



Контроль деформаций металлических конструкций в строительстве: методы и технологии

Н.А. Краснояров^{1✉}, Т.Л. Дмитриева², В.И. Соболев³

^{1,2,3}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. В статье представлен алгоритм управления деформациями опор металлических конструкций, возникающими в результате силовых и температурных воздействий. Было исследовано их влияние на напряженно-деформированное состояние конструкции в целом. Была представлена методика, в основу которой был положен численный эксперимент, который включает создание информационной модели конструкции, интеграцию в нее данных о температурных и силовых воздействиях, конечно-элементный анализ. На основе этих данных формируются корректирующие меры управления перемещениями с использованием демпфирующих устройств. Результаты исследований выявляют влияние температурных нагрузок на деформации конструкций и предлагают методы их контроля. Предложенный метод управления деформациями с использованием BIM и активных систем управления перемещениями позволяет повысить надежность и долговечность конструкций. Интеграция современных технологий, таких как активные демпферы и адаптивные конструкции, является перспективной для управления деформациями в реальном времени. Отмечается, что успешное применение подобных технологий требует тщательного тестирования, что позволит адаптировать их к конкретным условиям и требованиям проекта.

Ключевые слова: деформации, металлические конструкции, температурные воздействия, информационное моделирование, температурные деформации, демпфирующие устройства

Для цитирования: Краснояров Н.А., Дмитриева Т.Л., Соболев В.И. Контроль деформаций металлических конструкций в строительстве: методы и технологии // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2024. Т. 14. № 4. С. 746–752. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-4-746-752>. EDN: CNAZUV.

Original article

Control of deformations in metal structures in construction: methods and technologies

Nikita A. Krasnoyarov^{1✉}, Tatiana L. Dmitrieva², Vladimir I. Sobolev³

^{1,2,3}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The paper presents an algorithm to control deformations of metal structure supports caused by force and temperature effects. The study involved investigating the influence of these factors on the overall stress-strain state of the structure. A proposed methodology is based on numerical experiments, which include the creation of an information model of the structure, integration of data on temperature and force effects into it, and finite element analysis. Based on this data, corrective measures are introduced to control displacements using damping devices. The study reveals the effect of temperature loads on deformations of structures and proposes methods for their control. The suggested method using building information modeling and active displacement control systems enhances the reliability and durability of structures. The integration of modern technologies, including active dampers and adaptive structures, shows high potential for real-time deformation control. The successful application of such technologies requires thorough testing in order to further adapt them to specific conditions and project requirements.

Keywords: deformations, metal structures, temperature effects, information modeling, temperature deformations, damping devices

For citation: Krasnoyarov N.A., Dmitrieva T.L., Sobolev V.I. Control of deformations in metal structures in construction: methods and technologies. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2024;14(4):746-752. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-4-746-752>. EDN: CNAZUV.

ВВЕДЕНИЕ

Учет влияния деформаций металлических конструкций строительных объектов является одной из ключевых задач для обеспечения безопасности и долговечности сооружений в условиях изменения нагрузок и температурных воздействий. Современные средства информационного моделирования позволяют разработать эффективные методы и алгоритмы по снижению влияния деформаций на несущую способность конструкций, а также внедрить системы активного управления перемещениями. Таким образом, возникают новые возможности для оптимизации процессов мониторинга и разработки алгоритмов коррекции деформаций. На основе BIM-технологии создается цифровая 3D-модель конструкций. Аналитические и численные методы расчета деформаций, такие как метод конечных элементов (МКЭ), широко используются для прогнозирования поведения конструкций. Следовательно, появилась возможность интегрировать данные о нагрузках и воздействиях в единую информационную модель, что позволяет более точно прогнозировать и управлять деформациями. Стоит отметить, что данные методики остаются недостаточно разработанными, поэтому возможно создание новых технологий. Основываясь на проведенных исследованиях по определению законов деформации металлических опор в зависимости от внешней температуры, предлагается интегрировать в модель строительной конструкции систему активного управления перемещениями [5].

