



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 534-8

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.044

EDN: KXSJZL

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ БАРБОТАЖНОГО ПУЗЫРЬКА В ХОДЕ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ АЭРАЦИИ ПРИ РАЗНЫХ ВЯЗКОСТЯХ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

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

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

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

<sup>1</sup> barsukov.ar@bti.secna.ru

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

<sup>3</sup> jb.carrat@gmail.com

<sup>4</sup> maniakhin.ia@bti.secna.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается зависимость возмущений межфазной поверхности барботажного пузырька в ходе принудительной аэрации под воздействием ультразвука. Исследование сосредоточено на оценке влияния ультразвуковых колебаний на динамику пузырьков, а также на характеристиках их поверхности. Получены экспериментальные данные с помощью разработанного стенда для фотофиксации барботажных пузырьков высокоскоростной камерой. Полученные данные были обработаны и проанализированы, основываясь на распределении яркости изображений, для определения относительного увеличения межфазной поверхности. Выявлена предельная вязкость, при которой ультразвуковые колебания оказывают значительное влияние на поверхностные возмущения, что открывает новые перспективы для оптимизации процессов, связанных с газораспределением в жидкостях. Полученные результаты могут найти применение при разработке эффективных методов обработки высоковязких жидкостей с использованием ультразвуковых колебаний.

**Ключевые слова:** ультразвук, кавитационные явления, межфазная поверхность, барботаж, массообменные процессы.

**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 Жан-Бастьен, Маняхин И. А. Влияние ультразвуковых колебаний на формирование поверхностных возмущений барботажного пузырька в ходе принудительной аэрации при разных вязкостях жидкой фазы // Ползуновский вестник. 2025. № 3, С. 252–256. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.044. EDN: <https://elibrary.ru/KXSJZL>.

Original article

## INFLUENCE OF ULTRASONIC OSCILLATIONS ON FORMATION OF AERATION BUBBLE SURFACE DISTURBANCES DURING FORCED AERATION AT DIFFERENT VISCOSITIES OF LIQUID PHASE

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

<sup>1, 2, 4</sup> Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Biysk, Russia

<sup>3</sup> Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>1</sup> barsukov.ar@bti.secna.ru

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

<sup>3</sup> jb.carrat@gmail.com

<sup>4</sup> maniakhin.ia@bti.secna.ru

**Abstract.** The article considers the dependence of aeration bubble surface disturbances during forced aeration under the influence of ultrasonic. Experimental data were obtained using a developed stand for photographic recording of bubbling bubbles with a high-speed camera. The study is focused on assessing the effect of ultrasonic oscillations on

© Барсуков А. Р., Голых Р Н., Карра Жан-Бастьен, Маняхин И. А., 2025

# ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ БАРБОТАЖНОГО ПУЗЫРЬКА В ХОДЕ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ АЭРАЦИИ ПРИ РАЗНЫХ ВЯЗКОСТЯХ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

*the dynamics of bubbles, as well as on the characteristics of their surface. The limiting viscosity at which ultrasonic oscillations have a significant effect on surface disturbances was revealed, which opens up new prospects for optimizing processes associated with gas dissolution in liquids. The obtained results can be used in developing effective methods for processing highly viscous liquids using ultrasonic oscillations.*

**Keywords:** ultrasonic, cavitation phenomena, interphase surface, bubbling, mass transfer processes.

**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). Influence of ultrasonic oscillations on the formation of aeration bubble surface disturbances during forced aeration at different viscosities of the liquid phase. Polzunovskiy vestnik, (3), 252-256. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.03.044.EDN: <https://elibrary.ru/KXSJZL>.

## ВВЕДЕНИЕ

При реализации различных химико-технологических процессов существует значительная угроза, связанная с накоплением опасных и вредных газов, что приводит к катастрофическим последствиям, таким как взрывы, пожары и выбросы токсичных веществ в окружающую среду. Газы с высокой реакционной способностью или в больших концентрациях создают опасные условия в закрытых или слабо вентилируемых помещениях. Это особенно актуально на производственных объектах, где используются такие газы, как водород, метан, аммиак, сероводород и другие легковоспламеняющиеся или токсичные соединения. Нарушение целостности оборудования или возникновение искры может вызвать детонацию, что подчеркивает важность контроля концентрации этих газов в воздухе (в особенности в закрытых помещениях). Обеспечение эффективного поглощения подобных газов имеет ключевое значение для предотвращения аварийных ситуаций. Такие технологии, как адсорбция, абсорбция, каталитическое окисление и фильтрация, в настоящее время являются важной частью инженерных решений для защиты промышленных объектов. В частности, растворение газов в жидкости фазе играет значительную роль в процессе поглощения опасных и вредных газов, поскольку это является в настоящее время основным механизмом, обеспечивающим удаление газовых примесей из воздуха или других газовых сред [1].

