



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 628.16

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.023

 EDN: GYRGSR

## РАЗРАБОТКА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СТЕНДА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЛИЯНИЯ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ДАВЛЕНИЯ КАК НЕЗАВИСИМОГО ФАКТОРА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КАВИТАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Роман Николаевич Голых <sup>1</sup>, Вячеслав Дмитриевич Минаков <sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Бийск, Россия

<sup>1</sup> romangl90@gmail.com

<sup>2</sup> slava2926@mail.ru

**Аннотация.** На сегодняшний день широко известно интенсифицирующее влияние ультразвукового кавитационного воздействия на физико-химические процессы. Многократно установлено, что кавитационные и сопутствующие нелинейные явления (ударные волны, акустические потоки, нагрев среды) ускоряют физико-химические процессы. Однако современные исследования влияния кавитации либо основаны на теоретических подходах, которые, как правило, рассматривают ударно-волновое давление в отдельности без учёта других факторов, либо на экспериментальных исследованиях, которые определяют конечную эффективность процесса (критерий эффективности зависит от вида процесса) под действием совокупности факторов кавитации. В то же время для обеспечения максимальной эффективности процесса необходимо выявить действие каждого фактора в отдельности, чтобы подобрать режимы и условия воздействия (а, возможно, и способы модуляции ультразвуковых колебаний), которые усиливают фактор, который наиболее влияет на скорость процесса и ослабляют паразитные факторы. Для развития направления экспериментальных исследований влияния отдельных факторов кавитации разработан стенд, который позволяет осуществить воздействие на среду с аналогичным изменением температуры, как и при ультразвуковом воздействии, но без ударно-волнового давления, образуемого при схлопывании кавитационных пузырьков.

**Ключевые слова:** стенд, ультразвук, кавитация, температура, ударные волны.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00278, <https://rscf.ru/project/23-12-00278>.

---

**Для цитирования:** Голых Р. Н., Минаков В. Д. Разработка исследовательского стенда для изучения влияния ударно-волнового давления как независимого фактора ультразвукового кавитационного воздействия // Ползуновский вестник. 2024. № 1, С. 191–196. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.023. EDN: <https://elibrary.ru/GYRGSR>.

---

Original article

## DEVELOPMENT OF A RESEARCH STAND FOR STUDYING THE INFLUENCE OF SHOCK-WAVE PRESSURE AS AN INDEPENDENT FACTOR OF ULTRASONIC CAVITATION IMPACT

Roman N. Golykh <sup>1</sup>, Vyacheslav D. Minakov <sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Biysk Technological Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University, Biysk, Russia

<sup>1</sup> romangl90@gmail.com

<sup>2</sup> slava2926@mail.ru

---

© Голых Р. Н., Минаков В. Д., 2024

**Abstract.** To date, the intensifying effect of ultrasonic cavitation on physicochemical processes is widely known. It has been repeatedly established that cavitation and related nonlinear phenomena (shock waves, acoustic flows, heating of the medium) accelerate physicochemical processes. However, modern studies of cavitation influence are either based on theoretical approaches, which as a rule consider shock-wave pressure separately without taking into account other factors, or on experimental studies, which determine the final efficiency of the process (the efficiency criterion depends on the type of process) under the action of a set of cavitation factors. While to ensure maximum process efficiency it is necessary to identify the effect of each factor separately to select modes and conditions of action (and, perhaps, and ways to modulate ultrasonic oscillations), which strengthen the factor that most influences the speed of the process, and weaken parasitic factors. In order to develop the direction of experimental studies of the influence of individual cavitation factors, a stand was developed, which makes it possible to influence the medium with an analogous change in temperature, as in the case of ultrasonic influence, but without shock-wave pressure formed by the collapse of cavitation bubbles.

**Keywords:** 8-10 words and phrases, reflect the specifics of the topic, the object and the results of the study.

**Acknowledgements:** The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-12-00278, <https://rscf.ru/project/23-12-00278/>.