МЕТОДЫ

В основе предложенной методики лежит использование экспериментальных данных, полученных при исследовании деформаций металлических опор под воздействием различных силовых нагрузок и температур. Численный эксперимент проводился с использованием МКЭ в программном комплексе ЛИРА 10.12, где входные данные включали температурные градиенты, геометрические характеристики опоры и физико-механические свойства материала. В результате обработки и анализа полученных данных была выявлена линейная зависимость деформирования от

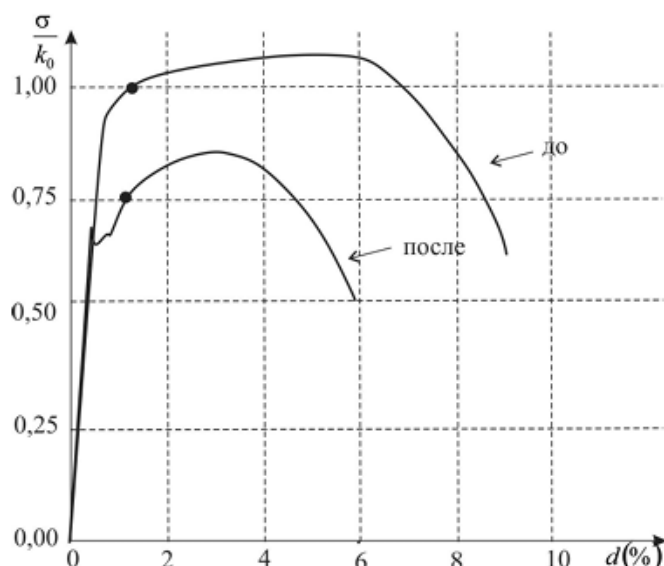
геометрических характеристик сооружения и внешних факторов, обуславливающих нагружение конструкции. Были исследованы и классифицированы существующие способы демпфирования перемещений различных конструкций, оборудования и механизмов. Определены возможные пути их использования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основываясь на результатах исследований [2–4], можно сделать вывод, что значение температурных нагрузок в конструкциях чревато преждевременным выходом их из строя. Основными причинами отказов трубопроводов различного сечения являются ползучесть металла деталей конструкции при длительном воздействии повышенных температур при эксплуатации, образование различных отложений на внутренней поверхности труб, наличие дефектов изготовления различного характера и развитие коррозии [3]. Выполняя анализ температурных деформаций применительно к марке стали, используемой в строительных конструкциях промышленных сооружений, можно сделать вывод, что после теплового воздействия неизбежно нарушается кристаллическая решетка и формируются остаточные деформации, а также отмечается снижение величины предела текучести и прочности образцов после теплового воздействия, что изображено на рисунке [1, 4]. Существует несколько видов температурных воздействий, обусловленных характером передачи тепла и их источников. Трубопроводы и оборудование могут быть источниками теплопередачи, возникающей за счет контакта поверхностей, обусловленной теплопроводностью материалов, конвективной передачи тепла, теплового излучения (лучистое тепло). Конструкции сооружений также могут нагреваться за счет солнечной радиации [6].

В данной работе было выполнено моделирование опор, расположенных под высокотемпературными газоходами. Для КЭ-моделирования был использован ПК ЛИРА 10.12.

В качестве воздействия рассмотрен случай конвективной теплопередачи температурной нагрузки, обеспечивающий равномерный нагрев (рисунок).



Диафрагма деформирования до и после теплового воздействия
Diaphragm deformation before and after thermal exposure

Исследовано два варианта опор – жесткая пространственная и плоская подвижная. Обе опоры моделировались конечными элементами (КЭ) типа 44 (пластинчатый КЭ тонкой оболочки).

Задача решалась в линейной постановке.