Растворение газа в жидкости представляет собой процесс диффузии, который происходит гораздо медленнее по сравнению с растворением газа в газе или жидкости в жидкости. Традиционный физический принцип растворения, основанный на аэрации жидкости через барботажный процесс, оказывается недостаточно эффективным из-за крайне низкого коэффициента диффузии газа в жидкость по сравнению с диффузией газа в газе. Дробление же газовых пузырьков приводит к увеличению межфазной поверхности и способствует увеличению общей скорости диффузии газа в жидкости, а также ускоряет физико-химические процессы в приповерхностном слое на границе «газ-жидкость». Чтобы достичь скорости диффузии газа в жидкости, сопоставимой с диффузией газа, в газе необходимо дробить пузырьки до мельчайших размеров [2].

На сегодняшний день существующие устройства и установки для поглощения опасных и вредных газов показывают недостаточную эффективность ввиду наличия остаточных концентраций газов в обрабатываемом объеме. Один из перспективных способов повышения эффективности очистных устройств – использование ультразвука (УЗ) [3–9]. Так, для повышения эффективности поглощения CO<sub>2</sub> и других газовых примесей в абсорбционных установках могут применяться УЗ колебания, которые способны увеличить межфазную поверхность раздела «газ-жидкость», что,

в свою очередь, повышает скорость поглощения, пропорциональную межфазной поверхности.

Увеличение межфазной поверхности является основным способом эффективного поглощения газов жидкой фазой. Это связано с тем, что большая межфазная поверхность способствует повышению скорости обмена веществ между газом и жидкостью, что ускоряет процесс диффузии газов в жидкость и, следовательно, увеличивает эффективность поглощения. При увеличении межфазной поверхности также улучшается массоперенос, позволяя большему количеству газа перейти в жидкую фазу за единицу времени. Эффективное увеличение межфазной поверхности позволит минимизировать концентрацию токсичных и взрывоопасных газов. Важно также отметить, что вязкость жидкой фазы при исследовании влияния ультразвуковых колебаний на размер межфазной поверхности влияет на динамику движения и поведения газовых пузырьков в ней, что, в свою очередь, сказывается на эффективности поглощения газов. При низкой вязкости жидкости пузырьки газа могут легче перемещаться и образовывать большие межфазные поверхности. Однако при повышении вязкости сопротивление движению кавитационных пузырьков увеличивается, что может привести к их более медленному схлопыванию и, как следствие, снижению возмущений барботажного пузырька.

Таким образом, цель данного исследования – выявить влияние вязкости обрабатываемой среды на формирование поверхностных возмущений барботажного пузырька, а также её предельное значение, при достижении которого влияние ультразвуковых колебаний на формирование поверхностных возмущений барботажного пузырька в ходе кавитационных процессов значительно снижается и, как следствие, прекращается рост межфазной поверхности.

## МЕТОДЫ

Для выявления предельной вязкости, при которой происходит увеличение межфазной поверхности в ходе воздействия ультразвука на барботажный пузырьк, была сконструирована специализированная установка [10], которая позволяет создать область аэрации с активным процессом кавитации в зоне фокуса высокоскоростной камеры (рис. 1).

Установка состоит из следующих компонентов: высокоскоростная камера Photron FASTCAM SA-Z (1), позволяющая проводить съемку с высокой частотой кадров, что необходимо для отслеживания протекания таких быстротекущих динамических процессов, как кавитация. 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 гид-

рофона используется рама с направляющими (3), обеспечивающая необходимую стабильность установки. В нижней части системы находится резервуар (10), отделённый 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.

