



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 534-8

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.038

EDN: BNFAHV

ЧИСЛЕННОЕ ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ВЫРОЖДЕННОЙ КАВИТАЦИИ ДЛЯ МАКСИМАЛЬНОГО УВЕЛИЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ ГАЗА

Владимир Николаевич Хмелёв ¹, Александр Романович Барсуков ²,
Роман Николаевич Голых ³

^{1,2,3} Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Бийск, Россия

¹ vnh@bti.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7089-3578>

² barsukov.ar@bti.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3804-3340>

³ grn@bti.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7708-0665>

Аннотация. В работе рассматривается численное и теоретическое исследование характера распределения амплитуд звукового давления в жидкой среде, окружающей пузырь газа, для решения задач высокоэффективного газопоглощения жидкими средами при воздействии высокоинтенсивного ультразвука. Обоснована необходимость формирования зоны вырожденной кавитации для интенсификации массообменных процессов в системах «газ–жидкость». Изучено влияние амплитуды ультразвукового давления и частоты ультразвука, а также положения газового пузырька относительно излучателя на формирование зон развитой и вырожденной кавитации и характер взаимодействия ударных волн с межфазной границей. Для моделирования использовано уравнение распространения акустического поля в кавитирующей жидкости, преобразованное к уравнению Гельмгольца и дополненное соответствующими граничными условиями. Границы зон кавитации определялись на основе модели Гилмора. Полученные результаты показывают, что газовый пузырёк всегда локально и существенно изменяет структуру акустического поля и окружён пристеночным слоем с отсутствующей кавитацией и следующей за ней зоной развитой кавитации. При этом формирование зоны вырожденной кавитации приводит к уменьшению толщины слоя без кавитации у межфазной границы, что снижает затухание ударных волн и способствует увеличению межфазной поверхности «газ–жидкость». Показано, что максимальная интенсивность кавитационного воздействия достигается в области оптимальных расстояний пузырька от излучателя при частоте около 22 кГц. Результаты работы подтверждают перспективность создания зоны вырожденной кавитации для интенсификации процессов газопоглощения и могут служить основой для разработки и модернизации энергоэффективных ультразвуковых абсорбционных технологий.

Ключевые слова: ультразвук, вырожденная кавитация, абсорбция, межфазная поверхность.

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

Для цитирования: Хмелёв В. Н., Барсуков А. Р., Голых Р. Н. Численное обоснование необходимости реализации вырожденной кавитации для максимального увеличения поверхности поглощения газа // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 269–272. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.038. EDN: <https://elibrary.ru/BNFAHV>.

Original article

NUMERICAL JUSTIFICATION OF NEED TO IMPLEMENT DEGENERATE CAVITATION TO MAXIMUMLY INCREASE GAS ABSORPTION SURFACE

Vladimir N. Khmelev ¹, Aleksandr R. Barsukov ², Roman N. Golykh ³

^{1,2,3} Biysk Technological Institute (branch) of the Polzunov Altai State Technical University, Biysk, Russia

¹ vnh@bti.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7089-3578>

² barsukov.ar@bti.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3804-3340>

³ grn@bti.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7708-0665>

Abstract. The study examines a numerical and theoretical investigation of the distribution of sound-pressure amplitudes in the liquid medium surrounding a gas bubble, aimed at solving problems of highly efficient gas absorption by liquids under high-intensity ultrasound. The necessity of forming a region of degenerate cavitation to intensify mass-transfer processes in «gas-liquid» systems is substantiated. The influence of the ultrasound pressure amplitude and frequency, as well as the position of the gas bubble relative to the emitter, on the formation of regions of developed and degenerate cavitation and on the interaction of shock waves with the interfacial boundary is investigated. To perform the modeling, the acoustic-field propagation equation in a cavitating liquid was used, transformed into the Helmholtz equation and supplemented with the appropriate boundary conditions. The boundaries of the cavitation zones were determined based on the Gilmore model. The results obtained show that a gas bubble always locally and significantly alters the structure of the acoustic field and is surrounded by a

© Хмелёв В. Н., Барсуков А. Р., Голых Р. Н., 2026

near-wall layer without cavitation, followed by a region of developed cavitation. At the same time, the formation of a region of degenerate cavitation reduces the thickness of the non-cavitating layer at the interfacial boundary, which decreases shock-wave attenuation and increases the gas-liquid interfacial area. It is shown that the maximum intensity of cavitation action is achieved at optimal bubble-emitter distances at a frequency of about 22 kHz. The results confirm the promise of creating a region of degenerate cavitation for enhancing gas-absorption processes and may serve as a basis for the development and improvement of energy-efficient ultrasonic absorption technologies.

