



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 534-8

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.032



РАСЧЁТ СКОРОСТИ КАВИТАЦИОННЫХ ПОТОКОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЖИДКОЙ ФАЗЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Александр Романович Барсуков ¹, Роман Николаевич Голых ²,
Карра Жан-Бастьен ³, Иван Александрович Маняхин ⁴

^{1, 2, 4} Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», Бийск, Россия

³ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

¹ barsukov.ar@bti.secna.ru

² grn@bti.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7708-0665>

³ jb.carrat@gmail.com

⁴ maniakhin.ia@bti.secna.ru

Аннотация. В статье изучается влияние ультразвуковых колебаний различной интенсивности на скорость акустических потоков. Подчеркивается необходимость определения оптимального уровня интенсивности ультразвуковых колебаний для достижения максимальной эффективности массопереноса и сокращения энергетических затрат на реализацию технологических процессов. Рассмотрены различные способы измерения скорости акустических потоков, включая лазерную доплеровскую анемометрию, ультразвуковую доплеровскую визуализацию и метод визуализации движения частиц, их преимущества и недостатки. В качестве метода оценки скорости акустических потоков в работе был использован метод визуализации движения частиц. Полученные результаты и найденные оптимальные параметры озвучивания могут послужить созданию научной базы для дальнейших исследований в данной области, а также модернизации существующих ультразвуковых аппаратов для обработки жидких сред.

Ключевые слова: ультразвук, кавитация, акустические потоки, метод визуализации движения частиц.

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

Для цитирования: Барсуков А. Р., Голых Р. Н., Карра Ж. Б., Маняхин И. А. Расчёт скорости кавитационных потоков при обработке жидкой фазы ультразвуковыми колебаниями различной интенсивности // Ползуновский вестник. 2025. № 4, С. 189–193. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.032. EDN: <https://elibrary.ru/MBRZOW>.

Original article

CALCULATION OF CAVITATION FLOWS VELOCITY WHEN PROCESSING LIQUID PHASE WITH ULTRASONIC OSCILLATIONS OF VARIOUS INTENSITY

Aleksandr R. Barsukov ¹, Roman N. Golykh ², Jean-Bastien Carrat ³,
Ivan A. Maniakhin ⁴

^{1, 2, 4} Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Biysk, Russia

³ Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

¹ barsukov.ar@bti.secna.ru

² grn@bti.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7708-0665>

³ jb.carrat@gmail.com

⁴ maniakhin.ia@bti.secna.ru

Abstract. The article studies the effect of ultrasonic oscillations of different intensities on the velocity of acoustic flows. The need to determine the optimal level of ultrasonic oscillation intensity to achieve maximum mass transfer efficiency and reduce energy costs for the implementation of technological processes is emphasized. Various methods for measuring the velocity of acoustic flows, including laser Doppler anemometry, ultrasonic Doppler visualization and the method of visualizing particle motion, their advantages and disadvantages are considered. The Particle Image Velocimetry method was used as a method for assessing the velocity of acoustic flows. The obtained results and the optimal

© Барсуков А. Р., Голых Р. Н., Карра Ж. Б., Маняхин И. А., 2025

parameters of sounding can serve to create a scientific basis for further research in this area, as well as the modernization of existing ultrasonic devices for processing liquid media.

Keywords: ultrasonic, cavitation, acoustic flows, Particle Image Velocimetry method.

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

For citation: Barsukov, A.R., Golykh, R.N., Carrat, J.-B. & Maniakhin I.A. (2025). Calculation of cavitation flows velocity when processing liquid phase with ultrasonic oscillations of various intensity. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 189-193. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.04.032. EDN: <https://elibrary.ru/MBRZOW>.

ВВЕДЕНИЕ

Акустические потоки, образующиеся в ходе воздействия ультразвуковых (УЗ) колебаний на жидкие и жидкодисперсные среды, способствуют инициации и интенсификации различных химико-технологических процессов. Возникающие в результате воздействия ультразвука акустические потоки среды обладают высокой скоростью, которая способствует ускоренному массообмену, возникновению турбулентностей, а также интенсивному переносу вещества, что играет важную роль при ускорении протекания химических реакций.