**For citation:** Golykh, R.N. & Minakov, V.D. (2024). Development of a research stand for studying the influence of shock-wave pressure as an independent factor of ultrasonic cavitation impact. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 191-196. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2024.01.023. EDN: <https://elibrary.ru/GYRGSR>.

## ВВЕДЕНИЕ

Один из возможных способов интенсификации и / или инициации физико-химических процессов (массообменные процессы в системах «газ-жидкость» или «жидкость-жидкость», химические реакции в гомогенных или гетерогенных системах со сплошной жидкой фазой) – кавитационное воздействие при излучении ультразвуковых колебаний в жидкие и твердые среды. Процесс кавитации сопровождается образованием пузырьков газа или пара в жидкости или на поверхности твердого материала, которые затем коллапсируют под действием давления волны, создавая местные точки нагрузки и высокие температуры.

Фактически ультразвуковая кавитация – это процесс образования и разрушения пузырьков газа или пара в жидкости под воздействием ультразвуковой волны с частотой выше 20 кГц. В процессе кавитации происходят многократно повторяющиеся циклы сжатия-расширения, которые приводят к возникновению дополнительных точек нагрузки на поверхности и внутри жидкости. При достаточной интенсивности ультразвука на поверхности и внутри жидкости образуются пузырьки газа или пара, размер которых может варьироваться от микроскопических до нескольких миллиметров в диаметре [1]. Пузырьки растут в размерах благодаря повышению давлению газа внутри пузырька, диффузии газа или пара из окружающей жидкости, а затем коллапсируют под действием давления волн сжатия [2]. Этот процесс

называется кавитационным коллапсом. Кавитационный коллапс приводит к изменению структуры межфазной поверхности или молекулярной структуры жидкости в объёме [3–5]. Кроме того, кавитационный коллапс сопровождается выделением энергии, которая может быть использована для различных целей. Например, при генерации ультразвуковых волн в жидкости возникают достаточно высокие температуры и давления, что позволяет проводить химические реакции при более низких температурах и давлениях, чем это требуется без ультразвука. Это может быть использовано для ускорения диффузионных процессов, синтеза различных химических соединений, обработки продуктов и отходов, очистки воды и т. д. [6–7].

Однако современные исследования влияния кавитации либо основаны на теоретических подходах, которые, как правило, рассматривают ударно-волновое давление в отдельности без учёта других факторов, либо на экспериментальных исследованиях, которые определяют конечную эффективность процесса (критерий эффективности зависит от вида процесса) под действием совокупности факторов кавитации.

В то время как температурный фактор оказывает существенное влияние на физико-химические процессы, связанные со значительным содержанием газа в жидкости, и / или в случаях, когда реологические параметры сплошной жидкой фазы зависят от температуры. Механизмы влияния температуры определяются следующим:

- при быстро меняющемся радиусе пу-

## РАЗРАБОТКА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СТЕНДА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЛИЯНИЯ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ДАВЛЕНИЯ КАК НЕЗАВИСИМОГО ФАКТОРА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КАВИТАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

зырька, малом по сравнению с характерным временем теплопереноса, радиус пузырька меняется обратно пропорционально температуре со степенью от 0,5 (для одноатомного газа) до 1 (для многоатомного газа);

- изменение реологических свойств жидкости при изменении температуры определяет диапазон интенсивности, необходимой для возникновения кавитации в среде.

Поэтому для обеспечения максимальной эффективности процесса необходимо выявить действие каждого фактора в отдельности, чтобы подобрать режимы и условия воздействия (а, возможно, и способы модуляции ультразвуковых колебаний), которые усиливают фактор, наиболее влияющий на скорость процесса и ослабляющий паразитные факторы.

Для исследования влияния отдельного фактора кавитации на процессы в жидкости (в статье рассмотрено ударно-волновое давление) разработан стенд, который описан далее.

### МЕТОДЫ

Стенд состоит из нескольких модулей различной функциональности (рис. 1).