Для исследования зависимости было выделено несколько факторов, которые могут оказывать влияния на конечные деформации опор:

1. Температура материала опор. Воздействия оказывались в интервале 5–150 °С с шагом 5 градусов.

2. Высота опоры (менялась в интервале 4–6 м с шагом 1000 мм).

3. Площадь нагреваемой поверхности. Габарит сечений элементов изменялся по суще-

ствующему сортаменту на одну позицию, без изменения толщины стенок сечений.

На основании полученных данных был произведен множественный регрессионный анализ для плоской и пространственной опоры, представленный в табл. 1. В таблице представлен анализ зависимостей горизонтальных перемещений верхней точки конструкции (узел опирания трубопроводов или других конструкций) от температуры, высоты конструкции и площади нагрева.

На основании Р-значений можно сделать вывод, что влияние на величину перемещений оказывает только температура конструкции и площадь нагреваемой поверхности. Высотой конструкции возможно пренебречь в виду ее малого влияния.

Таблица 1. Результаты регрессионного анализа
Table 1. Regression analysis results

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-значение	Нижние 95 %	Верхние 95 %	Нижние 95,0 %	Верхние 95,0 %
У-пересечение	0,01045	0,02221	0,47066	0,63816	-0,0332	0,05415	-0,0332	0,05415
Температура	0,00931	–	117,161	0	0,00915	0,00947	0,00915	0,00947
Высота	-0,0492	0,00818	-6,0229	0	-0,0653	-0,0331	-0,0653	-0,0331
Площадь нагрева	0,01728	0,00238	7,25660	0	0,01260	0,02197	0,01260	0,02197

На основании данных регрессионного анализа был получен линейный закон деформирования конструкции в зависимости от температуры ее материала, который затем был применен для прогнозирования перемещений конструкций с ранее смоделированными опорами, но на других диапазонах: для температур 50–250 °С, для высот в интервале 5–8 м, габариты сечений остались неизменными. Анализируя полученные результаты, а именно

влияние полного набора контролируемых величин и наиболее статистически важных, представленных в табл. 2, можно сделать вывод, что для контроля перемещений пространственных опор от конвективной теплопередачи необходимо учитывать только конечную высоту опоры и температуру материала конструкции, которые возможно контролировать, вести их наблюдение, запись и обработку в режиме реального времени.

Таблица 2. Анализ данных
Table. 2. Data analysis

	D3	D6
Среднее	0,084769	0,017081
Стандартная ошибка	0,001002	0,000662
Медиана	0,081244	0,013424
Мода	–	0,021448
Стандартное отклонение	0,019005	0,012553
Дисперсия выборки	0,000361	0,000158
Эксцесс	-0,34972	1,290308
Асимметричность	0,148304	1,432233
Интервал	0,094425	0,053309
Минимум	0,028228	1,98E-05
Максимум	0,122653	0,053328
Сумма	30,517	6,149207
Счет	360	360

Основываясь на ранее полученных зависимостях, предлагается метод управления деформациями опор от температурных воздействий путем использования BIM для интеграции внешних воздействий и результатах численных расчетов.

Основные этапы метода включают:

1. Создание информационной модели конструкции в среде BIM.
2. Интеграцию данных о температурных воздействиях с использованием специализированных плагинов или скриптов стандартными средствами BIM.
3. Расчет конструкций программами конечно-элементного моделирования.
4. Анализ и прогнозирование деформаций с учетом ранее полученных линейных зависимостей.
5. Внедрение корректирующих мер на основе результатов моделирования за счет использования активных систем изоляции или демпфирования.

Остановимся подробнее на каждом этапе.

Разработка информационной модели

На первом этапе создается информационная 3D-модель металлических опор с использованием BIM-технологии. Она включает в себя все необходимые параметры конструк-

ций: ее геометрию, данные о материалах, условиях эксплуатации и другие характеристики.