Важно исследовать влияние интенсивности УЗ колебаний на скорость акустических потоков в обрабатываемой среде для ускорения протекающих в ней реакций или для улучшения качества продукта, являющимся результатом протекания того или иного технологического процесса. Из исследований [1–5] известно, что на определённом уровне интенсивности ультразвуковых колебаний в различных жидких средах возникают кавитационные явления, которые могут служить интенсифицирующим фактором в ходе технологических процессов. Однако не выявлены оптимальные, позволяющие добиться эффективного массопереноса за счёт необходимого и достаточного уровня интенсивности ультразвуковых колебаний, при котором применение ультразвуковой технологии интенсификации массообменных процессов (в том числе за счёт ускорения акустических потоков) является максимально продуктивным и экономически целесообразным. Увеличение интенсивности УЗ колебаний становится возможным за счёт увеличения мощности ультразвукового генератора (что приводит к увеличению амплитуды колебаний ультразвукового излучателя), питающего ультразвуковую колебательную систему (УЗКС). При этом важно понимать, что ультразвуковое воздействие сопровождается кавитационными эффектами, и в определённых технологических процессах требуется достигнуть развитой кавитации, возникающей при соответствующем уровне интенсивности УЗ колебаний, а в некоторых процессах (например, при ультразвуковой интенсификации барботажной абсорбции) наибольшее влияние оказывает режим вырождающейся кавитации [6] (за счёт формирования пенообразной структуры). Вышесказанное подчёркивает необходимость определения оптимальной интенсивности ультразвуковых колебаний, при которой акустические потоки, вызванные кавитацией, будут обладать наибольшей скоростью, и при этом будет реализован требуемый режим кавитации.

На сегодняшний день для измерения скорости акустического потока могут быть применены следующие методы. Один из наиболее точных – метод лазерной доплеровской анемометрии [7], в основе которого лежит использование изменяющейся частоты отражённого лазера (эффект Доплера), направленного на частицы, находящиеся в потоке жидкости, для определения скоростей этих частиц и, соответственно, потока жидкой фазы. Однако ввиду сложно-

сти оборудования и дороговизны оптических компонентов для реализации данного метода, а также требования наличия посторонних частиц в жидкой фазе, использование данного подхода определения скорости потока является нецелесообразным.

Ещё одним способом отслеживания скорости акустических потоков может быть метод ультразвуковой доплеровской визуализации [8]. Ультразвуковой датчик излучает высокочастотные волны, которые отражаясь от неоднородностей жидкой фазы (например, от барботажного пузырька) изменяют свою частоту, позволяя определить скорость потока. Однако данный метод имеет ограничения, связанные с недостаточной глубиной проникновения ультразвуковых волн ввиду их затухания, в особенности в высоковязких жидкостях.

Особый интерес представляет метод визуализации движения частиц (Particle Image Velocimetry – PIV) [9]. С помощью высокоскоростной камеры получаются и анализируются изображения объёма жидкой фазы. Данный метод требует наличие частиц-трассеров в зоне фотофиксации, в роли которых могут выступать кавитационные пузырьки, перемещения которых можно отследить для определения скорости акустических потоков при ультразвуковом воздействии.

МЕТОДЫ

Так, для оценки скорости движущихся частиц было принято решение реализовать метод визуализации движения частиц с помощью библиотеки OpenPIV. С использованием данной библиотеки был разработан программный код, позволяющий проанализировать поля скорости потоков на основе корреляционного анализа изображений. Обрабатываемые изображения разделяются на ячейки для анализа, и для каждой ячейки вычисляется смещение частиц между парой кадров с помощью кросс-корреляции, что позволяет рассчитать векторы скорости.

В качестве стенда для проведения экспериментов ультразвуковой обработки жидкой фазы с принудительной аэрацией и получения исходных изображений для анализа, в данном исследовании используется установка [6], представленная на рисунке 1.

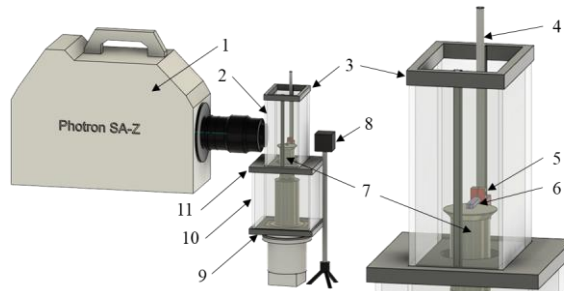


Рисунок 1 – Экспериментальная установка для фиксации акустических потоков

Figure 1 – Experimental setup for fixing acoustic flows

РАСЧЁТ СКОРОСТИ КАВИТАЦИОННЫХ ПОТОКОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЖИДКОЙ ФАЗЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Экспериментальный стенд состоит из следующих компонентов: высокоскоростная камера Photron FASTCAM SA-Z (1), позволяющая проводить съёмку с высокой частотой кадров, что необходимо для отслеживания акустических потоков с высокой точностью. В верхней части установки располагается резервуар (2), в который подается воздух через трубку (4), соединенную с аэратором (6), размещенным на креплении (5). Аэратор, находясь в верхнем резервуаре, отвечает за насыщение жидкости газом и создание барботажных пузырьков.

