



Изменение энергозатрат постциклического деформирования цементных композитов

Б.И. Пинус¹, И.Г. Корнеева² ✉

^{1,2}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментально-аналитического обобщения энергетических затрат на деформирование и разрушение бетонов и полипропиленфиброармированных бетонов, предварительно подвергнутых циклическим нагрузкам различной амплитуды и продолжительности. Предложена многокомпонентная модель затрат (работы), учитывающая физические закономерности процесса монотонного сжатия, и установлена неоднозначность их изменений в циклических воздействиях. Испытанию подвергнуты стандартные призматические образцы (100 × 100 × 400 мм) двух серий в исходном и постциклическом состояниях: группа «А» – N = 200 циклов с амплитудой $\eta = 0,6$ и группа «В» – 50 циклов при $\eta = 0,8$. Использована оригинальная методика многофакторного автоматизированного контроля параметров сопротивления в циклическом режиме различной интенсивности и в постциклическом сопротивлении при осевом сжатии, позволяющая более адекватно моделировать процессы взаимодействия с внешней средой и анализировать их последствия. Испытания выполнялись на комплексе «Instron-5989» с автоматическим управлением процесса по специально разработанной программе и записью всех контролируемых параметров в соответствии с диаграммным методом расчета прочности железобетонных элементов. Подтверждена высокая чувствительность и информативность энергетических показателей с возможностью их использования при разработке функциональных критериальных моделей малоциклового усталости.

Ключевые слова: малоцикловая усталость, энергетические затраты, нестационарные воздействия, бетон, фибробетон

Для цитирования: Пинус Б.И., Корнеева И.Г. Изменение энергозатрат постциклического деформирования цементных композитов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 1. С. 64–69. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-1-64-69>.

Original article

Changes in energy costs of post-cyclic deformation of cement composites

Boris I. Pinus¹, Inna G. Korneeva² ✉

^{1,2}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The paper presents the results of experimental and analytical generalization of energy costs for deformation and destruction of concretes and polypropylene-fibro-reinforced concretes, previously subjected to cyclic loads of various amplitudes and durations. A multicomponent model of costs (work) with regard to the physical regularities of monotonic compression process was proposed, and the ambiguity of their changes in cyclic tests was established. Standard prismatic samples (100 × 100 × 400 mm) of two series in the initial and post-cyclic states were tested: group "A" – N = 200 cycles with amplitude $\eta = 0.6$ and group "B" – 50 cycles with $\eta = 0.8$. The study involved an original methodology of multifactor automated control of resistance parameters in cyclic mode of different intensity and in post-cyclic resistance under axial compression, which enables the processes of interaction with the external environment to be more adequately modeled and their consequences to be analyzed. The tests were carried out using an "Instron-5989" complex with automatic process control within a specially developed program and with records of all monitored parameters conforming to the diagram method for calculating the strength of reinforced concrete elements. Energy indicators proved their high

© Пинус Б.И., Корнеева И.Г., 2023

sensitivity and informativity, as well as the possibility to be used for developing functional criteria-based models of low cycle fatigue.

Keywords: low-cycle fatigue, energy costs, non-stationary impacts, concrete, fiber concrete

For citation: Pinus B.I., Korneeva I.G. Changes in energy costs of post-cyclic deformation of cement composites. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(1):64-69. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-1-64-69>.

ВВЕДЕНИЕ

Технический регламент по обеспечению безопасности зданий и сооружений предусматривает в качестве одного из недопустимых предельное состояние по усталостному разрушению.

Сложность его практической реализации при проектировании обусловлена отсутствием комплексного подхода, учитывающего физическую природу и случайный характер воздействий, неоднозначность индуцируемых откликов и их последствий в форме критериальных предельно допустимых изменений параметров работоспособности конструкций.

Неоднозначный по структуре и разноплановый по кинетике напряженно-деформационный отклик цементных композитов предопределяет целесообразность использования в качестве критериальных усталостных изменений интегральных (обобщающих) показателей внутреннего сопротивления. В частности, имеются предложения [1–9] рассматривать взаимодействие конструкций с внешней средой как процесс необратимого поглощения и рассеивания энергии вследствие возникновения внутреннего трения при деформировании структурно-неоднородных конструктивных материалов. При таком подходе коэффициент поглощения энергии или вязкость разрушения может рассматриваться показателем усталостного сопротивления. Необходимо отметить, что ГОСТ 29167-91¹ определяет вязкость разрушения как характеристику трещиностойкости бетонов в удельных энергетических (силовых) затратах на образование трещин и разрушение образцов с априори инициируемой критической трещиной. Это не соответствует фактическому стохастическому распределению структурных несовершенств и кумулятивному процессу накопления усталостных повреждений.