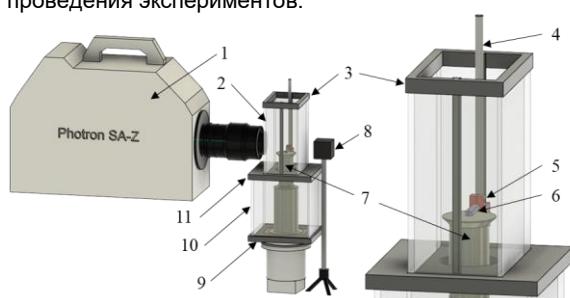


Рисунок 1 – Экспериментальная установка для фиксации барботажных пузырьков

Figure 1 – Experimental installation for fixing bubbling bubbles

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.

Верхняя часть объема имеет уменьшенные по-перечные размеры, что позволяет создать область кавитации одновременно с аэрацией в фокусной зоне высокоскоростной камеры. Перед каждым экспери-

ментом объем заполняется жидкостью. Аэрация осуществляется через канал диаметром 1,5 мм, расположенный в аэрационной насадке, который во время эксперимента размещается вблизи излучающей поверхности. При этом канал находится в центре излучающей поверхности, обеспечивая совпадение оси симметрии канала с осью симметрии ультразвуковой колебательной системы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

С использованием вышеописанной установки были зафиксированы следующие изображения барботажных пузырьков, полученные в средах, представляющих собой растворы воды с различной долей содержания глицерина в них (рис. 2).

На полученных изображениях можно заметить снижение поверхностных возмущений барботажного пузырька при концентрации глицерина, равной 50 %. Далее изображения, зафиксированные высокоскоростной камерой, были обработаны для получения сведений о межфазной поверхности. На рисунке 3 представлена схематичное изображение постановки обратной задачи геометрической оптики для определения межфазной поверхности по распределению яркости изображения. На рисунке 3, а представлено прохождение света через барботажный пузырек без деформаций, на рисунке 3, б представлено прохождение света через барботажный пузырек с деформациями.

Была разработана модель для определения профиля межфазной поверхности по изображению. Данная модель учитывает рассеяние света. Для ускорения расчёта профиля межфазной поверхности проведено сопоставление данных о профиле на основании яркости и на основании протяжённости контура [10]. Между этими данными осуществлена полиномиальная интерполяция, которая использовалась для обработки изображений.

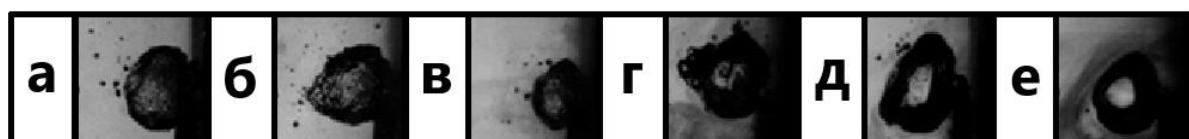


Рисунок 2 – Поверхностные возмущения барботажного пузырька при различной концентрации глицерина: а) глицерин – 0 %; б) глицерин – 10 %; в) глицерин – 37,5 %; г) глицерин – 50 %; д) глицерин – 60 %; е) глицерин – 80 %

Figure 2 – Surface perturbations of the bubbling bubble at different concentrations of glycerol: a) glycerol – 0 %; b) glycerol – 10 %; c) glycerol – 37.5 %; d) glycerol – 50 %; e) glycerol – 60 %; f) glycerol – 80 %

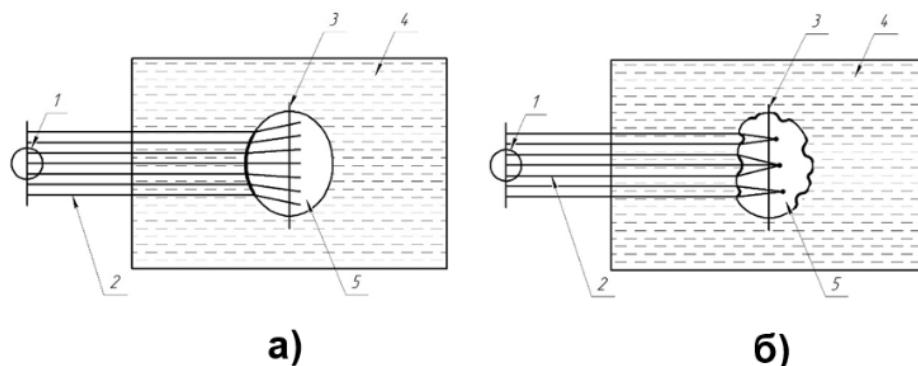


Рисунок 3 – Схематичное изображение поведения лучей света при прохождении через фокальную плоскость