Для точного позиционирования аэратора и гидрофона используется рама с направляющими (3), обеспечивающая необходимую стабильность установки. В нижней части системы находится резервуар (10), отделённая от верхнего резервуара перегородкой (11).

Для обеспечения хорошей видимости в экспериментальной зоне установлен источник постоянного и равномерного освещения (8), что позволяет камере фиксировать проходящий процесс с высокой четкостью. Вся система находится на основании (9), которое обеспечивает устойчивость установки во время проведения экспериментов.

Ключевым компонентом описанной выше установки является ультразвуковая колебательная система (УЗКС) (7), которая генерирует акустические колебания высокой интенсивности в жидкости, что способствует возникновению кавитации и дроблению пузырьков газа.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С помощью вышеописанной установки была проведена серия экспериментов при различных уставках мощности (и, как следствие, различной интенсивности ультразвукового воздействия): 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 % и 100 %. Известно [10], что в настоящее время в высоковязких жидкостях создание кавитации возможно при вязкости, не превышающей 100–200 мПа·с. В качестве обрабатываемой среды использовались концентрации раствора глицерина с его различным процентным содержанием (концентрация глицерина $C_1 = 0\%$, $C_2 = 10\%$, $C_3 = 37,5\%$) и динамической вязкостью порядка 7–11 мПа·с. Уставка ультразвуковой мощности, равная 100 % в эксперименте соответствует интенсивности УЗ озвучивания порядка 10 Вт/см². На рисунке 2 представлен пример одного из полученных изображений в ходе высокоскоростной съёмки.

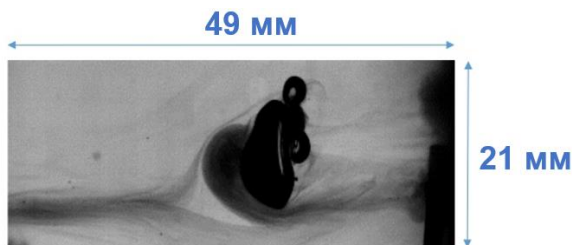


Рисунок 2 – Изображение, полученное при высокоскоростной съёмке

Figure 2 – The image obtained during high-speed shooting

Для каждого эксперимента с заданными параметрами ультразвуковой мощности и определённым соотношением содержания воды и глицерина получено порядка 500,000 кадров при частоте съёмки

210,000 к/с. Таким образом, рассматриваемый временной интервал оценки скорости движущихся потоков составил ~2,38 с. Применение высокоскоростной камеры в данном случае позволяет наиболее точно оценить скорость перемещения объектов в кадре ввиду того, что скорость схлопывания кавитационных пузырьков (порядка 1500 м/с [11]) может во много раз превосходить скорость их перемещения.

На основе данных, представленных на рисунке 2, было рассчитано фактическое расстояние, приходящееся на 1 пиксель изображения с разрешением 384x160, равное ~130 мкм. Так, при обработке и анализе полученных последовательностей кадров при разных мощностях ультразвукового воздействия и вязкостях жидкостей была рассчитана скорость акустических потоков, и получена следующая зависимость (рис.3).

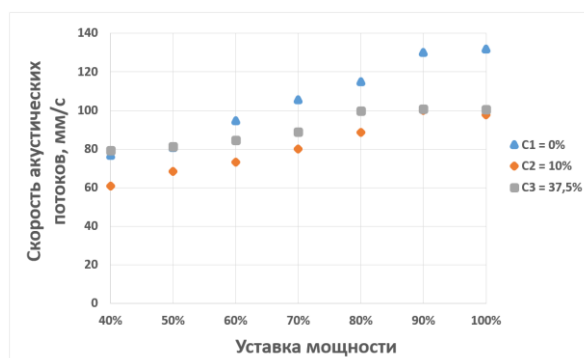


Рисунок 3 – Зависимость скорости акустического потока от уставки мощности

Figure 3 – Dependence of the acoustic flow velocity on the power setpoint

Для вычисления погрешности измерений между данными при схожей динамической вязкости (~11 мПа·с) для разных концентраций глицерина в растворе, были рассчитаны коэффициенты вариации. На основании произведённого анализа была выявлена наибольшая относительная погрешность, наблюдаемая при уставке мощности 100 % (~14,05 %), а наименьшая – при 50 % (~7,82 %). Стандартное отклонение и коэффициент вариации растут с увеличением мощности ультразвукового озвучивания, что может быть вызвано нестабильным поведением потоков на высоких мощностях из-за турбулентности или нелинейных эффектов.