В представленном ниже исследовании была использована оригинальная методика многофакторного автоматизированного контроля

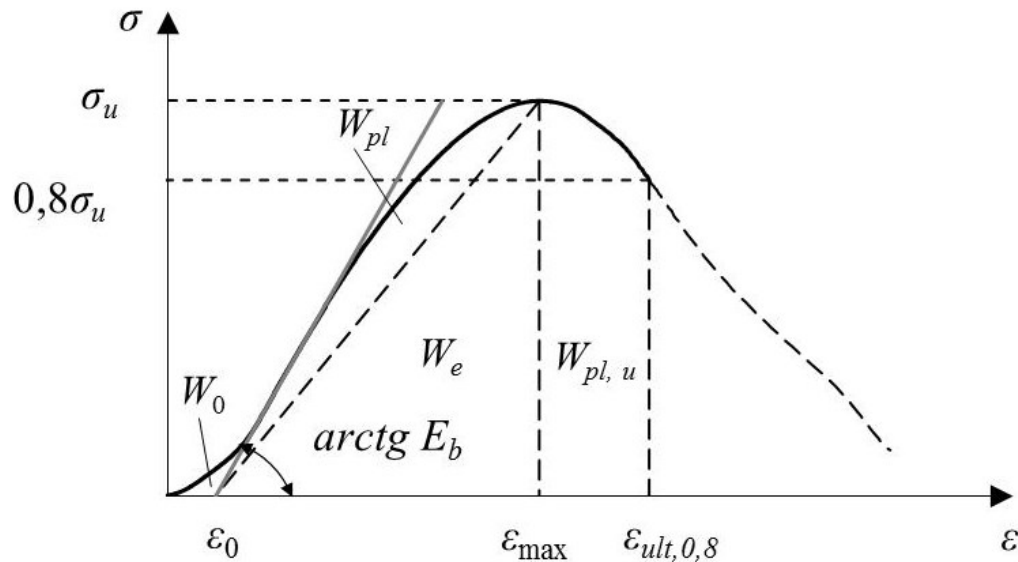
параметров сопротивления в циклическом режиме различной интенсивности и в постциклическом сопротивлении при осевом сжатии, позволяющая более адекватно моделировать процессы взаимодействия с внешней средой и анализировать их последствия.

МЕТОДЫ

Основой вероятностно-статического анализа усталостных изменений энергетических затрат являются экспериментальные «семейства» диаграмм $\sigma_b - \varepsilon_b$ стандартных призматических образцов (100 × 100 × 400 мм) двух серий в исходном и постциклическом состояниях. Образцы нормальных условий твердения изготовлены из бетона состава Ц:П:Щ:В = 1:1,42:3,57:0,55, Ц = 380 кг/м³ (серия «ОБ») и фибробетона (серия «ФБ») – аналогичного состава с дисперсным объемным армированием ($\mu = 1,5\%$) полипропиленовыми волокнами ($d_f = 0,8$ мм и $l_f = 40$ мм).

В двухмесячном возрасте образцы были подвергнуты циклическим воздействиям различной интенсивности и продолжительности с соблюдением примерной тождественности энергетических затрат (группа «А» – N = 200 циклов с амплитудой $\eta = 0,6$ и группа «В» – 50 циклов при $\eta = 0,8$). На последних циклах воздействий производилось монотонное нагружение с постоянной скоростью деформирования (0,004 мм/с) вплоть до разрушения. Все испытания выполнялись на комплексе «Instron-5989» с автоматическим управлением процесса по специально разработанной программе и записью всех контролируемых параметров в соответствии с диаграммным методом расчета прочности железобетонных элементов. Испытательный комплекс позволяет получать полные диаграммы сжатия, включая начальные (ε_0) и деформации нисходящей ветви ($\varepsilon_{ult,0,8}$). С учетом целевых задач исследования затрачиваемая энергия ранжировалась в соответствии с физическими закономерностями деформирования (рисунок) на четыре этапа.

¹ГОСТ 29167-91 Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. М.: Изд-во стандартов, 2004. 14 с.



Структурная модель энергозатрат

Структурная модель энергозатрат (рисунок):

$$W = W_0 + W_e + W_{pl} + W_{pl,u}; W_u = W_0 + W_e + W_{pl}$$

где компоненты соответствовали работе первоначального уплотнения структуры (W_0), стадиям упругого (W_e), пластического (W_{pl}) деформирования и самоускоряемого разрушения ($W_{pl,u}$). Их разделение осуществлялось в автоматическом режиме в соответствии с разработанной программой испытаний. Количество (12–16 штук) образцов на каждом этапе позволяло анализировать статистические закономерности распределения энергетических затрат. Их исходные значения по критериям сходимости Колмогорова² соответствуют нормальному распределению, значимые статисти-

ки которого приведены в табл. 1.

