



Научная статья
2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)
УДК66.084.8

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.028



ЭФФЕКТ ВОЗДЕЙСТВИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ОБЛАСТИ С ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА ФАЗ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ПРОЦЕССЫ ГАЗОРАСТВОРЕНИЯ: ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ

Владимир Николаевич Хмелёв ¹, Роман Николаевич Голых ²,
Сергей Николаевич Цыганок ³, Денис Сергеевич Абраменко ⁴,
Александр Романович Барсуков ⁵, Вячеслав Дмитриевич Минаков ⁶

1, 2, 3, 4, 5, 6 Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

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

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

³ grey@bti.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7832-3510>

⁴ ades@bti.secna.ru

⁵ barsukov.ar@bti.secna.ru

⁶ slava2926@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются особенности влияния ультразвуковой кавитационной области на межфазную границу в системе «жидкость–газ» с целью повышения площади межфазной поверхности для интенсификации массообменных процессов, происходящих в данной системе. В исследовании рассматривался тонкий плёночный слой жидкой фазы, распределённый по поверхности твёрдого тела. Проведённые исследования и анализ позволили установить, что кавитационная зона, порождённая ультразвуковыми колебаниями, способствует возникновению капиллярных волн, что непосредственно приводит к увеличению площади соприкосновения взаимодействующих фаз. Проведена работа по выявлению оптимальных режимов ультразвукового воздействия с целью обеспечения наибольшей площади межфазной поверхности. Выявленные оптимальные режимы ультразвукового облучения в дальнейшем позволят осуществлять физико-химические процессы с участием различных веществ с увеличенной эффективностью. Установлено увеличение площади межфазной поверхности вплоть до 3-х раз при воздействии ультразвука при частоте 60 кГц в зависимости от конкретных условий реализации технологических процессов и характеристик веществ, участвующих в них. Полученные результаты могут быть применены на практике, например, для более эффективного процесса газорастворения. В этом случае такие процессы, как очистка газовых смесей и получение целевых компонентов, имеют высокую эффективность реализации в сравнении с неоптимальными режимами ультразвукового воздействия или вовсе без использования ультразвуковых колебаний для интенсификации указанных выше процессов.

Ключевые слова: ультразвук, кавитация, межфазная граница «газ–жидкость», карбоновый след, растворение газа, массообменные процессы.

Благодарности: Исследования возможности применения ультразвука для кавитационного воздействия выполнены при поддержке гранта РФФИ 22-29-00828 «Кавитационно-акустическое формирование многосвязной межфазной поверхности «газ–жидкость» для решения проблемы высокоэффективного поглощения газов».

Для цитирования: Эффект воздействия кавитационной области с границей раздела фаз и его влияние на процессы газорастворения: исследование и анализ / В. Н. Хмелёв [и др.] // Ползуновский вестник. 2024. № 2, С. 217–222. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.028. EDN: <https://elibrary.ru/NYNSAX>.

Original article

EFFECT OF CAVITATION REGION INFLUENCE WITH THE PHASE BOUNDARY AND ITS INFLUENCE ON GAS DISSOLUTION PROCESSES: RESEARCH AND ANALYSIS

Vladimir N. Khmelev¹, Roman N. Golykh², Sergey N. Tsyganok³,
Denis S. Abramenko⁴, Aleksandr R. Barsukov⁵, Vyacheslav D. Minakov⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Biysk, Russia

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

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

³ grey@bti.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7832-3510>

⁴ ades@bti.secna.ru

⁵ barsukov.ar@bti.secna.ru

⁶ slava2926@mail.ru

Abstract. *The article discusses the features of the ultrasonic cavitation region influence on the interphase boundary in the "liquid-gas" system with the aim of increasing the interphase surface area to intensify the mass transfer processes occurring in this system. The study examined a thin film layer of the liquid phase distributed over the surface of a solid. The conducted research and analysis made it possible to establish that the cavitation zone generated by ultrasonic vibrations contributes to the emergence of capillary waves, which directly leads to an increase in the contact area of the interacting phases. Work has been carried out to identify optimal modes of ultrasonic exposure in order to ensure the largest interfacial surface area. The identified optimal modes of ultrasonic irradiation will in the future make it possible to carry out physical and chemical processes involving various substances with increased efficiency. It has been established that the interfacial surface area increases up to 3 times when exposed to ultrasound at a frequency of 60 kHz, depending on the specific conditions for the implementation of technological processes and the characteristics of the substances involved in them.*