Keywords: ultrasound, degenerate cavitation, absorption, interfacial surface.

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

For citation: Khmelev, V. N., Barsukov, A. R. & Golykh, R. N. (2026). Numerical justification of need to implement degenerate cavitation to maximumly increase gas absorption surface. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 269-272. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.038. EDN: <https://elibrary.ru/BNFAHV>.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективная реализация процесса поглощения газа жидкими средами имеет важное значение при реализации многих химико-технологических процессов. При реализации процессов, в которых большую роль играют: скорость и полнота проходящего массообмена, устойчивость реализуемых режимов и экономическая эффективность разрабатываемых установок, — основной задачей является обеспечение эффективных интенсификационных условий.

К подобным процессам относятся, например, интенсификация химических реакций, регулирование pH, формирование структуры растворов и суспензий. При функционировании газоочистных систем высокая скорость и эффективность газопоглощения напрямую влияют на своевременное извлечение целевых или вредных компонентов газовых выбросов и достижение минимально возможных остаточных концентраций токсичных газов или технологически нежелательных веществ [1–2].

Известные подходы реализации массообмена в системах «газ–жидкость» имеют ограничения, связанные с малой удельной межфазной поверхностью и низкой скоростью диффузии, что снижает эффективность реализации поглощения газов и приводит к увеличению энергозатрат [3].

Один из наиболее эффективных способов увеличения поверхности поглощения газов является реализация технологического процесса при участии ультразвуковых (УЗ) колебаний. Эффективность ультразвука в контексте интенсификации поглощения газов обусловлена формированием устойчивых кавитационных полей, сопровождающихся возникновением большого числа газовых и парогазовых пузырьков и увеличением межфазной поверхности, и, как следствие, увеличением коэффициента массообмена [4–6].

При использовании ультразвука как интенсифицирующего фактора в процессе абсорбции степень развитости формируемой кавитационной зоны и характер распределения амплитуды звукового давления в озвучиваемой области определяют степень роста межфазной границы «газ–жидкость». Исследования влияния высокоинтенсивного ультразвука [7] показывают эффективность режима формирования развитой кавитации в обрабатываемой среде для увеличения поверхности поглощения газа (за счёт высокой концентрации кавитационного облака и высокоамплитудного гидродинамического воздействия коллапсирующих кавитационных пузырьков).

При этом интерес также представляет создание области с вырожденной кавитацией при повышенном уровне звукового давления ($> 2,5$ атм), характеризующейся мелкодисперсной, насыщенной и динамически стабильной пузырьковой структурой. Потенциально формирование условий (определённые частота, интенсивность ультразвука, расстояние от УЗ излучателя и т.п.) для возникновения зоны вырожденной кавитации может обеспечить скорость интенсификации массообменных процессов «газ–жидкость» недостижимую при воздействии развитого кавитационного облака на межфазную поверхность.

Ввиду вышесказанного, численное обоснование необходимости реализации вырожденной кавитации и экспериментальная верификация предложенного подхода приобретают высокую практическую значимость для задачи высокоэффективного поглощения газов.

МЕТОДЫ

В рамках данной работы было проведено теоретическое исследование посредством математического моделирования, позволяющего произвести оценку эффективности формирования зоны вырожденной кавитации, окружающей газовый пузырёк (например, при барботажной абсорбции).

Анализ влияния частоты УЗ колебаний на интенсивность кавитационных процессов показал, что её увеличение в широком диапазоне свойств жидкости (от низких до повышенных значений вязкости и поверхностного натяжения) ведёт к уменьшению максимального радиуса кавитационного пузырька, а также снижает отношение максимального радиуса к минимальному при фиксированной амплитуде звукового давления [8]. Это, в свою очередь, уменьшает энергию, высвобождаемую при схлопывании пузырьков, а значит и удельную мощность ударных волн, что приводит к снижению общей эффективности кавитационного воздействия.

В то же время чрезмерное уменьшение частоты колебаний оказывает противоположный эффект: хотя амплитуда схлопывания возрастает, число ударных волн, формируемых в единицу времени, заметно сокращается, что также ограничивает интенсивность кавитации.