Стоит отметить, что зависимость, представленная на рисунке 3, не является линейной. На более низких мощностях (уставка 40–80 %) рост скорости акустических потоков относительно равномерный, но ближе к 100 % начинает замедляться. Такое поведение скорости потоков также может быть вызвано потерей части энергии на нагрев жидкости и образование кавитации. Т.к. максимальная уставка по мощности соответствует интенсивности ~10 Вт/см², дальнейшее её увеличение может препятствовать росту скорости потока ввиду вышеописанных явлений. Это также подтверждается исследованием [11], где при обработке эпоксидной смолы с вязкостью, схожей с вязкостью растворов глицерина, применяемых в данном исследовании, была найдена оптимальная интенсивность УЗ озвучивания порядка 10–20 Вт/см², при которой достигается максимальный КПД ультразвукового воздействия,

что, в том числе может послужить для наиболее энергетически эффективной реализации УЗ оборудования для обработки вязких сред (а именно – регулирование верхней уставки мощности).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, было выявлено, что незначительное изменение вязкости не оказывает существенного влияния на акустические потоки при воздействии ультразвуком. Однако, было определено, что при увеличении и достижении интенсивности воздействия $\sim 10 \text{ Вт/см}^2$ рост скорости потоков существенно замедляется. Увеличение вязкости раствора при этом позволяет выйти на наивысшую стабильную скорость при более низкой интенсивности воздействия. Скорость исследуемых потоков при интенсивности воздействия 10 Вт/см^2 составила порядка $100\text{--}120 \text{ мм/с}$ (в пределах погрешности $\sim 14 \%$). Вышеописанные эффекты могут быть связаны с физическими ограничениями системы, такими как развитие кавитации, термическая деградация или другие нелинейные эффекты. Так, был определён характер роста скорости акустических потоков, а также найдена оптимальная интенсивность УЗ озвучивания порядка 10 Вт/см^2 , при которой дальнейшее увеличение уставки по мощности не вызывает существенных изменений в росте скорости. Найденные зависимости и абсолютные значения скорости потоков могут послужить основой для дальнейших исследований и разработки технических решений в проектировании и реализации ультразвукового оборудования, а также способу обработки вязких сред.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nguyen T.T., Asakura Y., Koda S., Yasuda K. Dependence of cavitation, chemical effect, and mechanical effect thresholds on ultrasonic frequency // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2017. Vol. 39. PP. 301–306. doi: 10.1016/j.ultsonch.2017.04.037.
2. Kerabchi N., Merouani S., Hamdaoui O. Depth effect on the inertial collapse of cavitation bubble under ultrasound: Special emphasis on the role of the wave attenuation // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018. Vol. 48. PP. 136–150. doi: 10.1016/j.ultsonch.2018.05.004.
3. Guo C., Zhu X. Effect of ultrasound on dynamics characteristic of the cavitation bubble in grinding fluids during honing process // *Ultrasonics*. 2018. Vol. 84. PP. 13–24. doi: 10.1016/j.ultras.2017.09.016.
4. Song K., Liu Y., Umar A., Ma H., Wang H. Ultrasonic cavitation: Tackling organic pollutants in wastewater // *Chemosphere*. 2024. Vol. 350. PP. 141024. doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.141024.
5. Baradaran S., Sadeghi M.T. Hydrodynamic cavitation overall intensity evaluation via noise characterization and its effect on phenol oxidative degradation // *Results in Engineering*. 2024. Vol. 23. PP. 102556. doi: 10.1016/j.rineng.2024.102556.
6. Голых Р.Н., Карра Ж.Б., Хмелёв В.Н., Маняхин И.А., Минаков В.Д., Генне Д.В., Барсуков А.Р. Влияние ультразвукового кавитационного воздействия на межфазную поверхность "газ-жидкость" при принудительной аэрации // *Прикладная механика и техническая физика*. 2024. ONLINE FIRST. doi: 10.15372/PMTF202315435.
7. Соболев В.С., Кашеева Г.А. Потенциальная точность методов лазерной доплеровской анемометрии в режиме одночастичного рассеяния //

Автометрия. 2017. Т. 53. № 3. С. 74–80. doi: 10.15372/AUT20170310.

8. Сороковикова Т.В., Морозов А.М., Жуков С.В., Рыжова Т.С., Морозова А.Д., Хорак К.И., Беляк М.А. Роль неинвазивных методов исследования в современной клинической практике // *Современные проблемы науки и образования*. 2022. Т. 2. С. 132.