Интеграция систем активного управления перемещениями

Система активного управления перемещениями интегрируется в информационную модель. Это позволяет отслеживать состояние опор и автоматически корректировать их положение в реальном времени, предотвращая критические деформации. Важным элементом системы является блок анализа данных, который может использовать алгоритмы машинного обучения для прогнозирования возможных деформаций и принятие решений по их устранению, либо использовать ранее накопленную статистическую информацию.

Корректировка положения конструкции в пространстве

Для нивелирования перемещений конструкций планируется использовать ранее разработанные механизмы, такие как демпферы, компенсаторы и системы активного управления.

Они могут быть интегрированы в информационную модель, а также ими можно управлять в реальном времени на основе данных, полученных экспериментально, или

на основе информации, поступающей от датчиков.

Для корректировки перемещений конструкции можно использовать системы активного управления, они обеспечивают контроль над деформациями и перемещениями конструкций, повышая их надежность и долговечность. К таким системам возможно отнести следующие [7–12]:

1. Активные демпферы используются для снижения вибраций и перемещений в конструкциях, таких как здания, мосты и промышленные установки. Они функционируют с помощью активных сил, противоположных направлению нежелательных вибраций, используя датчики для обнаружения движения и сервоприводы для противодействия ему. Магнитореологические демпферы используют магнитореологическую жидкость, вязкость которой изменяется под действием магнитного поля. Электрогидравлические демпферы связаны с гидравлическими системами, управляемыми электронными контроллерами для активного демпфирования.

2. Адаптивные конструкции включают в себя встроенные датчики и приводы, которые могут изменять свои свойства в ответ на внешние воздействия. Они используются в авиакосмической технике, гражданском строительстве и автомобильной промышленности. Пьезоэлектрические системы, которые используют пьезоэлектрические материалы, изменяют форму при приложении электрического поля для активного контроля вибраций и деформаций. Шунтирующие демпферы применяют электронные цепи для шунтирования энергии из вибрирующих элементов конструкций.

3. Системы активного управления нагрузками используются для изменения распределения нагрузок на конструкцию в реальном времени, что позволяет снижать концентрацию напряжений и управлять деформациями. Активные распорные системы применяются для изменений жесткости и распределения нагрузок в мостовых конструкциях и высотных зданиях. Для интеллектуальных болтовых соединений используют электронное управление, чтобы регулировать усилия в болтах и других крепежных элементах.

4. Активные подвесные системы используются в автомобильной и железнодорожной технике для управления динамическими перемещениями и улучшения комфорта и безопасности. Электронно-управляемые амортизаторы регулируют характеристики амортизаторов в зависимости от дорожных условий и динамики движения. Активные подвесные системы с электромагнитным приводом обеспечивают более точное и быстрое управление перемещениями.

5. Компенсаторы перемещений предназначены для компенсации температурных деформаций и других медленных перемещений, вызванных внешними воздействиями. Компенсаторы на основе сплавов используют материалы, которые восстанавливают свою форму при изменении температуры.

Активные термокомпенсаторы управляют перемещениями посредством изменения температурного режима на определенных участках конструкции. Выбор той или иной системы зависит от типа опоры, внешних температурных воздействий, величины нагрузки на опору от трубопроводов или других конструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный алгоритм управления деформациями металлических опор с использованием средств информационного моделирования и систем активного управления перемещениями предполагает высокую эффективность и перспективность для применения в строительной отрасли, т. к. позволяет значительно повысить надежность и долговечность конструкций. Современные решения, такие как активные демпферы, адаптивные конструкции и системы активного управления перемещениями предлагают широкий спектр возможностей для управления деформациями в реальном времени. Интеграция этих систем с BIM-технологиями может стать мощным инструментом для проектировщиков и инженеров, обеспечивая высокую точность и эффективность управления деформациями. Для успешного применения данных технологий важно проводить тщательное моделирование и экспериментальное тестирование, что позволит адаптировать системы к конкретным условиям эксплуатации и требованиям проекта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сидоров Г.И. Об определении температурных напряжений в подкрепленных пластинах методом конечных элементов // Ученые записки ЦАГИ. 1975. Т. 6. № 6. С. 74–81. EDN: MVCLJJ.
2. Иванов В.П., Кульбей А.Г., Бондарев А.С. Оценка и использование остаточного ресурса оборудования нефтехимического комплекса // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2022. № 10. С. 92–97. EDN: ZDOKHM.