The results obtained can be applied in practice, for example, for a more efficient gas dissolution process. In this case, processes such as the purification of gas mixtures and the production of target components have a high implementation efficiency, in comparison with non-optimal modes of ultrasonic exposure or without the use of ultrasonic vibrations at all to intensify the above processes.

Keywords: *ultrasonic, cavitation, gas-liquid interface, carbon footprint, gas dissolution, mass transfer processes.*

Acknowledgements: *Studies of the possibility of using ultrasound for cavitation action were supported by RNF grant 22-29-00828 "Cavitation-acoustic formation of multi-cohesive interfacial surface "gas-liquid" to solve the problem of highly efficient gas absorption".*

For citation: Khmelev, V.N., Golykh, R.N., Tsyganok, S.N., Abramenko, D.S., Barsukov, A.R. & Minakov, V.D. (2024). Effect of cavitation region influence with the phase boundary and its influence on gas dissolution processes: research and analysis. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 217-222. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2024.02.028. EDN: <https://NYNSAX>.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность протекания многих физико-химических процессов в большой степени зависит от площади соприкосновения взаимодействующих фаз. Например, в системах «газ–жидкость» на скорость протекания таких процессов, как абсорбция, дегазация и пр., в значительной степени влияет не только скорость проникновения одного вещества в другое, обусловленная коэффициентом диффузии, но и площадь межфазной поверхности.

Одним из эффективных способов обеспечения увеличения межфазной поверхности в системах «газ–жидкость» является воздействие кавитационной области на раздел фаз.

Цикл расширения и последующего коллапсирования кавитационных полостей приводит к возникновению ударных волн, быстро затухающих в пространстве. В связи с этим появляется необходимость в непосредственном контакте межфазной поверхности с кавитационной областью с целью эффективного использования формирующихся капиллярных волн для увеличения области контакта взаимодействующих фаз. На сегодняшний день твердотельные излучатели ультразвука являются эффективным средством порождения явления кавитации в жидкой фазе [1–3]. Применение таких излучателей на частоте 20...70 кГц позволяет реализовать возникно-

ЭФФЕКТ ВОЗДЕЙСТВИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ОБЛАСТИ С ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА ФАЗ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ПРОЦЕССЫ ГАЗОРАСТВОРЕНИЯ: ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ

вление кавитационных пузырьков с дальнейшим порождением капиллярных волн на границе раздела жидкой и газообразной фазы с минимальными энергетическими затратами.

Интерес к интенсификации представляет собой увеличение удельной площади межфазной поверхности. Распределение жидкой фазы по твёрдой поверхности с дальнейшим облучением ультразвуковыми колебаниями позволяет добиться требуемого результата. Однако возникает проблема калибровки ультразвукового оборудования для обеспечения требуемых параметров ультразвукового воздействия. В связи с этим появляется потребность в разработке модели, позволяющей определить режим ультразвукового воздействия, при котором увеличение межфазной поверхности «газ–жидкость» будет максимальным.

При разработке модели следует учитывать способность твёрдой поверхности к отражению ударных волн. Данный фактор оказывает важное влияние при формировании ультразвуком кавитационных пузырьков в жидкой фазе, т.к. отражающие явления приводят к их асимметричному коллапсированию.

С учётом вышесказанного, модель взаимодействия кавитационной области с межфазной поверхностью «газ–жидкость» позволяет выявить оптимальные характеристики воздействия ультразвуком, позволяющие обеспечить наибольшее увеличение контакта между жидкой и газовой фазами.

МЕТОДЫ

В первую очередь необходимо рассмотреть основные этапы процесса формирования капиллярных волн на границе раздела жидкой и газовой фазы при возникновении кавитационных явлений, инициированных воздействием ультразвуковых колебаний.

