

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

ENGINEERING AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AIRDROMES, AND TUNNELS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 4. С. 211–219.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (4): 211–219.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.21.072:620.16-027.45

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-211-219

EDN: VCARUK

К ВОПРОСУ РЕСУРСНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ

Александр Аверьянович Алексеев¹,
Андрей Владимирович Картопольцев²,
Дмитрий Николаевич Черепанов¹

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия

²ООО «ДИАМОС», г. Томск, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Возрастающее воздействие временной подвижной нагрузки в условиях случайного транспортного потока негативно влияет на работоспособность и долговечность несущих балок пролетных строений мостов. Прогнозирование ресурсной долговечности в условиях возможного наступления предельного состояния балок является актуальной задачей современности.

Цель работы: решение задачи качественной оценки ресурсной долговечности несущих балок на основе вероятности изменения технического состояния и работоспособности.

Результаты. Полученные расчетные параметры дискретной надежности эксплуатационного состояния несущих балок пролетных строений в условиях физического и морального износа позволяют оценить ресурсный резерв прочности.

Ключевые слова: надежность, ремонтпригодность, ресурсная долговечность, остаточный ресурс, срок службы, физический износ

Для цитирования: Алексеев А.А., Картопольцев А.В., Черепанов Д.Н. К вопросу ресурсной долговечности пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 4. С. 211–219. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-211-219. EDN: VCARUK

ORIGINAL ARTICLE

TOWARDS RESOURCE DURABILITY OF BRIDGE SPANS

Aleksandr A. Alekseev¹, Andrey V. Kartopoltsev², Dmitrii N. Cherepanov¹

¹Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

²ООО "DIAMOS", Tomsk, Russia

Abstract. The paper studies durability of metal bridge spans as resource reliability and operability characterized by their performance specifications and maintainability before the limiting state. The ultimate condition of superstructures, in which further operation is impractical without restoration work to ensure operation conditions. The qualitative assessment of the resource durability of superstructures is based on the supposition that they maintain the normative operability at least for the specified operational period from incubation and service life to residual resource, indicating the possibility of removing the superstructure beyond the "serviceable" limit.

Keywords: reliability, maintainability, resource durability, residual life, service life, physical wear

For citation: Alekseev A.A., Kartopoltsev A.V., Cherepanov D.N. Towards Resource Durability of Bridge Spans. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturo-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (4): 211–219. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-211-219. EDN: VCARUK

Вероятностный подход к оценке долговечности несущих конструкций пролетных строений металлических мостов рассматривается на основе теории надежности и методов статистической динамики, учитывающей случайный характер нагружения и спектра воздействия нагрузок. Таким образом, вероятностная оценка надежности и есть долговечность несущих элементов пролетных строений. Временной интервал долговечности рассматривает надежность в начальный момент времени, определяемый коэффициентом безопасности как элемент дискретной надежности по истечении времени эксплуатации, а остаточная долговечность рассматривается до нормативного срока службы моста. Расчетным параметром долговечности в начальный момент времени теории надежности является расчётная прочность материала балок пролетных строений (R), гарантирующая нормальную работу конструкции в стадии предельного состояния с обеспеченностью не ниже 0,95 при нормальном законе распределения [1]:

$$R = m_s - 1,64\sigma_s; \quad m_s = (1 - 1,64\gamma_s), \quad (1)$$

где σ_s , m_s – среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации прочности материала; $\gamma_s = 0,059 - 0,061$; $m_s = 190 - 420$ МПа.

Разделение расчетной величины R на две основные группы позволяет решить задачу расчета конструкции пролетных строений на безопасность

и определить последующие условия безотказной работы для оценки служебного и остаточного ресурсов долговечности. Впервые вопрос был рассмотрен в работе в виде результатов научно-исследовательского отчета¹.

Запишем условие

$$R - P \geq 0, \quad (2)$$

где R – обобщенная (расчетная) прочность конструкции; P – обобщенная нагрузка (наибольшее нагружение, значение усилия или максимальные напряжения, выраженные через нагружение).

Тогда резерв прочности для поддержания уровня служебного и остаточного ресурса будет определяться из равенства

$$Z = R - P. \quad (3)$$

Дискретная надежность по истечении времени эксплуатации классифицирует долговечность как форму потери служебного ресурса конструкции пролетного строения. Рассматриваемый этап долговечности пролетных строений моста представляется функцией надежности в какой-то момент времени, графическое изображение которого представлено на рис. 1.