Первый и основной модуль представляет собой объём с озвучиваемой средой. Цель проведения экспериментальных исследований, которую позволяет реализовать разработанный стенд, реализовать изменение температуры среды с течением времени по закону, по которому меняется температура при действии ультразвука.

Для ультразвукового воздействия на среду в озвучиваемом объёме использовался прибор Волна-М модели УЗТА-1/22-ОМ разработки ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ» частота воздействия аппарата –  $22 \pm 1$  кГц, акустическая мощность воздействия составляет до 200 Вт и более.

С целью реализации температурного воздействия без ударных волн объём оснащён резистивным нагревателем и температурным датчиком.

Для управления нагревателем при температурном воздействии и регистрации изменения температуры под действием ультразвука использовался модуль Arduino Mega 2560 с внедрённым программным обеспечением, разработанным авторами.

Нагреватель управляется с помощью исполнительного модуля (транзисторный ключ + низковольтное реле + высоковольтное реле), который принимает слаботочный сигнал с модуля Arduino Mega и коммутирует силовой ток, проходящий через резистивный нагреватель.

При этом модуль Arduino Mega принимает

ет решения об управляющем воздействии на основании показаний температурного датчика, связанного непосредственно с модулем по интерфейсу One-Wire (датчик DS18B20).

Этот же модуль регистрирует изменение температуры с течением времени при действии ультразвука и выключенном нагревателе.

Принятие решений об управляющем воздействии осуществляется на основании алгоритма ПИД-регулирования в предположении, что нагреватель является интегрирующим звеном от модуля величины функции воздействия (охлаждение осуществляется за счёт отвода тепла в окружающую среду).

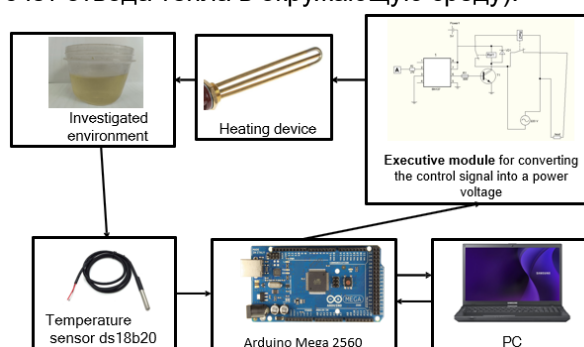


Рисунок 1 – Структурная схема аппаратного обеспечения стенда

Figure 1 – Structural diagram of the stand hardware

С помощью разработанного стенда эксперимент проводился по следующему алгоритму:

- ультразвуковое кавитационное воздействие на жидкость с измерением температуры в различные моменты времени (с шагом не более 1 с). Результаты измерений сохраняются в виде массива  $T[i]$ ;

- воспроизведение температуры с помощью исполнительного модуля, управляющего нагревателем, по аналогичному закону, по которому температура жидкости меняется при ультразвуковом кавитационном воздействии (на этом шаге ультразвуковое воздействие не накладывается).

При проведении эксперимента для выявления зависимости температуры от нагрева при ультразвуковой кавитации запускалась программа, которая считывала значения температуры с датчика по интерфейсу One-Wire и сохраняла в отдельный файл формата txt, располагаемый на персональном компьютере. После этого записанный файл становился целевым для проведения эксперимента при помощи нагревательного элемента, располагаемого на месте излучателя.

Далее описаны полученные результаты

тестирования стенда.

**РЕЗУЛЬТАТЫ**

Эксперименты с ультразвуковым воздействием (потребляемая активная мощность УЗ аппарата составляла 280 Вт) в течение 6 минут для измерения зависимости температуры от времени и исследования влияния двух факто-

ров (температура + ударно-волновое давление) на озвучиваемую среду.

Далее проводился эксперимент, в котором изменяется только температура, но по аналогичному закону, по которому температура меняется при кавитационном воздействии.