9. Шульц Р., Дитль П. Местная скорость диссипации энергии в перемешиваемом резервуаре. Сравнение методов расчета // *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2018. № 2. С. 27–39. doi: 10.7868/S0568528118020032.

10. Хмелёв В.Н., Голых Р.Н., Шалунов А.В., Хмелёв С.С. Повышение эффективности ультразвукового воздействия на гетерогенные системы с несущей жидкой фазой высокой вязкости // *Южно-сибирский научный вестник*. 2013. Т. 2. № 4. С. 10–15.

11. Хмелёв В.Н., Шалунов А.В., Голых Р.Н., Хмелёв С.С. Выявление оптимальных условий ультразвуковой кавитационной обработки высоковязких и неньютоновских жидких сред // *Южно-сибирский научный вестник*. 2014. Т. 2. № 6. С. 138–142.

Информация об авторах

А. Р. Барсуков – старший преподаватель 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».

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».

Ж. Б. Карра – Ph.D., гражданин Французской Республики, научный сотрудник Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН.

И. А. Маняхин – преподаватель 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».

REFERENCES

1. Nguyen, T.T., Asakura, Y., Koda, S., & Yasuda, K. (2017). Dependence of cavitation, chemical effect, and mechanical effect thresholds on ultrasonic frequency. *Ultrasonics Sonochemistry*, 39, 301–306. doi: 10.1016/j.ultsonch.2017.04.037.
2. Kerabchi, N., Merouani, S., & Hamdaoui, O. (2018). Depth effect on the inertial collapse of cavitation bubble under ultrasound: Special emphasis on the role of the wave attenuation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 48, 136–150. doi: 10.1016/j.ultsonch.2018.05.004.
3. Guo, C., & Zhu, X. (2018). Effect of ultrasound on dynamics characteristic of the cavitation bubble in grinding fluids during honing process. *Ultrasonics*, 84, 13–24. doi: 10.1016/j.ultras.2017.09.016.

РАСЧЁТ СКОРОСТИ КАВИТАЦИОННЫХ ПОТОКОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЖИДКОЙ ФАЗЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

4. Song, K., Liu, Y., Umar, A., Ma, H., & Wang, H. (2024). Ultrasonic cavitation: Tackling organic pollutants in wastewater. *Chemosphere*, 350, 141024. doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.141024.
5. Baradaran, S., & Sadeghi, M.T. (2024). Hydrodynamic cavitation overall intensity evaluation via noise characterization and its effect on phenol oxidative degradation. *Results in Engineering*, 23, 102556. doi: 10.1016/j.rineng.2024.102556.
6. Golykh, R.N., Carrat J.B., Khmelev V.N., Maniakhin I.A., Minakov V.D., Genne D.V., & Barsukov A.R. (2024). Influence of ultrasonic cavitation on the gas-liquid interfacial surface during forced aeration. *Applied Mechanics and Technical Physics*, ONLINE FIRST. doi: 10.15372/PMTF202315435.
7. Sobelov V.S., & Kashyeva G.A. (2017). Potential accuracy of laser Doppler anemometry methods in the single particle scattering mode. *Avtometriya*, 53 (3), 74–80. doi: 10.15372/AUT20170310.
8. Sorokovikova T.V., Morozov A.M., Zhukov S.V., Ryzhova T.S., Morozova A.D., Khorak K.I., & Belyak M.A. (2022). The role of non-invasive research methods in modern clinical practice. *Contemporary Problems of Science and Education*, 2, 132.
9. Shultz R., & Dittl P. (2018). Local energy dissipation rate in a stirred tank: A comparison of calculation methods. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of Fluids and Gases*, 2, 27–39. doi: 10.7868/S0568528118020032.
10. Khmelev V.N., Golykh R.N., Shalunov A.V., &

Khmelev S.S. (2013). Increasing the efficiency of ultrasonic influence on heterogeneous systems with a high-viscosity liquid phase. *South Siberian Scientific Bulletin*, 2 (4), 10–15.

11. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., & Khmelev S.S. (2014). Identification of optimal conditions for ultrasonic cavitation treatment of high-viscosity and non-Newtonian liquid media. *South Siberian Scientific Bulletin*, 2 (6), 138–142.

Information about the authors

A. R. Barsukov, Senior Lecturer of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.

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 Altay State Technical University.

J. B. Carrat, citizen of the French Republic, Research Fellow of the Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

I. A. Maniakhin, Lecturer of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 июня 2025; одобрена после рецензирования 24 ноября 2025; принята к публикации 28 ноября 2025.

The article was received by the editorial board on 07 June 2025; approved after editing on 24 Nov 2025; accepted for publication on 28 Nov 2025.