-2630/11/2/023013
4. Fakhim Babak, Abolfazl Hassani, Alimorad Rashidi, Ghodousi P. [Preparation and Mechanical Properties of Graphene Oxide: Cement Nanocomposites]. *Hindawi Publishing Corporation, The Scientific World Journal*, 2014, vol. 2014, pp. 1–9. DOI: 10.1155/2014/276323
5. Fedorova G.D., Aleksandrov G.N., Smagulova S.A. [Research of Stability of Water Suspension of Graphene Oxide]. *Stroitel'nyye materialy: sb. tr. konf.* [Building Materials: Collection of Articles. Tr. Conf.]. Moscow, Reklamno-izdatel'skaya firma "Stroymaterialy" Publ., 2015, iss. 2, pp. 15–24. (in Russ.)
6. Grafit, IG i TRG (kratkiy obzor) [Graphite, IG and TRG (Short Review)]. Available at: <http://docplayer.ru/26062756-Grafit-ig-i-trg-kratkiy-obzor.html>.
7. Sheka E.F., Popova N.A. [Molecular Theory of Graphene Oxide]. *Phys Chem Chem Phys*, 2013, pp. 1–22. DOI:10.1039/c3cp00032j
8. Makar J. M., Margeson J. C., Luh J. [Carbon Nanotube/Cement Composites – Early Results and Potential Applications]. *Proceedings of the 3rd International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications*, 2005, pp. 1–10.
9. Xia Cui, Shengwei Sun, Baoguo Han [Mechanical, Thermal and Electromagnetic Properties of Nanographite Platelets Modified Cementitious Composites]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, vol. 93, pp. 49–58. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.11.017
10. Aleksenko A.G. *Grafen* [Graphene]. Moscow, 2014. 177 p.
11. Zhu Pan, Li He, Ling Qiu, Asghar Habibnejad Korayem, Gang Li, Jun Wu Zhu, Frank Collins, Dan Li, Wen Hui Duan, Ming Chien Wang [Mechanical Properties and Microstructure of a Graphene Oxide-Cement Composite]. *Cement & Concrete Composites*, 2015, vol. 58, pp. 140–147. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.02.001

12. Snigdha Sharma, Kothiyal N.C. Comparative Effects of Pristine and Ball-Milled Graphene Oxide on Physico-Chemical Characteristics of Cement Mortar Nanocomposites. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 115, pp. 256–268. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.019
13. Tyson B.M., Rashid K. Abu Al-Rub, Ardavan Yazdanbakhsh, Zachary Grasley. Carbon Nanotubes and Carbon Nanofibers for Enhancing the Mechanical Properties of Nanocomposite Cementitious Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2011, vol. 23 (7), pp. 1028–1035. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000266
14. Abu Al-Rub R.K., Tyson B.M., Ardavan Yazdanbakhsh, Zachary Grasley. Mechanical Properties of Nanocomposite Cement Incorporating Surface-Treated and Untreated Carbon Nanotubes and Carbon Nanofibers. *Journal of Nanomechanics and Micromechanics*, 2012, vol. 2(1), pp. 1–6. DOI: 10.1061/(ASCE)NM.2153-5477.0000041
15. Bolotin K.I., Sikes K.J., Jiang Z., Klima M., Fudenberg G., Hone J., Kim P., Stormer H.L. Ultrahigh Electron Mobility in Suspended Graphene. *Solid State Commun*, 2008, vol. 146, pp. 351–355. DOI: 10.1016/j.ssc.2008.02.024
16. Morozov S.V., Novoselov K.S., Katsnelson M.I., Schedin F., Elias D.C., Jaszczak J.A., Geim A.K. Giant Intrinsic Carrier Mobilities in Graphene and its Bilayer. *Physical Review Letters*, 2008, vol. 100, 016602. DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.016602
17. Lee C., Wei X., Kysar J.W., Hone J. Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene. *Science*, 2008, vol. 321, pp. 385–388. DOI: 10.1126/science.1157996
18. Pershin V. Ali Mashhadani, Melekhin D., Osipov A. [Improving Functional and Environmental Performance of Portland Cement-Based Materials by Graphene Nanostructures]. *MATEC Web Conf.* 2020, vol. 315, pp. 06006/1-8.
19. Al'-shiblavi K.A., Pershin V.F., Pas'ko T.V. [Modification of Cement with Low-Layer Graphene]. *Vektor nauki TGU* [Vector of Science of TSU], 2018, no. 4 (46), pp. 6–11. (in Russ.)
20. *GOST 310.4-81 Tsementy. Metody opredeleniya predela prochnosti pri izgibe i szhatii (s Izmeneniyami № 1, 2)* [State Standard 310.4-81 Cements. Methods for Determining the Ultimate Strength in Bending and Compression]. Moscow, Standartinform Publ., 2003. 17 p.

Received 22 March 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Влияние введения пенографита на прочность цементно-песчаного раствора / Р.А. Живцова, Б.Я. Трофимов, Р.М. Ахмедьянов, М.С. Живцов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 36–41. DOI: 10.14529/build210305

FOR CITATION

Zhivtsova R.A., Trofimov B.Ya., Akhmedyanov R.M., Zhivtsov M.S. The Effect from Introducing Graphite Foam on the Strength of the Cement-Sand Mortar. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2021, vol. 21, no. 3, pp. 36–41. (in Russ.). DOI: 10.14529/build210305