Figure 3 – Is a schematic representation of the behavior of light rays passing through the focal plane

# ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ БАРБОТАЖНОГО ПУЗЫРЬКА В ХОДЕ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ АЭРАЦИИ ПРИ РАЗНЫХ ВЯЗКОСТЯХ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

На основе полученных экспериментальных данных и обработанных изображений выявлена зависимость (рисунок 4) относительного увеличения межфазной поверхности от динамической вязкости растворов глицерина разной концентрации для каждой из серий экспериментов, представленных на рисунке 2.

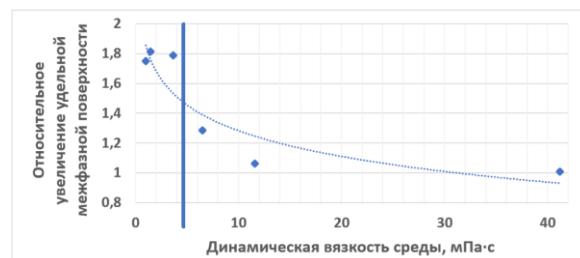


Рисунок 4 – Зависимость относительного увеличения межфазной поверхности от динамической вязкости среды

Figure 4 – Dependence of the relative increase in the interfacial surface on the dynamic viscosity of the medium

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что образование возмущений на границе фаз, вызванное дроблением части пузырьков, способствует появлению поверхностных волн, которые приводят к увеличению площади межфазной поверхности. При этом в зоне развитой кавитации увеличение площади поверхности не наблюдается – происходит только ускорение диффузии. Определена предельная вязкость –  $\sim 6$  мПа·с, при которой межфазная поверхность возрастает, если аэрационный канал располагается на небольшом расстоянии от ультразвукового излучателя. Ввиду низкого значения предельной вязкости предлагаются следующие направления для дальнейшего повышения эффективности массообмена в системах газ-жидкость. Во-первых, выбор оптимальных режимов формирования зоны частичной кавитации, когда большинство пузырьков стабильно сохраняются. Во-вторых, предварительное снижение вязкости для высокомолекулярных жидкостей путём установки второго ультразвукового излучателя напротив аэрационного канала. Наконец, предлагаются провести аналогичные исследования при повышенных температурах и определить оптимальную температуру, так как на рост межфазной поверхности влияют два взаимоисключающих фактора. С одной стороны, с увеличением температуры вязкость среды снижается, но с другой – при температуре выше  $\sim 50$  °С наблюдается спад амплитуды ударных волн, что ведёт к снижению энергии схлопывания кавитационных пузырьков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кобяков К., Титова С., Шматков Н., Коротков В., Казаков Р. Оценка возможностей для увеличения поглощения парниковых газов лесами на территории центра Европейской России // Устойчивое лесопользование. 2019. Т. 1. № 57. С. 4–20.
  2. Madygulov M.Sh., Vlasov V.A. Dissolution of gas in a stationary liquid layer: A diffusion-kinetic model and experimental studies // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2024. Vol. 227. PP. 125562. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125562.
  3. Liu Y., Sajjadi B., Chen W.-Y., Chatterjee R. Ultrasound-assisted amine functionalized graphene oxide

for enhanced CO<sub>2</sub> adsorption // Fuel. 2019. Vol. 247. PP. 10–18. doi: 10.1016/j.fuel.2019.03.011.