С повышением частоты ультразвукового воздействия выше 40 кГц по сравнению с 20 кГц происходит заметное уменьшение давления, развиваемого в пузырьке в момент его схлопывания. Одновременно возрастает пороговая амплитуда акустического давления, необходимая для инициирования кавитации. Совокупность этих факторов приводит к ослаблению ультразвукового воздействия, снижающему способность кавитации эффективно увеличивать межфазную поверхность пузырьков.

При дальнейшем увеличении частоты этот эффект лишь усиливается: например, уже при 100 кГц максимальное давление при коллапсе оказывается существенно ниже, чем при 20 кГц или 40 кГц, а с последующим ростом частоты происходит монотонное падение величины. Таким образом, определено [9], что кавитационные пузырьки совершают максимальную работу на частоте ~ 22 кГц, поэтому данную частоту УЗ озвучивания следует считать оптимальной для ультразвуковой обработки жидкостей и подходящей для расчётов распределения амплитуд звукового давления.

Распределение кавитационных зон в объёме зависит от распределения амплитуд звукового давления, которое, в свою очередь, связано с эквивалентными акустическими характеристиками кавитирующей среды.

Для выявления распределения амплитуд звукового давления и эквивалентных акустических характеристик кавитирующей среды использовано уравнение (1) [10], описывающее распространение акустического поля в

ЧИСЛЕННОЕ ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ВЫРОЖДЕННОЙ КАВИТАЦИИ ДЛЯ МАКСИМАЛЬНОГО УВЕЛИЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ ГАЗА

жидкости, содержащей кавитационные пузырьки, заполненные паром или газом.

$$\Delta p - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\rho_0 \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где t – время, с; ρ_0 – плотность сплошной жидкой фазы, кг/м³; p – мгновенное значение давления жидкости, Па; c_0 – скорость звука в сплошной жидкой фазе, м/с; δ – объёмное содержание пузырьков в текущий момент времени t .

Для решения уравнения использовалось разложение Фурье звукового давления и объёмного содержания кавитационных пузырьков (2–3).

$$\bar{p}(\mathbf{r}, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{p}_n(\mathbf{r}) e^{-i n \omega t}, \quad (2)$$

$$\bar{\delta}(\mathbf{r}, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{\delta}_n(\mathbf{r}) e^{-i n \omega t}, \quad (3)$$

где ω – круговая частота колебаний акустического излучателя в жидкой среде, с⁻¹; $\mathbf{r}$ – радиус-вектор точки жидкости, м.

В результате разложения Фурье уравнение сведено к уравнению Гельмгольца (4) для первой гармоники.

$$\Delta \bar{p}_1 + \left(K_{**} \left(\bar{p}_1 \right) + i K_* \left(\bar{p}_1 \right) \right) \bar{p}_1 = 0, \quad (4)$$

где K_{**} – эффективное волновое число кавитирующей среды, м⁻¹; K_* – эффективный коэффициент поглощения в кавитирующей среде, м⁻¹.

Данное уравнение дополняется граничным условием на поверхности ультразвукового излучателя (5):

$$\frac{\partial \bar{p}_1}{\partial \mathbf{n}} = \rho \omega^2 A_n; \quad (5)$$

на твёрдой границе технологического объёма (6):

$$\bar{p}_1 = 0; \quad (6)$$

на границе барботажного пузырька (7).

$$\frac{\partial \bar{p}_1}{\partial \mathbf{n}} = 0. \quad (7)$$

Следует отметить, что вдали от пузырька газа капиллярная волна практически не влияет на поле звукового давления. При этом вблизи пузырька капиллярная волна оказывает лишь незначительное влияние на звуковое давление – это объясняется тем, что давление фиксировано и равно нулю на границе пузыря, а также тем, что длина и амплитуда капиллярных волн невелики.

По этой причине обратное воздействие капиллярных волн на поле давления игнорируется и все расчёты выполняются так, как если бы воздушный пузырёк не был возмущён.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведённых расчётов выявлено, что барботажный пузырёк всегда локально нарушает поле давления и зону кавитации и непосредственно окружён зоной развитой кавитации, а не вырожденной.

Была получена визуализация распределения амплитуды звукового давления для пузырька, находящегося в зоне развитой кавитации (на удалении от УЗ излучателя 40 мм), представленная на рисунке 1.