Сначала происходит увеличение радиуса кавитационного пузырька за счёт его расширения. Из-за незначительных радиальной скорости движения стенок кавитационного пузырька он сохраняет свою сферическую симметрию.

Затем происходит асимметричное коллапсирование кавитационного пузырька. Радиус пузырька после схлопывания становится минимальным. При этом во время схлопывания кавитационного пузырька возникает ударная волна, которая распространяется в жидкой фазе, представленной плёнкой жидкости.

На рисунке 1 представлена схема, использованная для исследования процесса возникновения капиллярной волны на поверхности «газ–жидкость».

На параметры возникающих кавитационных пузырьков под воздействием ультразвука

влияют следующие факторы: частота ультразвуковых колебаний (при которой происходит обработка межфазной границы), амплитуда воздействия поверхности твёрдого тела, физические свойства жидкой фазы. Поэтому при расчёте таких параметров кавитационного пузырька, как его максимальный радиус (R_{max}) и расстояние центра (z) до твёрдой поверхности, необходимо учитывать эти особенности. При этом имеют место два допущения.

Первое допущение. Как было сказано ранее, увеличение пузырька является сферически симметричным. При этом с течением времени центр пузырька осуществляет вертикальные движения по отношению к твёрдой поверхности.

Второе допущение. Ввиду того, что кавитационные пузырьки, располагающиеся вблизи твёрдой поверхности, оказывают наибольшее влияние при возникновении капиллярных волн, допущение предполагает, что изначально центр зарождающегося кавитационного пузырька располагается на малом расстоянии от твёрдой поверхности. При этом R_{max} кавитационного пузырька рассчитывается уравнением Нолтинга–Непайреса [3]:

$$\rho \left(\frac{3}{2} \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 + R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} \right) = -4\mu \frac{\partial R}{R} + p_{II} + \left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - p_0 + 4\pi^2 f^2 \rho A h \sin(2\pi f t) ;$$

где R – мгновенный радиус кавитационного пузырька, м; R_0 – радиус кавитационного зародыша, м; σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м; ρ – плотность жидкости, кг/м³; p_0 – статическое давление в жидкости, Па; f – частота ультразвуковых колебаний, Гц; h – толщина плёнки жидкости, м; A – амплитуда ультразвуковых колебаний, м.

С помощью уравнения В.В. Рождественского [4] можно вычислить расстояние между твёрдой поверхностью и центром кавитационного пузырька, в тот момент, когда он имеет максимальный размер:

$$6b^2 \frac{\partial b}{\partial t} \frac{\partial R}{\partial t} + 2b^2 R \frac{\partial^2 b}{\partial t^2} + 3R^2 \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 = 0 ;$$

где b – расстояние между твёрдой поверхностью и центром кавитационного пузырька, м.

С помощью уравнения Гилмора осуществляется расчёт коллапсирования кавитационного пузырька. Была определена зависимость между нормальной компонентой скорости, приобретаемой свободной поверхностью жидкости, и расстоянием между рассматриваемой точкой свободной поверхности и точкой максимально достигаемой скорости.