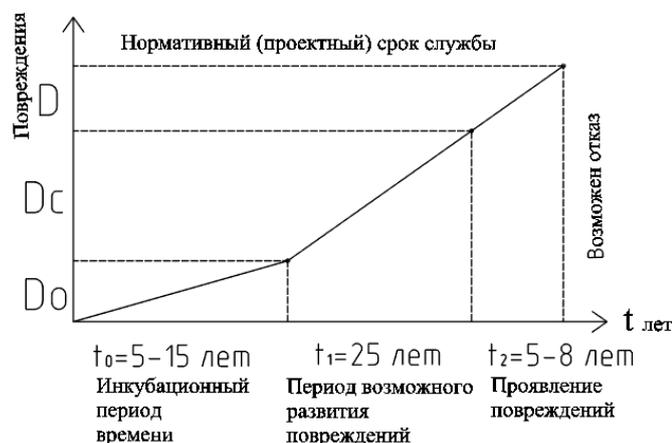


Рис. 1. Технический срок службы пролетных строений мостов:

D_0 – начальная долговечность; D_c – долговечность, определенная потерей служебного ресурса; D – долговечность, определенная остаточным ресурсом

Fig. 1. Technical service life of bridge spans:

D_0 – initial durability; D_c – durability determined by the service resource; D – durability determined by the residual resource

Начальная долговечность (D_0) рассчитывается исходя из начального резерва прочности (Z) [2, 3].

Таким образом, ресурс (срок службы) пролетного строения в процессе эксплуатации снижается или даже может быть исчерпан в результате накопления повреждений и роста эксплуатационных нагрузок (рис. 2).

¹ Картопольцев В.М. Оценка надежности и остаточного ресурса несущих конструкций автодорожных мостов : отчет о НИР № 1P01950001253. При финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-01-98006. Томск, 1996, 18 с.

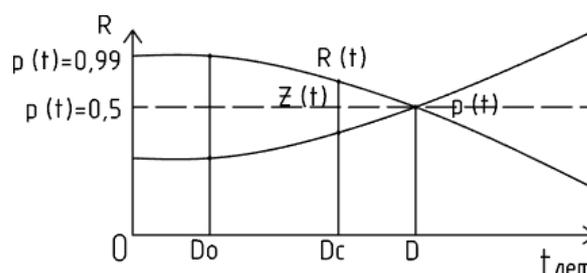


Рис. 2. Изменение несущей способности, долговечности и нагрузки во времени:
 Z – ресурс пролетного строения

Fig. 2. Changes in load-bearing capacity, durability and load over time:
 Z – span life

В интервале $0 - t_0 - D_0$ – период инкубационный (период приработки) пролетного строения; $t_1 - D_c$ – период накопления повреждений и уменьшения запаса прочности Z . В период $t_2 - D$ – ресурс пролетного строения становится минимальным.

Оценка ресурсной долговечности пролетных строений металлических мостов с использованием современных гипотез о накоплении повреждений базируется на определении режима нагруженности [4]. Процесс накопления повреждений в несущих элементах пролетных строений рассматривает аппроксимированный режим нагруженности в виде нормального закона распределения спектра случайных стационарных нагрузок повреждений на основе изучения осциллограмм динамических напряжений и прогибов, а также показателей относительной долговечности (m) и поврежденности (a). Оценка дискретной надежности или потери служебного ресурса (λ) производится по наиболее значимому командному повреждению в зависимости от категории дефектности и рассматривается в виде условия [5, 6]:

$$\lambda = a \cdot m \cdot t^n, \quad (4)$$

где t – срок эксплуатации, в годах; n – показатель степени эксплуатационной прочности пролетного строения моста.

На основании рекомендаций Международной ассоциации мостостроения и строительных конструкций (IABSE) при различном уровне дефектности, при $t \geq 20$ лет значение λ составляет: для металлических мостов с пролетом более 25 м $\lambda = 2,3 \cdot 10^{-6} \cdot t^{3,7}$; для железобетонных мостов пролетом до 25 м $\lambda = 3,7 \cdot 10^{-5} \cdot t^{3,0}$.

Среди характеристик долговечности пролетных строений мостов важны хорошее качество строительных работ и последующее надлежащее содержание, остаточный ресурс следует рассматривать на основе физического состояния и морального износа. Прогнозирование остаточного ресурса в теории долговечности базируется на основе закономерностей выхода элементов пролетных строений за предел «исправных» в зависимости от их срока службы, установленного кратным 10 годам [7, 8].