При существенных различиях общих энергетических затрат (из-за снижения прочности фиброкомполитов), оба состава характеризуются сравнительным сходством относительных затрат на компоненты принятой энергетической модели.

Исключение составляют затраты W_0 , что объяснимо повышенной структурной неоднородностью фибробетонов и неоднозначностью последствий на начальном этапе приспособляемости [10–14].

Энергетические затраты деформирования и разрушения при сжатии после «ЦВ» различной интенсивности и их структурно-компонентная кинетика характеризуется данными, приведенными в табл. 2.

Таблица 1. Статистические показатели параметров в исходном состоянии

Table 1. Statistical indicators of parameters in the initial state

Параметр	Ед. изм.	Статистики распределения серий					
		«ОБ»			«ФБ»		
		Среднее	Коэффициент вариации, %	Диапазон 95% обеспеченности	Среднее	Коэффициент вариации, %	Диапазон 95% обеспеченности
W	кПа·мм/мм	89	5	80–98	65	10	52–77
W_u		63	10	50–75	46	13	34–58
W_0		0,074	56	0,01–0,15	0,29	46	0,02–0,56
W_e		51	10	41–61	38	12	28–47
W_{pl}		12	17	8–16	8	19	5–11
$W_{pl,u}$		26	22	15–38	16	16	11–22
W_e/W_u	—	0,81	3	0,77–0,85	0,82	2	0,79–0,86
W_{pl}/W_u	—	0,19	11	0,15–0,23	0,17	11	0,13–0,20
W_u/W	—	0,7	9	0,58–0,82	0,74	3	0,7–0,78
$W_{pl,u}/W$	—	0,3	20	0,18–0,42	0,26	8	0,22–0,3

Таблица 2. Энергозатраты постциклического сжатия и их кинетика
Table 2. Energy consumption of post-cyclic compression and their kinetics

Параметры «ЦВ»		Серия	Относительные изменения энергозатрат (кПа·мм/мм) и их изменение (%)										Соотношения	
			W		W_u		W_e		W_{pl}		$W_{pl,u}$			
η	N		Ср.	K_W	Ср.	K_{Wu}	Ср.	K_{We}	Ср.	K_{Wpl}	Ср.	$K_{Wpl,u}$	$\frac{W_{pl}}{W_u}$	$\frac{W_{pl} + W_{pl,u}}{W}$
0,6	200	ОБ	70,1	0,78	49,5	0,79	39,0	0,77	10,6	0,89	20,5	0,77	0,21	0,43
		ФБ	65,3	1,01	44,0	0,96	33,8	0,90	10,2	1,31	21,1	1,27	0,23	0,37
0,8	50	ОБ	56,0	0,63	38,5	0,61	32,5	0,64	6,1	0,56	17,3	0,65	0,16	0,38
		ФБ	49,0	0,76	34,3	0,75	28,0	0,74	5,9	0,75	14,6	0,88	0,17	0,42

Они свидетельствуют о высокой чувствительности энергетических показателей к многократным динамическим воздействиям и определяющем влиянии амплитуды на инициируемые последствия. Умеренная интенсивность ($\eta = 0,6$) способствует сближению энергетических потенциалов с разнонаправленной кинетикой изменений – снижением у обычного и стабильности у фиброармированного бетонов. При этом наблюдается тождественность изменения компонентов первого («ОБ») и внутрискруктурная трансформация энергии фибробетонов, у которых происходит практически компенсационное перераспределение части затрат с упругого на пластическое деформирование (W_{pl}) и разрушение ($W_{pl,u}$). Высокая интенсивность цикловых нагрузок с амплитудой « η », близкой к верхней границе R_{cr}^v , ведет к ускоренной усталостной деструкции с необратимыми последствиями. Как следствие, происходит снижение всех компонентов энергетических затрат при постциклическом сжатии. При этом фиброкомпозиты отличаются более умеренной динамикой снижения, преимущественно за счет пластического компонента сопротивления.