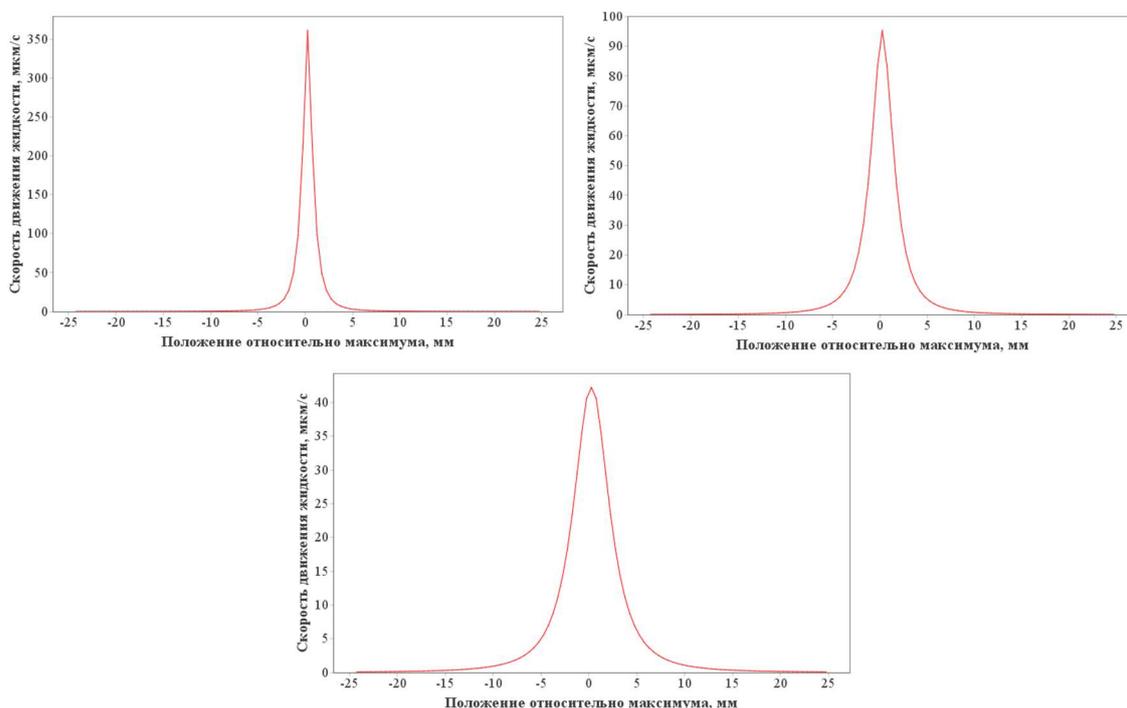


Рисунок 1 – Характер движения жидкости в зоне близости к свободной поверхности

Figure 1 - The nature of fluid movement in the area of proximity to a free surface

Выражение (1) позволяет рассчитать смещённый профиль капиллярной волны:

$$\xi(r, t) = -\frac{1}{\rho} \int_0^{t_1} \int_0^{t_2} \frac{\partial p}{\partial z} \partial t_1 \partial t_2, \quad (1)$$

где $\xi(r, t)$ – смещённая граница между газом и жидкостью вдоль оси z , м.

Определённую форму капиллярной волны можно использовать при вычислении удельной площади межфазной поверхности в системе «газ–жидкость». Здесь принимаются в расчёт такие возникающие явления, как дробление пузырьков и коалесценция [4]. Данные вычисления производятся по формуле (2).

$$S = \frac{1}{h} + \frac{4}{\pi} f \left\langle \frac{j-1}{R_{MAX}^2 U} \right\rangle^{0,5\lambda} \int_0^{0,5\lambda} r \sqrt{1 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial r} \right)^2} \partial r, \quad (2)$$

где S – удельная площадь межфазной границы, m^2/m^3 ; λ – длина капиллярной волны (м),

вычисляемая из условия $\frac{\partial \xi}{\partial r} \left(\frac{\lambda}{2}, t \right) = 0$; n – концентрация кавитационных пузырьков [5], m^{-3} ; f – частота ультразвуковых колебаний, Гц; R_{MAX} – максимальный радиус кавитационного пузырька, который достигается в стадии расширения, м; U – средняя скорость сближения кавитационных пузырьков, определяемая силами Бьеркнеса, м/с; j – количество кавитационных зародышей, которые формируются при дроблении отдельного пузырька; $\langle \rangle$ – усреднение по толщине плёнки жидкости; h – толщина плёнки, м.

220

РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработанная модель позволяет наблюдать изменения в размере межфазной поверхности в системе «газ–жидкость» при воздействии ультразвука с разными значениями параметров. К таким параметрам относятся: частота и амплитуда колебаний твёрдого тела, на поверхности которого располагается плёнка жидкости, являющейся промежуточным звеном для газовой и жидкой фаз, между которыми предполагается осуществление массообменных процессов (зависимость представлена на рисунке 2). А также модель позволяет увидеть зависимость площади межфазной поверхности от свойств жидкой фазы (зависимость представлена на рисунке 3).