Зависимость между сроком службы и выходом пролетных строений за предел «исправных» связана с влиянием достигнутого износа на изменение

напряженно-деформированного состояния. Интерпретируя процесс физического износа элементов пролетного строения медленным процессом накопления дефектов и увеличением уровня нагруженности несущих балок, остаточный ресурс пролетного строения можно определить разрушающими нагрузками, близкими к средним разрушающим нагрузками для каждого элемента несущих балок [9]. Любое увеличение нагруженности интенсифицирует процесс износа балок и появления пластических деформаций. При фиксированном уровне нагруженности между процессом разрушения и рекомбинацией наступает состояние динамического равновесия. Таким образом, в течение срока эксплуатации, определяющего значение служебного ресурса (λ), пролетное строение имеет свойство возможной адаптации к внешним воздействиям, некоторой стабилизации физического износа и напряженно-деформированного состояния [9]. В таком случае из условия, что скорость физического износа адекватна значению потери служебного ресурса (λ), остаточный ресурс в предельном состоянии будет равен дифференциалу $\frac{d\lambda}{dt}$:

$$\frac{d\lambda}{dt} = n \cdot a \cdot t^{n-1}. \tag{5}$$

Другая форма выражения оценки долговечности и величин остаточного ресурса на основе гауссовской зависимости скорости физического износа $V_{\lambda t}$ и среднего значения проявления дефектов имеет вид

$$\frac{d\lambda}{dt} = m \sqrt{\frac{H_t - H_s}{V_{\lambda t}}}, \tag{6}$$

где H_t – несущая способность пролетного строения на момент расчета; H_s – предельная несущая способность; $V_{\lambda t} = \frac{dH_t}{dt}$ – скорость физического износа.

Изменение ресурсов пролетных строений мостов представлено на рис. 3

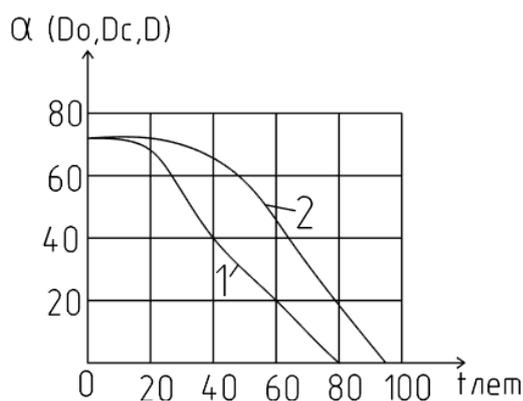


Рис. 3. Изменение ресурсов D_0 , D_c , D в зависимости от t :
 1 – мосты с пролетом до 25 м; 2 – мосты с пролетом более 25 м
 Fig. 3. Changes in D_0 , D_c , D depending on time t :
 1 – 25 m spans; 2 – > 25 m spans

Влияние нагруженности и командного дефекта несущих элементов пролетных строений металлических мостов рассматривается в виде полигармонического стационарного случайного процесса, отражающегося на ресурсной долговечности, реальном спектре нагружений в условиях их стационарности, которые характеризуются размахами напряжений, достигающими значительных величин, но в конечном итоге оказываются меньше предела выносливости материала несущего элемента пролетного строения [10, 11, 12].

Повторное нагружение снижает прочность элементов несущих балок и способствует постепенному накоплению повреждений – усталостных трещин, пластических сдвигов [13, 14]. Снижение прочности материала балок за счет интенсивности спектра нагружения влияет на величину рабочего размаха напряжений $\Delta\sigma_0$, который будет определяться формулой

$$\Delta\sigma_0 = \frac{2\psi \cdot \sigma_{вр}}{\beta + \psi}, \quad (7)$$

где $\psi = 0,25-0,28$ [15, 16]; β – коэффициент асимметрии нагружения; $\sigma_{вр}$ – предел прочности стали элемента балки.

Тогда запас прочности балок пролетного строения и запас остаточной долговечности находится в соответствии

$$\sigma_D = \frac{\sigma_{вр} - \Delta\sigma}{\sigma_p}, \quad (8)$$

где σ_p – расчетное напряжение в балке, приведенное к нормативному сроку службы.

Таким образом, несущая способность конструкции пролетного строения по остаточной долговечности σ_D будет представлена в виде [17]:

$$\sigma_D \geq (1 + \beta) A_g \cdot \bar{Q}, \quad (9)$$

где A_g – характеристика изменчивости нагруженности элементов; \bar{Q} – среднее значение несущей способности балок пролетного строения; β – коэффициент, зависящий от вероятности возникновения предельного состояния [18, 19].

В зависимости от нормативного или расчетного значения нагруженности A_g и несущей способности \bar{Q} определим среднее значение коэффициентов надежности работы пролетного строения: по назначению сооружения и запасу прочности, по напряжению в период остаточной долговечности [20].

