

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-499-503>

УДК 691.32:69.04:693.554-486:691.327

Оптимизация состава наноприобетона по вязкости разрушения модификацией матрицы

Е. А. Садовская¹⁾, докт. техн. наук, проф. С. Н. Леонович¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Бетон – квазихрупкий строительный материал, который имеет низкую прочность при растяжении. Процесс его разрушения при нагружении носит неоднородный характер, обусловленный сущностью структуры бетонной массы, состоящей из компонентов с различными физико-механическими свойствами. Постепенное деформирование и разрушение можно охарактеризовать как процесс образования и развития микротрещин. Наличие в бетоне разных по размеру компонентов позволяет рассматривать его строение как многоуровневую систему. В этой системе каждый уровень представляет собой матрицу со своими структурными включениями, которые играют как структурообразующую роль, так и роль концентраторов напряжений при действии механических нагрузок. Критический коэффициент интенсивности напряжений является хорошим показателем трещиностойкости (вязкости разрушения) материала. Нанобетон, с точки зрения многоуровневой системы, представляет собой бетонный композит с ингибиторами распространения трещин на уровне цементирующего вещества (в качестве ингибиторов рассматриваются углеродные нанотрубки). Присутствие фибровых волокон на последующих масштабных уровнях позволяет рассматривать бетон как композит с многоуровневым дисперсным армированием (наноприобетон). В статье рассмотрено изменение показателя вязкости разрушения (трещиностойкости) бетона при дисперсном армировании матрицы на разных структурных уровнях. Приведены результаты испытаний на нормальный отрыв образцов-кубов с надрезами при внецентренном сжатии с определением коэффициента интенсивности напряжений для бетона, модифицированного углеродными нанотрубками, выступающими в качестве ингибиторов распространения трещин на уровне цементирующего вещества (нанобетон), а также для наноприобетонов с дисперсным армированием на уровне мелкозернистого бетона. На основании экспериментальных исследований неравновесными методами механики разрушения предложены композиции наноприобетона максимальной трещиностойкости (вязкости разрушения) с различной концентрацией фибры и несколькими типами матриц, модифицированных наноприобетонными добавками.

Ключевые слова: наноприобетон, трещиностойкость, вязкость разрушения, коэффициент интенсивности напряжений, фибра, наноприобетон, прямой отрыв, нанотрубки, дисперсное армирование

Для цитирования: Садовская, Е. А. Оптимизация состава наноприобетона по вязкости разрушения модификацией матрицы / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 6. С. 499–503. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-499-503>

Optimization of Composition of Nanofiber Concrete in Terms of Fracture Toughness by Matrix Modification

Е. А. Sadovskaya¹⁾, S. N. Leonovich¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Concrete is a quasi-brittle building material that has low tensile strength. The process of its destruction under loading is inhomogeneous, due to the nature of the concrete structure mass, consisting of components with different physical and mechanical properties. Gradual deformation and destruction can be characterized as a process of formation and development of microcracks. The presence of different-sized components in concrete makes it possible to consider its structure as a multi-level system. In this system, each level is a matrix with its own structural inclusions, which play both a structure-forming role and the role of stress concentrators under the action of mechanical loads. The critical stress intensity factor is a good indicator of the crack resistance (fracture toughness) of a material. Nanoconcrete, from the point of view of a multilevel system, is a concrete composite with crack propagation inhibitors at the level of the cementing substance (carbon nanotubes are considered as inhibitors). The presence of fiber fibers at subsequent scale levels allows us to consider concrete as a composite with multi-level dispersed reinforcement (nanofiber concrete). The paper discusses the change of concrete fracture toughness indicator (crack resistance) with dispersed reinforcement of the matrix at different structural levels. The results of tests are

Адрес для переписки

Леонович Сергей Николаевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 368-61-56
sleonovich@mail.ru

Address for correspondence

Leonovich Sergey N.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 368-61-56
sleonovich@mail.ru

presented for normal separation of notched cubes under eccentric compression with the determination of the stress intensity factor for concrete modified with carbon nanotubes acting as crack propagation inhibitors at the level of cementing substance (nanoconcrete), as well as for nanofiber concrete with dispersed reinforcement at the level of fine-grained concrete. Based on experimental studies by non-equilibrium methods of fracture mechanics, compositions of nanofiber-reinforced concrete of maximum crack resistance (fracture toughness) with different fiber concentrations and several types of matrices modified with nanocarbon additives are proposed in the paper.