Отношение удельной площади межфазной границы под действием ультразвуковых колебаний ($S_{УЗ}$) к площади, не озвучиваемой ультразвуком ($S_{БЕЗ УЗ}$):

$$K = \frac{S_{УЗ}}{S_{БЕЗ УЗ}},$$

где K – относительное увеличение площади межфазной поверхности.

На рисунках 2 и 3 прерывистыми линиями обозначается потеря устойчивости капиллярной волны и ее последующие разделение [6]. График зависимости от частоты (рисунок 3, б) построен при стабильной капиллярной волне (на максимальных амплитудах).

ЭФФЕКТ ВОЗДЕЙСТВИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ОБЛАСТИ С ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА ФАЗ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ПРОЦЕССЫ ГАЗОРАСТВОРЕНИЯ: ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ

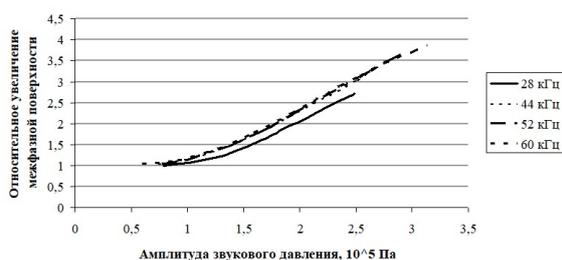


Рисунок 2 – Графики, отражающие изменение площади межфазной поверхности при изменении амплитуды звукового давления на различных частотах колебаний

Figure 2 - Graphs reflecting the change in the area of the interfacial surface when the amplitude of the sound pressure changes at different oscillation frequencies

Можно сделать вывод о том, что рост амплитуды и частоты приводит к увеличению площади межфазной поверхности [1, 5].

Также из графиков видно, что существует некий оптимум при частоте в 60 кГц, обусловленный значительным ростом потерь энергии в излучателе ультразвука. При этом наблюдается снижение роста межфазной поверхности, что говорит о том, что применение более высоких частот (свыше 60 кГц) является неоптимальным.

На рисунке 3 представлены зависимости удельной площади межфазной поверхности от амплитуды. Здесь были учтены такие свойства жидкости, как вязкость (рисунок 3, а) и поверхностное натяжение (рисунок 3, б).

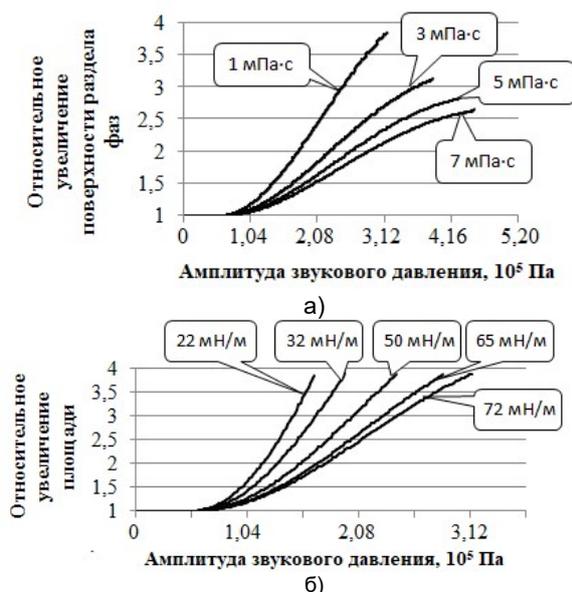


Рисунок 3 – Относительное увеличение площади межфазной поверхности в зависимости от амплитуды при различных свойствах жидкости (частота 60 кГц)

Figure 3 - Relative increase in the area of the interfacial surface depending on the amplitude at different properties of the liquid (frequency 60 kHz)

Анализ графиков, приведенных на рисунке 3, показал влияние жидкости и ее свойств на изменение площади межфазной поверхности. В частности, снижение вязкости приводит к уменьшению удельной площади межфазной поверхности. Это объясняется тем, что происходит поглощение ударных волн в жидкости и силы трения оказывают сопротивление. Эти факторы приводят к увеличению предела радиуса кавитационного пузырька.

