

## РАСЧЁТ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДИФФУЗИИ ГАЗА В ЖИДКОСТИ

Р.Н. Голых<sup>1</sup>, А.Р. Барсуков<sup>1</sup>, С.Г. Ильясов<sup>2</sup>, Г.Т. Суханов<sup>2</sup>, Г.В. Пышноград<sup>3</sup>,  
Л.Ф. Комарова<sup>3</sup>, А.Н. Блазнов<sup>1</sup>, А.Г. Овчаренко<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, г. Бийск

<sup>3</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул

Статья посвящена расчётному анализу ультразвуковой интенсификации диффузии газа в жидкости применительно к процессам обработки сточных вод. Актуальность работы связана с тем, что эффективность газожидкостных процессов, используемых при очистке бытовых и промышленных стоков от патогенных микроорганизмов, бактерий и нежелательных примесей, во многом определяется скоростью растворения газа и интенсивностью массообмена, которые в обычных условиях ограничены диффузионными механизмами. Авторами рассмотрено влияние ультразвуковых колебаний высокой интенсивности на процессы переноса газа в жидкости и проанализированы физические факторы, возникающие в акустическом поле, включая кавитационные явления и динамику газовых пузырьков. На основе расчёта параметров взаимодействия ультразвукового поля с газожидкостной средой получены зависимости, связывающие характеристики ультразвукового воздействия с изменением условий диффузии газа в жидкости. Показано, что ультразвук приводит к изменению структуры приграничной области у межфазной поверхности и влияет на интенсивность массообмена. Полученные расчётные результаты могут найти практическое применение для количественной оценки степени интенсификации диффузионных процессов при введении газа (в том числе озона или озоносодержащих смесей) в жидкость и для обоснования выбора режимов ультразвукового воздействия, в частности, при разработке новых технологий очистки сточных вод.

*Ключевые слова:* ультразвук, интенсификация, системы «газ-жидкость», моделирование.

### ВВЕДЕНИЕ

Очистка сточных вод остаётся одной из ключевых задач современности. На данный момент во многих регионах мира, особенно с плотным населением, наблюдается дефицит пресной воды. Сточные воды промышленного и бытового характера оказывают серьёзное негативное воздействие на экосистемы пресных водоёмов. Даже в уникальном объекте — озере Байкал — согласно результатам экологического контроля, отмечается сокращение популяций редких видов рыб (сибирский осётр, стерлядь, тугун и др.), которые могут жить исключительно в чистой воде. Это свидетельствует о значительном поступлении некачественно обработанных сточных вод, в том числе содержащих патогенные микроорганизмы, что связано с постоянной работой предприятий и бытовых хозяйств.

Ещё одним примером, где необходимо обеззараживание жидкостей, служит выпуск некоторых лекарственных форм в жидкой форме, например, для внутривенных инъекций, где требуется максимальная стерильность. Несоблюдение этого требования делает такие препараты потенциально опасными для жизни.

Следовательно, создание физических подходов к эффективной дезинфекции жидкостей от патогенов является актуальным и не вызывает сомнений.

Наиболее перспективный путь решения данной проблемы — комплексное применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности совместно с введением озона в обрабатываемую среду. При достаточной мощности ультразвуковые импульсы способны угнетать и полностью разрушать микроорганизмы. Механизм обеззараживания основан преимущественно на кавитационных процессах — пузырьковом эффекте, возникающем при воздействии звуковых волн. Для достижения нужного результата применяются ультразвуковые колебания с интенсивностью от 2 до 10 Вт/см<sup>2</sup> и частотой 20–50 кГц.

Дополнительное озонирование обеспечивает качественную стерилизацию и дезинфекцию воды. Однако высокая концентрация озона токсична для человека, что ограничивает его массовое использование.

Сочетание ультразвуковых и озонирующих технологий обеспечивает повышение безопасности питьевой и сточной воды, усиливает результативность дезинфекции и снижает вероятность появления

токсичных побочных продуктов за счет уменьшения нормы расхода озона. Синергетический эффект достигается при одновременном действии этих факторов благодаря кавитации в жидкой среде, которая способствует разрушению пузырьков озона до мелких размеров, что расширяет площадь контакта озона с водой, а также усиливает интенсивность взаимодействия на границе «газ–жидкость» [1–6].

Таким образом, способность ультразвукового воздействия увеличивать воздействие озона позволяет создавать устройства ультразвуковой очистки сточных вод, реализующие рассмотренные эффекты с максимальной эффективностью для определенных условий реализации процесса. Для проектирования таких устройств необходимо теоретическое выявление оптимальных условий реализации процесса.

**ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

При воздействии ультразвуковыми колебаниями озвучиваемая среда представляет собой смесь жидкости с газовыми пузырьками, отделёнными от жидкости поверхностью раздела.

Для определения эквивалентного коэффициента диффузии озона в воде необходимо проанализировать уравнения микроскопической диффузии в системе «жидкость-газовые пузырьки».