4. Liu X.-y., Ou H., Gregersen H. Ultrasound assisted supercritical  $\text{CO}_2$  extraction of cucurbitacin E from *Iberis amara* seeds // Industrial Crops and Products. 2020. Vol. 145. PP. 112093. doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112093.
  5. Arpa Ç., Arıdaşır I. Ultrasound assisted ion pair based surfactant-enhanced liquid-liquid microextraction with solidification of floating organic drop combined with flame atomic absorption spectrometry for preconcentration and determination of nickel and cobalt ions in vegetable and herb samples // Food Chemistry. 2019. Vol. 284. PP. 16–22. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.01.092.
  6. Hoo D.Y., Low Z.L., Low D.Y.S., Tang S.Y., Manickam S., Tan K.W., Ban Z.H. Ultrasonic cavitation: An effective cleaner and greener intensification technology in the extraction and surface modification of nanocellulose // Ultrasonics Sonochemistry. 2022. Vol. 90. PP. 106176. doi: 10.1016/j.ulsonch.2022.106176.
  7. Yuan S., Li C., Zhang Y., Yu H., Xie Y., Guo Y., Yao W. Ultrasound as an emerging technology for the elimination of chemical contaminants in food: A review // Trends in Food Science & Technology. 2021. Vol. 109. PP. 374–385. doi: 10.1016/j.tifs.2021.01.048.
  8. Liang Y., Yang L., Liu S., Xu R., Jiang W., Wu P. Study on the process intensification of superaerophobic materials to improve  $\text{CO}_2$  mass transfer efficiency // Chemical Engineering and Processing - Process Intensification. 2023. Vol. 183. PP. 109213. doi: 10.1016/j.cep.2022.109213.
  9. Orhan O.Y., Keles Y., Yavuz Ersan H., Alper E. Ultrasound-assisted desorption of  $\text{CO}_2$  from carbon dioxide binding organic liquids // Energy Procedia. 2017. Vol. 114. PP. 66–71. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1148.
  10. Гольх Р.Н., Карпа 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. ONLINEFIRST. doi: 10.15372/PMTE202315435.

## 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. Kobyakov, K., Titova, S., Shmatkov, N., Korotkov, V. & Kazakov, R. (2019). Assessment of opportunities to increase greenhouse gas absorption by forests in the central part of European Russia. *Sustainable Forestry*, 1 (57), 4-20. (In Russ.).
2. Madygulov, M.Sh. & Vlasov, V.A. (2024). Dissolution of gas in a stationary liquid layer: A diffusion-kinetic model and experimental studies. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 227, 125562. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125562.
3. Liu, Y., Sajjadi, B., Chen, W.-Y. & Chatterjee, R. (2019). Ultrasound-assisted amine functionalized graphene oxide for enhanced CO<sub>2</sub> adsorption. *Fuel*, 247, 10-18. doi: 10.1016/j.fuel.2019.03.011.
4. Liu, X.-y., Ou, H. & Gregersen, H. (2020). Ultrasound-assisted supercritical CO<sub>2</sub> extraction of cucurbitacin E from Iberis amara seeds. *Industrial Crops and Products*, 145, 112093. doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112093.
5. Arpa, Ç. & Arıdaşır, I. (2019). Ultrasound assisted ion pair based surfactant-enhanced liquid-liquid microextraction with solidification of floating organic drop combined with flame atomic absorption spectrometry for preconcentration and determination of nickel and cobalt ions in vegetable and herb samples. *Food Chemistry*, 284, 16-22. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.01.092.
6. Hoo, D.Y., Low, Z.L., Low, D.Y.S., Tang, S.Y., Manickam, S., Tan, K.W. & Ban, Z.H. (2022). Ultrasonic cavitation: An effective cleaner and greener intensification technology in the extraction and surface modification of nanocellulose. *Ultrasonics Sonochemistry*, 90, 106176. doi: 10.1016/j.ultsonch.2022.106176.
7. Yuan, S., Li, C., Zhang, Y., Yu, H., Xie, Y., Guo, Y. & Yao, W. (2021). Ultrasound as an emerging technology for the elimination of chemical contaminants in food: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 374-385. doi: 10.1016/j.tifs.2021.01.048.
8. Liang, Y., Yang, L., Liu, S., Xu, R., Jiang, W. & Wu, P. (2023). Study on the process intensification of superaerophobic materials to improve CO<sub>2</sub> mass transfer efficiency. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 183, 109213. doi: 10.1016/j.cep.2022.109213.
9. Orhan, O.Y., Keles, Y., Yavuz Ersan, H. & Alper, E. (2017). Ultrasound-assisted desorption of CO<sub>2</sub> from carbon dioxide binding organic liquids. *Energy Procedia*, 114, 66-71. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1148.
10. 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.

**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 19 ноября 2024; одобрена после рецензирования 24 июня 2025; принята к публикации 10 июля 2025.*

*The article was received by the editorial board on 19 Nov 2024; approved after editing on 24 June 2025; accepted for publication on 10 July 2025.*