Выводы

Рассмотренная методика анализа и прогнозирования долговечности несущих элементов пролетных строений металлических мостов обосновывает связь запаса долговечности и прочности конструкции при сложном развитии нагружения и воздействия факторов эксплуатации. Приведенные данные показывают, что при расчетах ресурсной долговечности необходимо учитывать влияние командных дефектов на определение вида ресурса.

нагружения и воздействия факторов эксплуатации. Приведенные данные показывают, что при расчётах ресурсной долговечности необходимо учитывать влияние командных дефектов на определение вида ресурса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Межнякова А.В., Овчинников И.Г., Пиеничкина В.А.* Оценка надежности железобетонных элементов конструкций мостовых сооружений. Саратов : Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. 63 с.
2. *Болотин В.В.* Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. Москва : Стройиздат, 1982. 351 с.
3. *Чан Дык Ньем.* Усталостная долговечность металлических пролетных строений эксплуатируемых мостов в СРВ : специальность 05.23.15 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1988. 21 с.
4. *Самсонов Ю.А., Фиденко В.И.* Справочник по ускоренным ресурсным испытаниям судового оборудования. Ленинград : Судостроение, 1981. 200 с.
5. *Добромыслов А.Н.* Оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам : справочное издание. Москва : Изд-во АСВ, 2004. 72 с.
6. *Нечаев Ю.П.* Долговечность искусственных сооружений // Эксплуатационная надежность искусственных сооружений : сборник научных трудов / под ред. В.Г. Орлова. Москва : Транспорт, 1989. С. 67–72.
7. *Ashby M.F., Gandhi C., Taplin M.R.* Fracture Mechanism Maps and Their Construction for F.C.C. Metals and Alloys // Acta Met. 1979. V. 27. P. 699–729.
8. *Morrow J.* Huvestigation of Plastic Stratu Energy as a Criterion of Finite Fatigie Life. The Gargett Corporation Report Phaenir Ari2, 1960. 48 p.
9. *Шахназаров С.С.* О влиянии адаптации к внешним воздействиям на остаточный ресурс металлических конструкций // Металлические конструкции и испытание сооружений : Межвуз. темат. сб. трудов. Ленинград : ЛИСИ, 1981. С. 112–118.
10. *Новожилова Н.И., Быстров В.А., Шайкевич В.Л.* Прогнозирование надежности конструкций стальных и сталежелезобетонных мостов. Ленинград : ЛИСИ, 1989. 96 с.
11. *Картопольцев В.М., Картопольцев А.В., Колмаков Б.Д.* Концептуальные основы оценки остаточного ресурса пролетных строений металлических мостов по критерию усталостной долговечности // Вестник Томского государственного архитектурно строительного университета. 2015. № 4. С. 206–211.
12. *Rice J.R, Tracey D.M.* On the Ductile Enlargement of Voids in. Triaxial Stress Filds // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 1969. V. 17. № 3. P. 201–217.
13. *Бродский В.М.* Расчетно-экспериментальная оценка остаточной долговечности конструкций с усталостной трещиной // Вопросы надежности мостовых конструкций : межв. тем. сб. трудов. Ленинград : ЛИСИ, 1984. С. 23–33.
14. *Ficher J.C.* Application of Nucleation Theory to Isofermal Martensite // Acta Met. 1954. V. 1. P. 32–35.
15. *Акимов Б.Г.* К вопросу влияния прочности стали на усталостный ресурс бистальных балок // Вопросы надежности мостовых конструкций : межв. тем. сб. трудов. Ленинград : ЛИСИ, 1984. С. 33–45.
16. *Картопольцев В.М.* К вопросу определения усталостного ресурса бистальных балок // Fatigue and Brittle Fracture of Steel Structures. PLSEN. 1987. P. 110–118.
17. *Болотин В.В.* Долговечность конструкций при квазистационарных режимах напряжений : инженерный сборник. Том XXIX / Институт механики Академии наук СССР. Москва : Изд-во Академии наук СССР, 1960. С. 30–36.
18. *Потапкин А.А.* Методические указания к основам расчета мостовых конструкций на надёжность. Москва : МАДИ, 1987. 20 с.
19. *Hoff K.I.* The Necking and the Rupture of Roads Subjected to Constant Tensile Loads // Journal of Applied Mechanics Brooklyn. 1953. V. 20. № 1. P. 105–108.
20. *Гребеник В.М.* Об использовании коэффициентов, учитывающих влияние различных факторов при расчетах на ограниченную долговечность // Известия вузов СССР. Машиностроение. 1965. № 5. С. 49–57.