3. Кушнаренко В.М., Чирков Ю.А., Клещарева Г.А., Решетов С.Ю., Клещарева А.В. Причины преждевременного разрушения теплообменных труб энергетического оборудования // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 1. С. 75–84. EDN: QOGFKJ.
4. Абышова Р.М. Зависимость напряжения и устойчивости трубопровода от воздействия температуры // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводного сырья. 2018. № 1. С. 42–45. EDN: XWBWUX.
5. Николенко С.Д., Сазонова С.А., Акамсина Н.В. Оценка несущей способности конструкций технологических эстакад // Аспекты моделирования систем и процессов. Материалы Всеросс. науч.-практ. конф. (г. Воронеж, 27 мая 2022 г.). Воронеж, 2022. С. 220–229. https://doi.org/10.58168/AMSP2022_220-229. EDN: AMPBXU.
6. Буренин А.А., Дац Е.П., Мурашкин Е.В. Формирование поля остаточных напряжений в условиях локального теплового воздействия // Известия Российской Академии наук. Механика твердого тела. 2014. № 2. С. 124–131. EDN: SAKNEJ.
7. Кулябко В.В., Ярошенко Д.С. Нелинейное динамическое взаимодействие демпфирующих устройств с конструкциями вагонов, пути, зданий и сооружений // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. 2012. № 3. С. 24–30. EDN: PCXTOB.
8. Закора А.Л. Гашение колебаний мостовых конструкций // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна. 2005. № 6. С. 118–123. EDN: VWACLX.
9. Паймушин В.Н., Фирсов В.А., Шишкин В.М. Интегральный способ поверхностного демпфирования изгибных колебаний тонкостенных конструкций // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Материалы XXV междунар. симпозиума имени А.Г. Горшкова (г. Вятчи, 18–22 марта 2019 г.). Вятчи, 2019. С. 210–217. EDN: NQEDQL.
10. Васильев А.С., Романов А.В., Шегельман И.Р. Поиск технических решений в отношении конструкций защитно-демпфирующих устройств контейнеров // Глобальная научная интеграция. 2012. № 6. С. 34–35. EDN: ROTLRV.
11. Белташ Т.А. Энергопоглотители сухого трения в конструкциях сейсмозащиты зданий и сооружений // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 1 (30). С. 66–70. EDN: PANVBT.
12. Кочетов О.С. Расчет систем виброзащиты технологического оборудования // Охрана и экономика труда. 2014. № 2 (15). С. 30–36. EDN: TZHTOP.