Дискретный анализ энергетических затрат

позволяет оценивать и демпфирующую способность конструктивных материалов. Полагая, что рассеивание энергии вынужденных колебаний происходят за счет пластических (псевдопластических) деформаций и внутреннего трения³ [15–17], доля пластических (W_{pl} / W_u) и суммарных необратимых ($(W_{pl} + W_{pl,u}) / W_u$) затрат будет характеризовать потенциал демпфирования, а их постциклические изменения – усталостную устойчивость композитов. Сопоставление этих параметров (табл. 1 и 2) однозначно подтверждает повышенный потенциал демпфирования полипропилен-фиброармированных композитов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Энергетические показатели внутреннего сопротивления цементных композитов являются чувствительными и информативными показателями изменений при нестационарных механических воздействиях и могут рассматриваться как критериальная основа малоциклового усталости.

2. Оптимальное дисперсное армирование бетонов мелкозернистыми полипропиленовыми волокнами повышает их усталостную сопротивляемость и демпфирующую способность.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Cachim P.B., Figueiras J.A., Pereira P.A.A. Fatigue behavior of fiber-reinforced concrete in compression // Cement and Concrete Composites. 2002. Vol. 24. No. 2. P. 211–217. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00019-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00019-1).
2. Castillo E., Fernandez-Cantelli A., Ruiz-Ripoll M.L. A general model for fatigue damage due to any stress history // International Journal of Fatigue. 2008. Vol. 30. Iss. 1. P. 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2007.02.011>.
3. Gao L., Hsu T.C.C. Fatigue of concrete under uniaxial compression cyclic loading // Materials Journal. 1998. N 95 (5). P. 575–581.

<https://doi.org/10.14359/407>.

4. Ghosni N., Samali B., Vessalas K. Evaluation of structural behaviour of polypropylene fibre reinforced concrete beam under cyclic loading // 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23) Byron Bay, Australia (9-12 December 2014). S.T. Smith (Ed.). 2014. P. 1–8.
5. Huang B.-T., Li Q., Xu S., Zhou B. Effect of loading frequency on the fatigue behavior of ultra-high toughness cementitious composites in compression // 14th International Conference on Fracture 2017 (ICF-14) (18-23 June, 2017, Rhodes, Greece).

³Корчинский И.Л., Беченева Г.В. Прочность строительных материалов при динамических нагружениях: пособие для проектировщиков. М.: Стройиздат, 1966. 212 с.

2017. Vol. 1. Part A. P. 287–288. Ed.: E.E. Gdoutos. Curran Associates, Inc. 57 Morehouse Lane. Red Hook, NY 12571.

6. Isojeh B., El-Zeghayar M., Vecchio F.J. Concrete damage under fatigue loading in uniaxial compression // *Aci Materials Journal*. 2017. Vol. 114. No. 2. P. 225–235. <https://doi.org/10.14359/51689477>.

7. Lee M.K., Barr B.I.G. An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2004. Vol. 26. Iss. 4. P. 299–305. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00139-](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00139-9)

8. Беченева Г.В. Прочность бетона при немногочисленных повторных нагружениях // Исследования по сейсмостойкости зданий и сооружений. Тр. Центрального научно-исследовательского института строительных конструкций. 1961. Вып. 6. С. 91–118.

9. Барашиков А.Я., Шевченко Б.Н., Валовой А.И. Малоцикловая усталость при сжатии // Бетон и железобетон. 1985. № 4. С. 27–28.

10. Li C.Y., Song Y.P. Study of residual strain of concrete under fatigue loading // *Journal of Dalian University of Technology*. 2001. Vol. 41. No. 3. P. 355–358.

11. Liu F., Zhou J. Research on fatigue strain and fatigue modulus of concrete // *Advances in Civil En-*

gineer-ing. 2017. Vol. 2017. P. 6272906. <https://doi.org/10.1155/2017/6272906>.

12. Von der Haar C., Marx S. A strain model for fatigue loaded concrete // *Structural Concrete*. 2017. Vol. 19. Iss. 2. P. 463–471. <https://doi.org/10.1002/suco.201700029>.

13. Wang H.L. Song Y.P. Fatigue capacity of plain concrete under fatigue loading with constant confined stress // *Materials and Structures*. 2011. Vol. 44. No. 1. P. 253–262. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9624-6>.

14. Zhang J., Stang H., Li V.C. Experimental study on crack bridging in FRC under uniaxial fatigue tension // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2000. Vol. 12. No. 1. P. 66–73. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)08991561\(2000\)12:1\(66\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)08991561(2000)12:1(66)).

15. Кузовчикова Е.А., Яшин А.В. Исследование влияния малоцикловых сжимающих воздействий на деформативность, прочность и структурные изменения бетона // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1976. № 10. С. 30–35.

16. Москвитин В.В. Циклическое нагружение элементов конструкций. М.: Наука, 1981. 344 с.