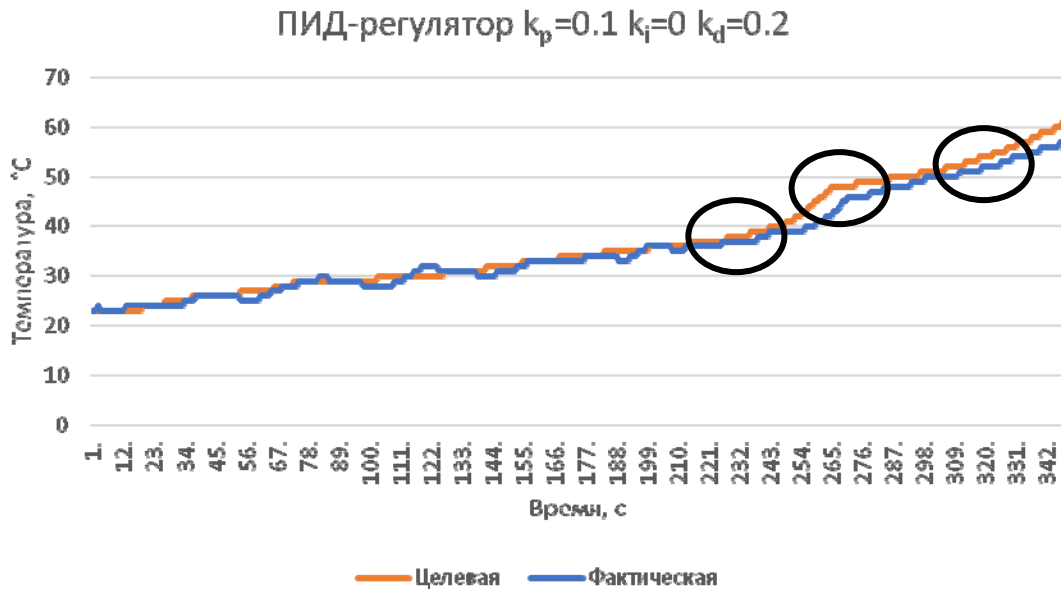


Рисунок 2 – Зависимости целевой и фактической температуры среды при эксперименте без ударно-волнового давления ( $k_p$  – коэффициент при пропорциональной составляющей дискретного ПИД-регулятора,  $k_i$  – при интегральной составляющей,  $k_d$  – при дифференциальной составляющей)

Figure 2 – Dependences of target and real medium temperature in the experiment without shock-wave pressure ( $k_p$  - coefficient at the proportional component of the discrete PID controller,  $k_i$  - at the integral component,  $k_d$  - at the differential component)

Из представленных зависимостей следует, что зависимость температуры среды от времени при эксперименте без ударно-волнового давления наиболее близка к целевой при нулевой интегральной составляющей ПИД-регулятора и ненулевых пропорциональной и дифференциальной составляющих. По всей видимости, это связано с тем, что дифференциальная составляющая обеспечивает затухание ошибки регулирования.

Полученная зависимость температуры, создаваемой регулятором + нагревателем, воспроизводит основные перегибы изменения температуры, реализуемые при ультра-

звуковом воздействии (на рис. 2 обведены линией черного цвета).

Это даёт возможность проводить сравнительные эксперименты по ультразвуковому воздействию на жидкость при сохранении температуры и наличии / отсутствии других факторов, связанных с ударно-волновым давлением.

При этом использование отличных коэффициентов или двухступенчатого регулятора приводит к появлению новых перегибов, связанных с тепловой инерционностью среды и не характерных для ультразвукового воздействия (рис. 3, 4).