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\vec{u}, \nabla)C = \text{div}(D_{\text{micro}}(\mathbf{r})\nabla C), \tag{1}$$

где  $D_{\text{micro}}(\mathbf{r})$  – микроскопический коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ , зависящий от типа фазы в наблюдаемой точке  $\mathbf{r}$  и равный  $D_l$ , если фаза – жидкость или  $D_g$ , если фаза – газ, находящийся внутри пузырька.

Поскольку коэффициент диффузии озона в жидкой фазе  $D_l$  более чем в 1000 раз превышает коэффициент диффузии озона в газовой фазе  $D_g$ , то можно принять допущение о постоянстве концентрации озона по всему внутреннему объёму отдельной кавитационной полости.

Плотность жидкости, как и длина свободного пробега молекул, слабо изменяется с повышением давления. Можно считать, что перепады давления, создаваемые в жидкости, на эквивалентный коэффициент диффузии не влияют.

Коэффициент диффузии в газовой фазе можно считать бесконечно большим по сравнению с его значением в жидкости. Поэтому, на эквивалентный коэффициент диффузии озона в кавитирующей среде влияют лишь размеры и количество кавитационных пузырьков.

С учётом изменения радиуса пузырька со временем и наличия определённой концентрации пузырьков путём усреднения уравнения (1) может быть использовано выражение для эквивалентного

коэффициента диффузии в кавитирующей жидкости (2):

$$D = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{D_{l0}}{1 - \delta_l(t)} dt, \tag{2}$$

где  $D_{l0}$  – истинный коэффициент диффузии в жидкой фазе;  $\delta_l$  – объемное содержание пузырьков (индекс кавитации).

На основе представленного выражения были получены следующие значения эквивалентного коэффициента диффузии на различных частотах при различной вязкости поглощающей жидкости (рис. 1–6).

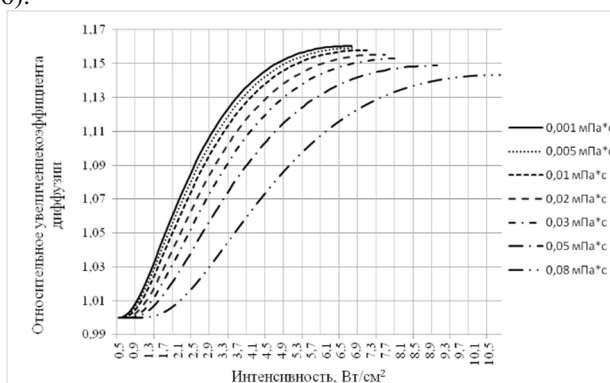


Рис. 1. Зависимости относительного увеличения коэффициента диффузии от интенсивности колебаний при различной вязкости (частота 22 кГц)

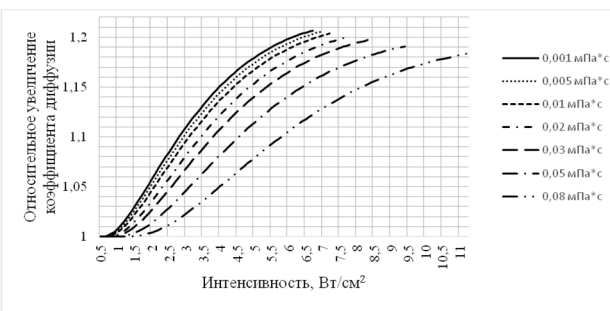


Рис. 2. Зависимости относительного увеличения коэффициента диффузии от интенсивности колебаний при различной вязкости (частота 25 кГц)



Рис. 3. Зависимости относительного увеличения коэффициента диффузии от интенсивности колебаний при различной вязкости (частота 30 кГц)

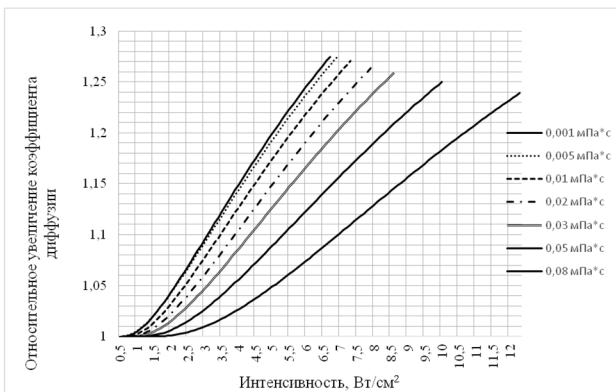


Рис. 4. Зависимости относительного увеличения коэффициента диффузии от интенсивности колебаний при различной вязкости (частота 33 кГц)

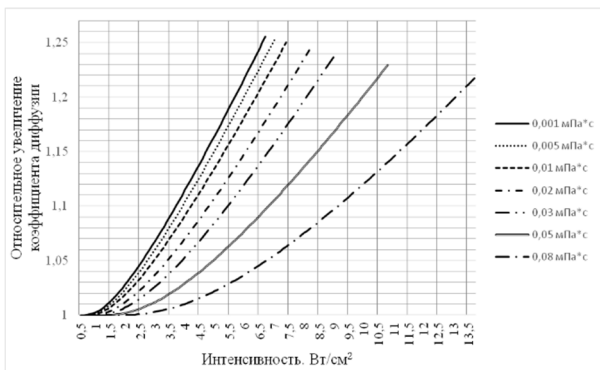


Рис. 5. Зависимости относительного увеличения коэффициента диффузии от интенсивности колебаний при различной вязкости (частота 44 кГц)