Keywords: nanofibre concrete, crack resistance, fracture toughness, stress intensity factor, fiber, nanocarbon, direct separation, nanotubes, dispersed reinforcement

For citation: Sadovskaya E. A., Leonovich S. N. (2022) Optimization of Composition of Nanofiber Concrete in Terms of Fracture Toughness by Matrix Modification. *Science and Technique*. 21 (6), 499–503. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-499-503> (in Russian)

Введение

Бетон представляет собой сбалансированную смесь наполнителя (крупного и мелкого) и вяжущего вещества, затворенного водой. Наличие в бетоне разных по размеру компонентов позволяет рассматривать его строение как многоуровневую систему [1, 2]. Структурную модель бетона можно отобразить в виде нескольких масштабных уровней: отдельного кристалла, кристаллического сростка, цементующего вещества, цементного микробетона, мелкозернистого бетона, крупнозернистого бетона. Каждый уровень представляет собой матрицу со своими структурными элементами (включениями). Включения играют как структурообразующую роль, так и роль концентраторов напряжений при действии механических нагрузок [3, 4].

Нанобетон, с точки зрения многоуровневой системы, представляет собой бетонный композит с ингибиторами распространения трещин на уровне цементующего вещества. В качестве ингибиторов рассматриваются углеродные нанотрубки [5–7]. Углеродные нанотрубки – протяженные структуры, представляющие собой свернутые в одно- или многослойную трубку графитовые слои (рис. 1). Присутствие тончайших волокон в твердеющем цементном камне создает условия для эффекта «наноармирования» структуры новообразований в виде спонтанно формирующейся системы гидрокислов клинкерных минералов [8, 9].

В качестве ингибиторов распространения трещин на уровне мелкозернистого бетона могут рассматриваться различные фибровые волокна макроразмера (рис. 2).



Рис. 1. Углеродные нанотрубки [8]

Fig. 1. Carbon nanotubes [8]

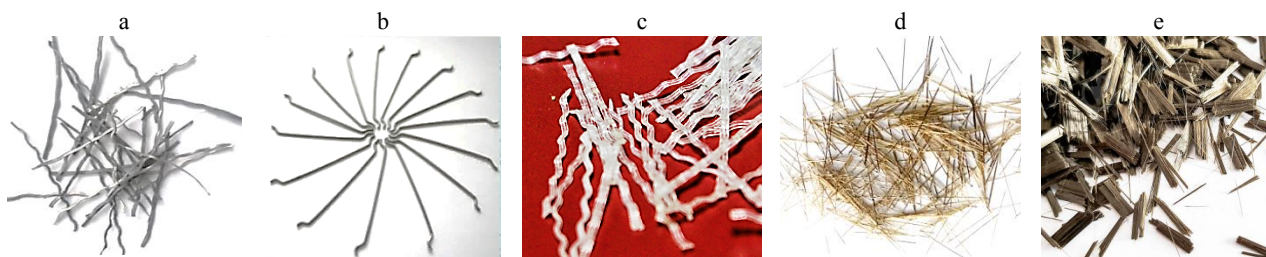


Рис. 2. Фибра: а – из листовой стали волнового профиля (ФЛВ-0,9-50); б – из стальной проволоки с анкерами (ФПА-1,0); в – полимерная волнистая (ФПВ-0,6-40); д – микрофибра прямая из проволоки (ФСВ-М-0,20/12); е – базальтовая (12 мм)

Fig. 2. Fiber: a – from sheet steel of a wave profile (ФЛВ-0.9-50); b – made of steel wire with anchors (ФПА-1.0); c – polymeric wavy (ФПВ-0.6-40); d – straight microfiber from wire (ФСВ-М-0.20/12); e – basalt (12 mm)

Целью исследования являлся подбор нанофибробетонных составов с повышенными показателями трещиностойкости методом сравнительной оценки показателя вязкости разрушения K_{IC} нанофибробетона с разными матрицами и типом дисперсного армирования [10, 11].