РАЗРАБОТКА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СТЕНДА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЛИЯНИЯ  
УДАРНО-ВОЛНОВОГО ДАВЛЕНИЯ КАК НЕЗАВИСИМОГО ФАКТОРА УЛЬТРАЗВУКОВОГО  
КАВИТАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

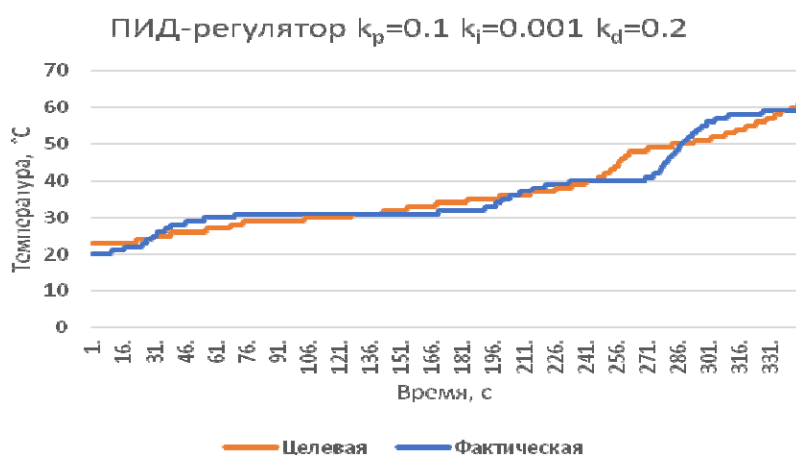


Рисунок 3 – Зависимости целевой и фактической температуры среды при эксперименте без ударно-волнового давления при неоптимальных параметрах ПИД-регулятора

Figure 3 – Dependences of target and real medium temperature in the experiment without shock-wave pressure at not optimal PID controller parameters

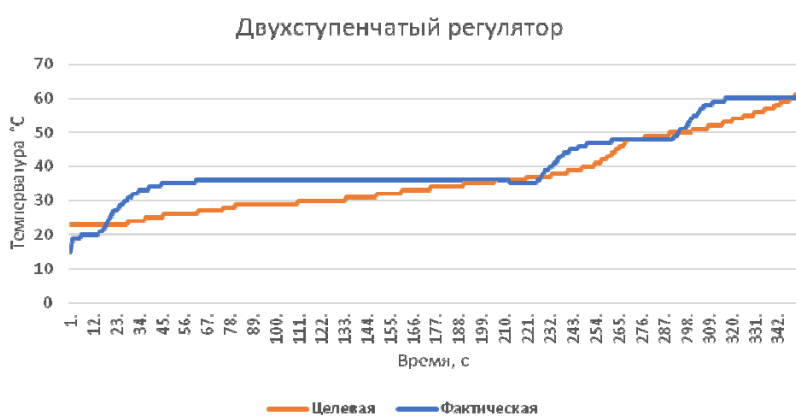


Рисунок 4 – Зависимости целевой и фактической температуры среды при эксперименте без ударно-волнового давления в двухступенчатом регуляторе

Figure 4 – Dependences of target and real medium temperature in the experiment without shock-wave pressure at not two-step controller

При данных параметрах разработанный стенд позволит осуществлять сравнительные исследования изменения структуры среды и / или скорости физико-химических процессов при наличии только температуры как отдельного фактора кавитации и при наличии температуры + ударно-волнового давления. Таким образом, будет исследование влияния ударно-волнового давления на скорость физико-химических процессов как независимого фактора.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан стенд, который позволит осуществлять сравнительные исследования изменения структуры среды и физико-химических процессов в ней при наличии только температуры как отдельного фактора кавитации и при наличии температу-

ры + ударно-волнового давления. Таким образом, разработанный стенд позволит получить новые фундаментальные знания о влиянии ультразвуковой кавитации на протекание процессов в жидкостях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nor Saadah M. Yusof. A correlation between cavitation bubble temperature, sonoluminescence and interfacial chemistry / Nor Saadah M. Yusof, Sambandam Anandan, Palani Sivashanmugam, Erico M.M. Flores, Muthupandian Ashokkumar / Ultrasonics Sonochemistry. 2022. 85. P. 1–10.
2. Красильников В.А. Введение в физическую акустику / В.А. Красильников, В.В. Крылов. М. : Наука, 1984. 403 с.
3. Голых, Р.Н. Повышение эффективности воздействия ультразвуковыми колебаниями на процессы в жидкой фазой / Р.Н. Голых : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Бийск, 2020. 437 с.