Также получена визуализация распределения амплитуды звукового давления для пузырька, находящегося в зоне вырожденной кавитации (вблизи УЗ излучателя), представленная на рисунке 2. Границы между типами зон кавитации разделялись с использованием модели Гилмора для диапазона внешних давлений. На основе этих расчётов устанавливалось, приводит ли воздействие к его схлопыванию с последующим формированием ударной волны (режим развитой кавитации) либо же пузырёк сохраняет устойчивые колебания без разрушения (режим вырожденной кавитации).

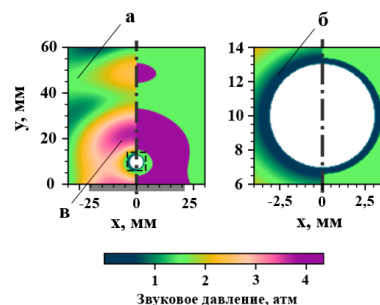


Рисунок 1 – Распределение амплитуды звукового давления (пузырь газа в зоне развитой кавитации)

Figure 1 – Distribution of the sound pressure amplitude (gas bubble in the zone of developed cavitation)

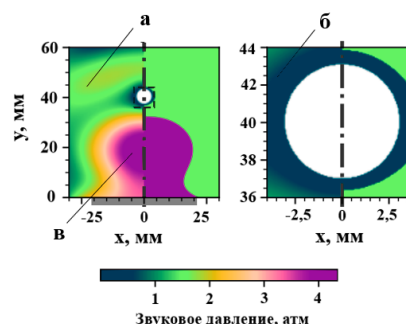


Рисунок 2 – Распределение амплитуды звукового давления (пузырь газа в зоне вырожденной кавитации)

Figure 2 – Distribution of the sound pressure amplitude (gas bubble in the zone of degenerate cavitation)

На основе значения уровня звукового давления можно выделить следующие зоны развития кавитации:

- зона развитой кавитации: при звуковом давлении от 0,50 до 2,27 атм – зона, где кавитационные пузыри схлопываются и генерируют ударные волны (область (а) на рисунках 1–2);
- зона отсутствия кавитации: при звуковом давлении ниже 0,50 атм – кавитационные пузырьки отсутствуют (область (б) на рисунках 1–2);
- зона вырожденной кавитации: при звуковом давлении выше 2,27 атм – зона, где кавитационные пузыри крупные, колеблются, но не схлопываются (область (в) на рисунках 1–2).

Из рисунков 1–2 видно, что в непосредственной близости к межфазной границе присутствует очень тонкий пристеночный слой, где кавитационных пузырей нет. Это объясняется градиентом звукового давления, вызванным условием нулевого нормального давления на стенке пузыря.

В результате ударные волны, создаваемые схлопыванием кавитационных пузырьков в близлежащей зоне локальной развитой кавитации, меньше затухают до достижения воздушного пузыря, если слой без кавитации тоньше (режим вырожденной кавитации), в отличие от ситуации, когда слой толще (режим развитой кавитации). Толщина этого слоя зависит от положения барботажного пузырька относительно УЗ излучателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты математического моделирования демонстрируют следующее: формирование зоны вырожденной кавитации приводит к уменьшению толщины слоя без кавитации у межфазной границы, что снижает затухание ударных волн и способствует увеличению межфазной поверхности «газ–жидкость».

Теоретически обоснована эффективность способа повышения скорости массопереноса газа в жидкости, основанного на формировании волн на поверхности стабильных

газовых пузырьков в жидкости при схлопывании кавитационных пузырьков, создаваемых ультразвуком в режиме вырожденной кавитации. Выполнена оценка режимов и условий, позволяющих достичь предельно возможное увеличение межфазной поверхности с помощью ультразвукового способа. Выполненная оценка показала, что необходимо воздействовать на частоте ультразвуковых колебаний, близкой к 22 кГц, поскольку при данной частоте совершается максимальная работа по расширению кавитационного пузырька, переходящего в схлопывание. При этом амплитуда звукового давления вблизи излучателя должна обеспечивать зону вырожденной кавитации и положение барботажного пузырька в зоне вырожденной кавитации обеспечивает максимальное увеличение межфазной поверхности.