REFERENCES

1. *Maksimova A.V., Ovchinnikov I.G., Pshenichkina V.A.* Reliability Assessment of Reinforced Concrete Structural Elements of Bridge Structures. Saratov, 2006. 65 p. (In Russian)
2. *Bolotin V.V.* Probability and Reliability Theories in Structural Analysis. Moscow: Stroyizdat, 1982. 351 p. (In Russian)
3. *Chan Duc Nyom.* Fatigue Life of Metal Superstructures of Operated Bridges in the SRV. PhD Thesis. Moscow, 1988. 21 p. (In Russian)
4. *Samsonov Yu.A., Fidenko V.I.* Handbook of Accelerated Resource Testing of Marine Equipment. Leningrad: Sudostroenie, 1981. 200 p. (In Russian)
5. *Dobromyslov A.I.* Reliability of Buildings by External Signs. Moscow: ASV, 2004. 72 p. (In Russian)
6. *Nechaev Yu.P.* Durability of Artificial Structures. Operational Reliability of Artificial Structures. Moscow: Transport, 1989. Pp. 67–72. (In Russian)
7. *Ashby M.F., Gandni C., Taplin M.R.* Fracture Mechanism Maps and Their Construction for F.C.C. Metals and Alloys. *Acta Met.* 1979; 27: 699–729.
8. *Morrow J.* An Investigation of Plastic Strain Energy as a Criterion for Finite Fatigue Life. The Garrett Corporation Report. Phoenix, Arizona, 1960.
9. *Shakhmazarov S.S.* On the Impact of Adaptation to External Influences on Technical Life of Metal Structures. In: Metal Structures and Their Testing. Leningrad: LISI, 1981. Pp. 112–118. (In Russian)
10. *Novozhilova N.I., Bystrov V.A., Shaikovich V.L.* Forecasting the Reliability of Steel and Steel-Reinforced Concrete Bridges. Leningrad, 1989. 96 p. (In Russian)
11. *Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V., Kolmakov B.D.* Conceptual Framework of Fatigue Life Criterion Assessment of Steel Bridge Residual Life. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building.* 2015; (4): 206–211. (In Russian)
12. *Rice J.R., Tracey D.M.* On the Ductile Enlargement of Voids in Triaxial Stress Fields. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids.* 1969; 17 (3): 201–217.
13. *Brodsky V.M.* Computational and Experimental Assessment of Residual Durability of Structures with Fatigue Cracks. In: Issues of Reliability of Bridge Structures. Leningrad, 1984. Pp. 23–33. (In Russian)
14. *Fisher J.C.* Application of Nucleation Theory to Isothermal Martensite. *Acta Metallurgica.* 1954; 1: 32–35.
15. *Akimov B.G.* Steel Strength Effect on Fatigue Life of Bistal Beams. Leningrad, 1984. Pp. 33–45. (In Russian)
16. *Kartopoltsev V.M.* Toward Fatigue Life of Bistal Beams. In: Fatigue and Brittle Fracture of Steel Structures. PLSSEN. 1987. Pp. 110–118. (In Russian)
17. *Bolotin V.V.* Durability of Structures Under Quasi-Stationary Stress Conditions. Engineering Collection. Vol. XXIX. Institute of Mechanics of the USSR Academy of Sciences. Moscow, 1960. Pp. 30–36. (In Russian)
18. *Potapkin A.A.* Methodological Guidelines for Structural Analysis of Bridges. Moscow, 1987. 20 p. (In Russian)
19. *Hoff K.I.* The Necking and the Rupture of Rods Subjected to Constant Tensile Loads. *Journal of Applied Mechanics.* 1953; 20 (1): 105–107.
20. *Grebenik V.M.* Influence of Various Factors on Limited Durability Calculations. *Izvestiya vuzov SSSR. Mashinostroenie.* 1965; (5): 49–57. (In Russian)

Сведения об авторах

Алексеев Александр Аверьянович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, alexeev10@yandex.ru

Картопольцев Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, ООО «ДИАМОС», 634003, г. Томск, пер. Соляной 24/1, diamos@mail.ru

Черепанов Дмитрий Николаевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная 2,

Authors Details

Aleksandr A. Alekseev, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, alekseev10@yandex.ru

Andrey V. Kartopoltsev, PhD, A/Professor, ООО “DIAMOS”, 24/1, Solyanoy Str., 634003, Tomsk, Russia, diamos@mail.ru

Dmitrii N. Cherepanov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, d_n_ch@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 13.05.2024
Одобрена после рецензирования 30.05.2024
Принята к публикации 14.06.2024

Submitted for publication 13.05.2024
Approved after review 30.05.2024
Accepted for publication 14.06.2024