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования использовали: портландцемент 500Д20 ОАО «Красносельскстройматериалы», строительный песок I класса, гранитный щебень III группы, сульфаталюминатную добавку РСАМ, конденсированный уплотненный микрокремнезем (МКУ-85), химическую добавку «Реламикс ПК», наномодифицированную химическую добавку «АРТ-Конкрит Р» (водная суспензия наноструктурированного углерода (0,01–20,00 мкм) и пласти-

фикатора), наномодифицированную химическую добавку «РуФикс-500Б».

Образцы изготавливали из составов бетонных смесей, представленных в табл. 1, с добавлением различного типа и количества дисперсных волокон: Ф1 (фибра стальная волновая из листа, 80 кг); Ф2 (фибра стальная проволоочная анкерная, 80 кг); Ф3 (фибра полимерная волнистая, 4 кг); Ф4 (фибра базальтовая, 2 кг), микрофибры стальной прямой (20 кг), фибры стальной анкерной (20 кг); Ф20 (Ф40, Ф60) (фибра стальная волновая из листа, 20, 40, 60 кг).

Для испытаний использовали образцы-кубы размерами 100×100×100 мм с симметричными надрезами глубиной $h/4$ (h – высота куба), выполненными режущими инструментами с алмазным напылением. Испытания проводили при внецентренном сжатии (рис. 3).

Таблица 1

Рецептуры исследуемых составов
Formulations of the studied compositions

Состав	Цемент, кг	РСАМ/МКУ-85, кг	Щебень, кг, фракции		Песок, кг	Химическая добавка, кг (% от массы вяжущего)		
			5–20 мм	5–10 мм		«АРТ-Конкрит Р»	«РуФикс-500Б»	«Реламикс ПК»
А-Ф0	400	–	1020	–	820	3,20 (0,80)	–	–
Б-Ф0	445	–	1035	–	820	2,22 (0,50)	–	–
В-Ф0	460	–	–	880	950	3,22 (0,70)	–	–
Г-Ф0	485	40/45	–	825	800	4,65 (0,70)	–	–
Д-Ф0	400	–	1020	–	800	–	1,70 (0,40)	–
Ж-Ф0	445	–	1035	–	820	–	4,00 (0,90)	–
И-Ф0	485	55/0	830	–	835	–	4,32 (0,80)	–
К-Ф0	485	40/45	–	825	800	–	5,82 (1,00)	–
С-Ф0	425	–	1070	–	750	–	–	2,4 (0,5)