Таким образом, результаты, полученные в данной работе, подтверждают перспективность данного подхода для интенсификации процессов газопоглощения и могут служить фундаментом для последующей разработки и модернизации энергоэффективных ультразвуковых абсорбционных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Amin R., Islam A., Islam R., Islam S. Simulation of N₂ Gas Separation Process from Air // *IOSR Journal of Applied Chemistry*. 2014. Vol. 6, № 5, pp. 9–13.
2. Liang Y., Yang L., Liu S., Xu R., Jiang W., Wu P. Study on the process intensification of superaerophobic materials to improve CO₂ mass transfer efficiency // *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 2023. Vol. 183. p. 109213. doi: 10.1016/j.cep.2022.109213.
3. Новоселов А.Г., Духий А.Б., Голикова Е.Ю. Молекулярная диффузия газов в жидкости. Коэффициенты молекулярной диффузии диоксида углерода в воде // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*. 2014. № 2.
4. Калинин И.В., Фаткуллин Р.И. Применение эффектов ультразвукового кавитационного воздействия как фактора интенсификации извлечения функциональных ингредиентов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии»*. 2016. Т. 4, № 1. С. 64–70.
5. Никонова А.С. Совершенствование процесса получения копильной жидкости с применением ультразвука в целях интенсификации абсорбционных и коагуляционных процессов // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*. 2015. № 2. С. 90–97.
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. p. 106176. doi: 10.1016/j.ultsonch.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. Радзюк А.Ю., Истягина Е.Б., Кулагина Л.В., Жуиков А.В. Современное состояние использования кавитационных технологий (краткий обзор) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022. Т. 333, № 9. С. 209–218. doi: 10.18799/24131830/2022/9/3623.
9. Brenner M.P., Hilgenfeldt S., Lohse D. Single-bubble sonoluminescence // *Reviews of Modern Physics*. 2002. Vol. 74, pp. 425–484.
10. Golykh R., Shalunov A., Khmelev V. [et al.]. Evaluation of optimum modes and conditions providing increasing ultrasonic cavitation area in high-viscous and non-Newtonian fluids // *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*. 2020. № 2. pp. 101–108.

Информация об авторах

В. Н. Хмелёв – доктор технических наук, профес-

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

сор кафедры «Методов и средств измерений и автоматизации» БТИ АлтГТУ.

А. Р. Барсуков – старший преподаватель кафедры «Методов и средств измерений и автоматизации» БТИ АлтГТУ.

Р. Н. Голых – доктор технических наук, профессор кафедры «Методов и средств измерений и автоматизации» БТИ АлтГТУ.

REFERENCES

1. Amin, R., Islam, A., Islam, R. & Islam, S. (2014). Simulation of N₂ gas separation process from air. *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 6(5), 9-13.
2. Liang, Y., Yang, L., Liu, S., Xu, R., Jiang, W. & Wu, P. (2023). Study on the process intensification of superaerophobic materials to improve CO₂ mass transfer efficiency. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 183, 109213. doi: 10.1016/j.cep.2022.109213.
3. Novoselov, A.G., Duzhiy, A.B. & Golikova, E.Yu. (2014). Molecular diffusion of gases in liquids. Diffusion coefficients of carbon dioxide in water. *ITMO University Scientific Journal. Series "Food Production Processes and Equipment"*, (2). (In Russ.).
4. Kalinina, I.V. & Fatkullin, R.I. (2016). Application of ultrasonic cavitation effects as a factor of intensification in extracting functional ingredients. *Bulletin of South Ural State University. Series "Food and Biotechnology"*, 4(1), 64-70. (In Russ.).
5. Nikonova, A.S. (2015). Improvement of the smoke liquid production process using ultrasound to intensify absorption and coagulation processes. *ITMO University Scientific Journal. Series "Food Production Processes and Equipment"*, (2), 90-97. (In Russ.).
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. Radzyuk, A.Yu., Istyagina, E.B., Kulagina, L.V. & Zhuikov, A.V. (2022). Current state of the application of cavitation technologies (a brief review). *Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 333(9), 209-218. (In Russ.). doi: 10.18799/24131830/2022/9/3623.
9. Brenner, M.P., Hilgenfeldt, S. & Lohse, D. (2002). Single-bubble sonoluminescence. *Reviews of Modern Physics*, 74, 425-484.
10. Golykh, R., Shalunov, A., Khmelev, V.Yu. & others. (2020). Evaluation of optimum modes and conditions providing increased ultrasonic cavitation area in high-viscous and non-Newtonian fluids. *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*, (2), 101-108.

Information about the authors

V.N. Khmelev - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the BTI (branch) of the Polzunov Altai State Technical University.

A.R. Barsukov - Senior Lecturer of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the BTI (branch) of the Polzunov Altai State Technical University.

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