REFERENCES

1. Sidorov G.I. On The Determination of Temperature Stresses in Reinforced Plates by The Finite Element Method. *Uchenye zapiski TsAGI*. 1975;6(6):74-81. (In Russ.). EDN: MVCLJJ.
2. Ivanov V.P., Kul'bey A.G., Bondarev A.S. Evaluation and Use of Residual Resource Equipment for A Petrochemical Complex. *Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied Sciences*. 2022;10:92-97. (In Russ.). EDN: ZDOKHM.
3. Kushnarenko V.M., Chirkov Yu.A., Kleshchareva G.A., Reshetov S.Yu., Kleshchareva A.V. Causes of Premature Destruction of Heat Exchange Pipes of Power Equipment. *Kazan State Power Engineering University Bulletin*. 2021;13(1):75-84. (In Russ.). EDN: QOGFKJ.
4. Abyshova R.M. The Dependence of the Voltage and Resistance of the Pipeline On the Effects of Temperature. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2018;1:42-45. (In Russ.). EDN: XWBWUX.
5. Nikolenko S.D., Sazonova S.A., Akamsina N.V. Assessment of The Bearing Capacity of the Structures of Technological Restas. In: *Aspekty modelirovaniya sistem i protsessov. Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Aspects of Modeling Systems and Processes. Materials of The All-Russian Scientific and Practical Conference*. 27 May 2022, Voronezh. Voronezh; 2022. p. 220–229. (In Russ.). https://doi.org/10.58168/AMSP2022_220-229. EDN: AMPBXU.
6. Burenin A.A., Dats E.P., Murashkin E.V. Formation of The Residual Stress Field Under Local Thermal Actions. *Mechanics of Solids*. 2014;2:124-131. (In Russ.). EDN: SAKNEJ.
7. Kulyabko V.V., Yaroshenko D.S. Nonlinear Dynamic Interaction of Damping Devices with Railcars, Railways, Buildings and Constructions. *Vibratsiya mashin: izmerenie, snizhenie, zashchita*. 2012;3:24-30. (In Russ.). EDN: PCXTOB.
8. Zakora O.L. The Damping of Bridge Structures. *Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta im. akademika V. Lazaryana*. 2005;6:118-123. (In Russ.). EDN: VWACLX.
9. Paimushin V.N., Firsov V.A., Shishkin V.M. Integral Method of Surface Damping of Flexural Vibrations of Thin-Walled Structures. In: *Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstrukttsii i sploshnykh sred. Materialy XXV mezhdunarodnogo simpoziuma imeni A.G. Gorshkova = Dynamic and Technological Problems of Mechanics of Structures and Continuous Media. Proceedings of The XXV International Symposium Named After A.G. Gorshkova*. 18–22 March 2019, Vyatichi. Vyatichi; 2019. p. 210–217. (In Russ.). EDN: NQEDQL.

10. Vasil'ev A.S., Romanov A.V., Shegel'man I.R. Search for Technical Solutions Regarding the Designs of Protective and Damping Devices for Containers. *Global'naya nauchnaya integratsiya*. 2012;6:34-35. (In Russ.). EDN: ROTLRV.
11. Belash T.A. Power Absorbers of Dry Friction in Seismic Protection Designs of Buildings and Constructions. *Bulletin of Civil Engineers*. 2012;1(30):66-70. (In Russ.). EDN: PANVBT.
12. Kochetov O.S. Calculation of System of Vibroprotection of Processing Equipment. *Okhrana i ekonomika truda*. 2014;2(15):30-36. (In Russ.). EDN: TZHTOP.

Информация об авторах

Краснояров Никита Алексеевич,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉e-mail: nik.kras.home@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-1070-8154>

Дмитриева Татьяна Львовна,
д.т.н., доцент, заведующий кафедрой
механики и сопротивления материалов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия,
e-mail: dmitrievat@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4622-9025>
Author ID: 312501

Соболев Владимир Иванович,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры механики
и сопротивления материалов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия,
e-mail: vladsobol@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0916-1604>
Author ID: 4041

Information about the authors

Nikita A. Krasnoyarov,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russia,
✉e-mail: nik.kras.home@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-1070-8154>

Tatiana L. Dmitrieva,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Mechanics
and Resistance of Materials,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russia,
e-mail: dmitrievat@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4622-9025>
Author ID: 312501

Vladimir I. Sobolev,
Dr. Sci (Eng.), Professor, Professor
of the Department of Mechanics
and Resistance of Materials,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russia,
e-mail: vladsobol@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0916-1604>
Author ID: 4041

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 ap-
proved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 07.08.2024.
Одобрена после рецензирования 27.08.2024.
Принята к публикации 29.08.2024.

Information about the article

The article was submitted 07.08.2024.
Approved after reviewing 27.08.2024.
Accepted for publication 29.08.2024.