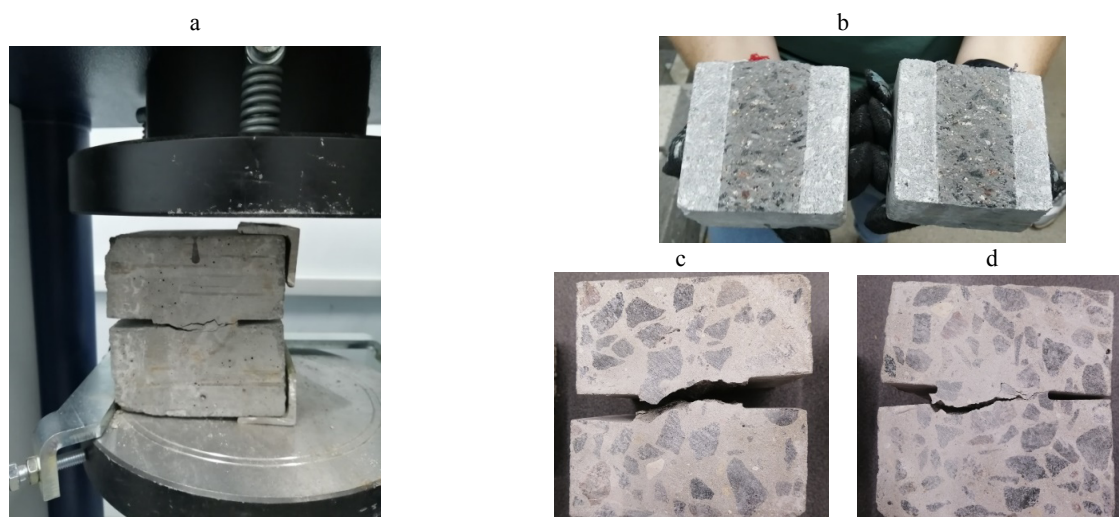


Рис. 3. Испытание на нормальный отрыв по кубам с надрезом: а – внешний вид испытания; б – половинки образца после испытаний; с – испытанный бетонный образец; д – испытанный нанофибробетонный образец

Fig. 3. Normal pull test on notched cubes: a – appearance of the test; b – sample halves after testing; c – tested concrete sample; d – tested nanofiber concrete sample

Нагружение осуществляли до момента разделения образца на две части или образования трещины, регистрировали значение разрушения F_{IC} . Рассчитаем критический коэффициент интенсивности напряжения на нормальный отрыв

$$K_{IC} = \frac{F_{IC}}{bh^{1/2}} \left[18,3 \left(\frac{a}{h} \right)^{1/2} - 430 \left(\frac{a}{h} \right)^{3/2} + 3445 \left(\frac{a}{h} \right)^{5/2} - 11076 \left(\frac{a}{h} \right)^{7/2} + 12967 \left(\frac{a}{h} \right)^{9/2} \right], \quad (1)$$

где F_{IC} – нагрузка, при которой происходит разрушение, МН; b – ширина образца, м; h – высота образца, м; a – глубина надреза, м, $a = h/4$.

Результаты испытаний

На рис. 4, 5 приведены результаты испытаний коэффициентов интенсивности напряжений нанобетона и бетона. Видно, что их изменение находится в пределах от 0,68 до 1,66 МПа√м.

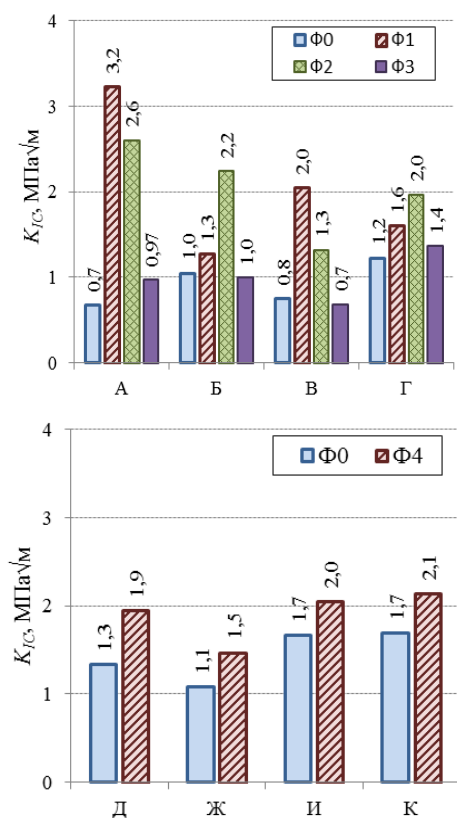


Рис. 4. Коэффициент интенсивности напряжений нанобетона с разным типом дисперсного армирования

Fig. 4. Stress intensity factor of nanoconcrete with different types of dispersed reinforcement