4. B. Naidji. Influence of pressure on ultrasonic cavitation activity in room temperature ionic liquids: An electrochemical study / B. Naidji, L. Hallez, A. Et Taouil, M. Rebetez, J.-Y. Hihn // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019. 54. P. 129–134.

5. Mamvura T.A. Energy changes during use of high-power ultrasound on food grade surfaces / T.A. Mamvura, S.E. Iyuke, A.E. Paterson // *South African Journal of Chemical Engineering*. 2018. 25. P. 62–73.

6. S Zhao. Acoustic cavitation and ultrasound-assisted nitration process in ultrasonic microreactors: The effects of channel dimension, solvent properties and temperature / S. Zhao, C. Yao, Q. Zhang, G. Chen, Q. Yuan // *Chemical Engineering Journal*. 2019. 374. P. 68–78.

7. Wong Ging King. Application of hybrid ultrasonic cavitation / adsorption and coagulation for treatment of palm oil mill effluent / Wong Ging King; Lee Man Jun; Augustine Chioma Affam; Wong Chee Chung; Ir. Wong Chee Swee; Johnson Olufemi Adebayo // *Nucleation and Atmospheric Aerosols*. 2019. P. 1–12.

#### **Информация об авторах**

*Р. Н. Голых – доктор технических наук, профессор кафедры «Методов и средств измерений и автоматизации» Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».*

*В. Д. Минаков – аспирант Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».*

#### **REFERENCES**

1. Yusof, N.S.M., Anandan, S., Sivashanmugam, P., Flores, E.M.M. & Ashokkumar, M. (2019). A

correlation between cavitation bubble temperature, sonoluminescence and interfacial chemistry. *Ultrasonics Sonochemistry*, 85, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105988>.

2. Krasil'nikov, V.A. & Krylov, V.V. (1984). Introduction to physical acoustics. Nauka. 403 с. (In Russ.).

3. Golykh, R.N. (2020). Increasing the efficiency of ultrasonic oscillations on the processes in systems with liquid phase autoref. dis. ... kand. tehn. nauk. (In Russ.).

4. Naidji, B., Hallez, L., Taouil, A.E., Rebetez, M. & Hihn, J.-Y. (2017). Influence of pressure on ultrasonic cavitation activity in room temperature ionic liquids: An electrochemical study. *Ultrasonics Sonochemistry*, 54, 129-134. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.02.007>.

5. Mamvura, T.A., Iyuke, S.E. & Paterson, A.E. (2020). Energy changes during use of high-power ultrasound on food grade surfaces. *South African Journal of Chemical Engineering*, 62-73. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2017.12.001>.

6. Zhao, S., Yao, C., Zhang, Q., Chen, G. & Yuan, Q. (2019). Acoustic cavitation and ultrasound-assisted nitration process in ultrasonic microreactors: The effects of channel dimension, solvent properties and temperature. *Chemical Engineering Journal*, 374, 68-78. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.05.157>.

7. King, W.G., Lee, M.D., Affam, A.C., Chung, W.C., Swee, I.W.C. & Adebayo, J.O. (2019). Application of hybrid ultrasonic cavitation / adsorption and coagulation for treatment of palm oil mill effluent. *Nucleation and Atmospheric Aerosols*. <https://doi.org/10.1063/1.5117068>.

#### **Information about the authors**

*R.N. Golykh - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the Biysk Technological Institute(branch) of the Polzunov Altai State Technical University.*

*V.D. Minakov - Ph.D. student of the Biysk Technological Institute (branch) of the Polzunov Altai State Technical University.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.*

*Статья поступила в редакцию 16 июня 2023; одобрена после рецензирования 29 февраля 2024; принята к публикации 05 марта 2024.*

*The article was received by the editorial board on 16 June 2023; approved after editing on 29 Feb 2024; accepted for publication on 05 Mar 2024.*