17. Яшин А.В. Некоторые данные о деформациях и структурных изменениях бетона при осевом сжатии // Новое о прочности железобетона. М.: Стройиздат, 1977. С. 17–30.

REFERENCES

1. Cachim P.B., Figueiras J.A., Pereira P.A.A. Fatigue behavior of fiber-reinforced concrete in compression. *Cement and Concrete Composites*. 2002;24(2):211-217. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00019-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00019-1).

2. Castillo E., Fernandez-Cantelli A., Ruiz-Ripoll M.L. A general model for fatigue damage due to any stress history. *International Journal of Fatigue*. 2008;30(1):150-164. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2007.02.011>.

3. Gao, L., Hsu, T.C.C. Fatigue of concrete under uniaxial compression cyclic loading. *Materials Journal*. 1998;95:575-581. <https://doi.org/10.14359/407>.

4. Ghosni N., Samali B., Vessalas K. Evaluation of structural behaviour of polypropylene fibre reinforced concrete beam under cyclic loading // 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23) Byron Bay, Australia. 9-12 December 2014. S.T. Smith (Ed.). 2014. P. 1-8.

5. Huang B.-T., Li Q., Xu S., Zhou B. Effect of loading frequency on the fatigue behavior of ultra-high toughness cementitious composites in compression // 14th International Conference on Fracture 2017 (ICF-14) (18-23 June, 2017, Rhodes, Greece). 2017. Vol. 1. Part A. P. 287–288. Ed.: E.E. Gdoutos. Curran Associates, Inc. 57 Morehouse Lane. Red Hook, NY 12571.

6. Isojeh B., El-Zeghayar M., Vecchio F.J. Concrete damage under fatigue loading in uniaxial compression. *Aci Materials Journal*. 2017;114(2):225-235.

<https://doi.org/10.14359/51689477>.

7. Lee M.K., Barr B.I.G. An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2004;26(4):299-305. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00139-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00139-7).

8. Becheneva G. V. Concrete strength under few repeated loads. *Research on earthquake resistance of buildings and structures: Proceedings of the Central Research Institute*. 1961;6:91-118. (In Russ.).

9. Barashikov A.Ya. Shevchenko B.N., Valovoy A.I. Low-cycle fatigue during compression. Concrete and reinforced concrete. 1985;4:27-28. (In Russ.).

10. Li C.Y., Song Y.P. Study of residual strain of concrete under fatigue loading. *Journal of Dalian University of Technology*. 2001;41(3):355-358.

11. Liu F., Zhou J. Research on fatigue strain and fatigue modulus of concrete. *Advances in Civil Engineering*. 2017;2017:6272906. <https://doi.org/10.1155/2017/6272906>.

12. Von der Haar C., Marx S. A strain model for fatigue loaded concrete. *Structural Concrete*. 2017;19(2):463-471. <https://doi.org/10.1002/suco.201700029>.

13. Wang H.L. Song Y.P. Fatigue capacity of plain concrete under fatigue loading with constant confined stress. *Materials and Structures*. 2011;44(1):253-262. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9624-6>.

14. Zhang J., Stang H., Li V.C. Experimental study on crack bridging in FRC under uniaxial fatigue ten-

sion. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2000;12(1):66-73.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2000\)12:1\(66\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:1(66)).

15. Kuzovchikova E.A., Yashin A.V. Investigation of the influence of low-cycle compressive effects on deformability, strength, and structural changes of concrete. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektu-*

ra. 1976;10:30-35. (In Russ.).

16. Moskvitin V.V. Cyclic loading of construction elements. Moscow: Nauka; 1987. 344 p. (In Russ.).

17. Yashin A.V. Some information about the deformations and structural changes of concrete under axial compression. In: *Novoe o prochnosti zhelezo-betona*. Moscow: Stroyizdat; 1977. p. 17-30. (In Russ.).

Информация об авторах

Пинус Борис Израилевич,

д.т.н., профессор, профессор кафедры
строительного производства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: pinus@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-3067-9478>

Корнеева Инна Геннадьевна,

к.т.н., доцент кафедры
строительного производства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: kornee-inna@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6130-0195>

Information about the authors

Boris I. Pinus,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor
of the Department of Building Production,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: pinus@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-3067-9478>

Inna G. Korneeva,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
of the Department of Building Production,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: kornee-inna@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6130-0195>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 26.12.2022.
Одобрена после рецензирования 16.01.2023.
Принята к публикации 18.01.2023.

Information about the article

The article was submitted 26.12.2022.
Approved after reviewing 16.01.2023.
Accepted for publication 18.01.2023.