В нанобетонных матрицах с добавкой «Ру-Фикс-500Б» (Д, Ж, И, К) показатель вязкости разрушения в среднем на 35 % больше, чем в матрицах с добавкой «АртКонкрит Р» (А, Б, В, Г). В составе А наибольшее значение K_{IC} удалось получить при использовании стальных дисперсных волокон Ф1 (3,37 МПа√м – на 390 %) и волокон из стальной проволоки Ф2 (2,60 МПа√м – на 280 %). В составе Б наилучший показатель вязкости разрушения получен в случае применения стальной проволоочной фибры Ф2 (2,24 МПа√м – на 110 %). В составе В максимальное значение K_{IC} получено при фибровом армировании типа Ф1 (2,05 МПа√м – на 110 %). Фибровое армирование в составе Г оказало немного меньший прирост K_{IC} , чем в предыдущих составах. Наибольший прирост показателя трещиностойкости получен с фибрами Ф2 (1,97 МПа√м – на 74 %) и Ф1 (1,61 МПа√м – на 38 %). Комплексное фибровое армирование Ф4 способствовало приросту показателя вязкости разрушения в составах Д, Ж, И, К на 23, 36, 23, 27 % соответственно.

Величина коэффициента интенсивности напряжений бетона на 32–137 % меньше, чем нанобетона. Повышение количества фибровых волокон в составе С способствует увеличению на 32 % значения K_{IC} – до 0,7 МПа√м при Ф40 и Ф60.

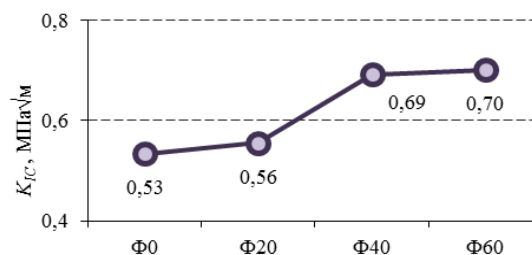


Рис. 5. Коэффициент интенсивности напряжений бетона (состав С) с разной концентрацией фибры

Fig. 5. Stress intensity factor of concrete (composition C) with different fiber concentrations

ВЫВОД

На основании экспериментальных исследований неравновесными методами механики разрушения предложены композиции нанобетона максимальной трещиностойкости (вязкости разрушения) с различной концентрацией фибры и несколькими типами матриц, модифицированных нанокремнеземными добавками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садовская, Е. А. Многоуровневая структура бетона: анализ и классификация уровней организации структуры конгломератных строительных композитов / Е. А. Садовская, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович // Проблемы современного строительства: материалы Междунар. науч.-техн. конф., 28 мая 2019 г. Минск: БНТУ, 2019. С. 285–297.
 2. Баженов, Ю. М. Наноматериалы и нанотехнологии в современной технологии бетонов / Ю. М. Баженов, В. Р. Фаликман, Б. И. Булгаков // Вестник МГСУ. 2012. № 12. С. 125–133.
 3. Чернышов, Е. М. Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов. Ч. 2. К проблеме концептуальных моделей наномодифицирования структуры / Е. М. Чернышов, О. В. Артамонова, Г. С. Славчева // Строительные материалы. 2014. № 4. С. 73–83.
 4. Optimum Compositions of Crack-Stability and Waterproof Concrete for the Reliability and Durable Constructions of Bridges [Electronic Resource] / A. Plugin [et al.] // 7th International Conference on Bridges Across the Danube 2010. Sofia. Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/331473908>.
 5. Фаликман, В. Р. «Простор за пределом», или Как нанотехнологии могут изменить мир бетона. Ч. 2 [Электронный ресурс] / В. Р. Фаликман, К. Г. Соболев // Нанотехнологии в строительстве. 2011. № 2. Режим доступа: https://www.nanonewsnet.ru/files/nanobuild_1_2011.pdf.
 6. Садовская, Е. А. Многопараметричная методика оценки показателей качества нанофибробетона для строительной площадки / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович, Н. А. Будревич // Бетон и железобетон. 2021. № 4. С. 20–28.
 7. Fracture Toughness of Carbon Nanotubes Cement Based Materials Modified / S. A. Zhdanok [et al.] // Вестник БрГТУ. 2021. № 3. С. 48–53. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2021-126-3-48-53>.
 8. Нанотехнологии в строительном материаловедении: реальность и перспективы / С. А. Жданок [и др.] // Вестник Белорусского национального технического университета. 2009. № 3. С. 5–22.
 9. Влияние пластифицирующей добавки на основе наноструктурированного углерода в самоуплотняющейся бетонной смеси на ее технологические свойства / С. А. Жданок [и др.] // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92, № 2. С. 391–396.
 10. Критический коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве для нанофибробетона / Е. А. Садовская [и др.] // Строительные материалы. 2021. № 9. С. 41–46. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-41-46>.
 11. Прочность нанофибробетона на растяжение / Е. А. Садовская [и др.] // Инженерно-физический журнал. 2020. Т. 93, № 4. С. 1051–1055.
- Поступила 14.04.2022
Подписана в печать 29.06.2022
Опубликована онлайн 30.11.2022