В статье описана созданная модель взаимодействия кавитационной зоны, которая возникает при воздействии высокоинтенсивных механических колебаний ультразвуковой частоты на жидкую фазу в дисперсной системе, с межфазной поверхностью в системе «газ-жидкость». Такое взаимодействие обуславливает возникновение капиллярных волн, приводящих к увеличению межфазной поверхности.

Исследование модели позволило получить оптимальные параметры ультразвукового воздействия. Критерием оптимальности является обеспечение максимальной площади межфазной поверхности в системе «газ-жидкость». Были рассчитаны предельные значения амплитуды колебаний твердой поверхности, при которых происходило диспергирование жидкой фазы – капиллярные волны распадались на мелкие капли.

Определена оптимальная частота ультразвукового воздействия, которая составила 60 кГц. При ней происходит увеличение площади межфазной поверхности до 3-х раз.

Приведенные в данной работе результаты исследований важны для более глубокого понимания особенностей взаимодействия кавитационной области вблизи межфазной границей «газ-жидкость» и имеют практическое применение при интенсификации различных массообменных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физические основы ультразвуковой технологии / под общ. ред. Л.Д. Розенберга. Москва : Наука, 1969. 689 с.
2. Исида Х. [и др.]. Поведение кавитационного пузырька вблизи твердых границ // Четвертый международный симпозиум по кавитации. США : Калифорнийский технологический институт, 2001. 5 с.
3. Повышение эффективности ультразвуковой кавитационной обработки вязких и дисперсных сред / В.Н. Хмельёв [и др.]. Бийск, 2011. 102 с.
4. Рождественский В.В. Кавитация. Ленинград : Судостроение, 1977. 247 с.
5. Выявление режимов ультразвукового воздействия, обеспечивающих формирование кавитационной области в высоковязких и неньютоновских жидкостях / В.Н. Хмельёв [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. 2014. № 1(5). С. 22–27.
6. Хмельёв В.Н., Голых Р.Н., Шалунов А.В., Шалунова А.В., Генне Д.В. Выявление оптимальных режимов ультразвукового воздействия для распыления

вязких жидкостей путем математического моделирования // Материалы XIII Международной конференции и семинара по микро/нанотехнологиям и электроэрозионной обработке электронных приборов. Новосибирск : НГТУ. 2012. С. 114–123.

Информация об авторах

В. Н. Хмелёв – 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».

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».

С. Н. Цыганок – кандидат технических наук, доцент 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».

Д. С. Абраменко – кандидат технических наук, доцент 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».

А. Р. Барсуков – инженер 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 – инженер 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».

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 30 октября 2023; одобрена после рецензирования 29 февраля 2024; принята к публикации 06 мая 2024.

The article was received by the editorial board on 30 Oct 2023; approved after editing on 29 Feb 2024; accepted for publication on 06 May 2024.

REFERENCES

1. Rosenberg, L.D. (1969). Physical foundations of ultrasonic technology. Moscow : Science. (In Russ.).
2. Ishida, H. [et al.]. Behavior of a cavitation bubble near solid boundaries. *Fourth International Symposium on Cavitation*. USA: California Institute of Technology.
3. Khmelev, V.N. [et al.]. (2011). Increasing the efficiency of ultrasonic cavitation treatment of viscous and dispersed media. Biysk. (In Russ.).
4. Rozhdestvensky, V.V. (1977). Cavitation. Leningrad: Shipbuilding. (In Russ.).
5. Khmelev, V.N. [et al.]. (2014). Identification of ultrasonic exposure modes that ensure the formation of a cavitation region in highly viscous and non-Newtonian liquids. *South Siberian Scientific Bulletin*, 1(5), 22-27. (In Russ.).
6. Khmelev, V.N., Golykh, R.N., Shalunov, A.V., Shalunova, A.V. & Genne, D.V. Identification of optimal modes of ultrasonic influence for spraying viscous liquids by mathematical modeling. *Proceedings of the XIII International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electrical Discharge Machining of Electronic Devices*. Novosibirsk: NSTU. (In Russ.).

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 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.

S.N. Tsyganok - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.

D.S. Abramenko - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.

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

V.D. Minakov - Engineer of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.