REFERENCES

1. Sadovskaya E. A., Polonina E. N., Leonovich S. N. (2019) Multilevel Structure of Concrete: Analysis and Classifica-

tion of Levels on Organization of Conglomerate Building Composite Structure. *Problemy Sovremennogo Stroitel'stva: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.*, 28 Maya 2019 g. [Problems of Modern Construction: Proceedings of International Scientific and Technical Conference, May 28, 2019]. Minsk, Belarusian National Technical University, 285–297 (in Russian).

2. Bazhenov Yu. M., Falikman V. R., Bulgakov B. I. (2012) Nanomaterials and Nanotechnologies in Modern Concrete Technology. *Vestnik MGSU* [Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering], (12), 125–133 (in Russian).
3. Chernyshov E. M., Artamonova O. V., Slavcheva G. S. (2014) Concepts and Foundations of Technologies for Nanomodification of Building Composite Structures. Part 2. On the Problem of Conceptual Models of Structure Nanomodification. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*, (4), 73–83 (in Russian).
4. Plugin A., Plugin A., Romanenko O., Kalinin O. (2010) Optimum Compositions of Crack-Stability and Waterproof Concrete for the Reliability and Durable Constructions of Bridges. *7th International Conference on Bridges Across the Danube 2010*. Sofia. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/331473908>.
5. Falikman V. R., Sobolev K. G. (2011) “Space Beyond”, or How Nanotechnology Can Change the World of Concrete. Part 2. *Nanotekhnologii v Stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction*, (2). Available at: https://www.nanonewsnet.ru/files/nanobuild_1_2011.pdf (in Russian).
6. Sadovskaya E. A., Leonovich S. N., Budrevich N. A. (2021) A Multiparametric Method for Evaluating the Quality Indicators of Nano-Fiber-Concrete for a Construction Site. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (4), 20–28 (in Russian).
7. Zhdanok S. A., Polonina E. N., Sadovskaya E. A., Leonovich S. N. (2021) Fracture Toughness of Carbon Nanotubes Cement Based Materials Modified. *Vestnik BrGTU = Vestnik of Brest State Technical University. Civil Engineering and Architecture*, (3), 48–53. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2021-126-3-48-53>.
8. Zhdanok S. A., Khrustalev B. M., Batyanovskii E. I., Leonovich S. N. (2009) Nanotechnologies in Building Materials Science: Reality and Prospects. *Vestnik Belorusskogo Natsionalnogo Tekhnicheskogo Universiteta* [Bulletin of Belarusian National Technical University], (3), 5–22 (in Russian).
9. Zhdanok S. A., Polonina E. N., Leonovich S. N., Khrustalev B. M., Koleda E. A. (2019) Influence of the Nanostructured-Carbon-Based Plasticizing Admixture in a Self-Compacting Concrete Mixture on its Technological Properties. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 92 (2), 376–382. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-01941>.
10. Sadovskaya E. A., Polonina E. N., Leonovich S. N., Zhdanok S. A., Potapov V. V. (2021) Critical Stress Intensity factor at Normal Separation for Nanofiber-Concrete. *Stroitelnye Materialy = Construction Materials*, (9), 41–46. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-41-46> (in Russian).
11. Sadovskaya E. A., Leonovich S. N., Zhdanok S. A., Polonina E. N. (2020) Tensile Strength of Nanofibrous Concrete. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 93 (4), 1015–1119. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02202-8>.

Received: 14.04.2022

Accepted: 29.06.2022

Published online: 30.11.2022