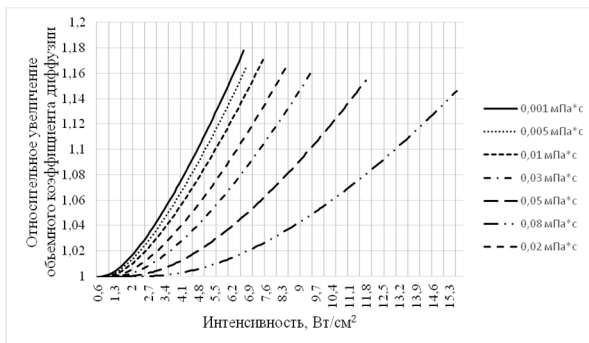


Рис. 6. Зависимости относительного увеличения коэффициента диффузии от интенсивности колебаний при различной вязкости (частота 60 кГц)

Как следует из графиков (рис. 1–6), при повышении интенсивности возрастает эквивалентный коэффициент диффузии за счёт увеличения индекса кавитации.

Обрыв графиков соответствует наступлению режима вырожденной кавитации, когда пузырьки перестают схлопываться и вырождаются в долгоживущие. Из-за монотонного возрастания индекса кавитации с повышением интенсивности обрыв соответствует максимально достигаемому

коэффициенту диффузии при данной частоте колебаний и свойствах жидкости.

Влияние ультразвуковых колебаний на константу фазового равновесия (предел растворимости газа) определяется, в первую очередь, перепадами давления в среде, так как данная константа существенно зависит от давления.

Поскольку среда является кавитирующей, то величина перепадов давления может быть определена согласно следующему выражению:

$$p_s(r, t) = \int_0^\infty 4\pi r_1^2 n_{bub} \sqrt{\frac{\rho c K I}{\langle p_{sh}^2 \rangle}} p_{sh}(r_1, t) dr_1, \quad (3)$$

где  $n_{bub}$  – концентрация кавитационных пузырьков,  $m^{-3}$ ;  $K$  – коэффициент трансформации первичных УЗ колебаний в энергию схлопывания кавитационных пузырьков,  $m^{-1}$ ;  $p_{sh}$  – относительная амплитуда давления ударной волны (отношение давления в точке наблюдения, к давлению в ядре кавитационного пузырька), определяемая удельной мощностью ударных волн  $P_{sh}$ , Па;  $r_1$  – расстояние между точкой наблюдения и ядром кавитационного пузырька, м.

Предварительная оценка усреднённой величины перепадов давлений (по времени и по объёму)  $\langle p_s(r, t) \rangle$  свидетельствует о ее превышении более чем в 4 раза атмосферного давления. Это даёт основание считать, что ультразвуковое воздействие позволит увеличить константу фазового равновесия с 0,3...0,5 до 0,8...0,9.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ зависимости максимально достигаемого коэффициента диффузии от частоты позволил установить, что существует оптимальная частота работы ультразвукового излучателя, при которой значение эквивалентного коэффициента диффузии максимально. Оптимальная частота не зависит от вязкости жидкости-абсорбента и интенсивности колебаний и составляет около 33 кГц.

При оптимальной частоте увеличение эквивалентного коэффициента диффузии может достигать 27 %.

Наличие оптимальной частоты связано с тем, что при частотах, ниже оптимальной образуется меньше кавитационных пузырьков, а при частотах выше оптимальной, меньше критический радиус пузырька, при котором он вырождается в долгоживущий.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Новоселов, А.Г. Молекулярная диффузия газов в жидкости. Коэффициенты молекулярной диффузии диоксида углерода в воде [Текст] / А.Г. Новоселов, А.Б. Дужий, Е.Ю. Голикова // Науч. журн. НИУ ИТМО. Сер. Процессы и аппараты пищевых производств. – 2014. – № 2.
- Подрыга, В.О. Молекулярно-динамический расчет коэффициента диффузии газов на примере аргона, азота, водорода, кислорода, метана и углекислого газа [Текст] / В.О. Подрыга, Е.В.

Вихров, С.В. Поляков. – М., 2019. – (Препр. / Ин-т прикл. математики им. М.В. Келдыша РАН; № 96).

3. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] / А.Г. Касаткин. – М.: Госхимиздат, 1961.

4. Шадрин, Е.Ю. Исследование процесса распыления и сжигания водоугольного топлива с использованием пневматической форсунки [Текст] / Е.Ю. Шадрин, И.С. Ануфриев, О.В. Шарыпов // ПМТФ. – 2021. – Т. 62. – № 3. – С. 165–171.

5. Рамм, В.М. Абсорбция газов [Текст] / В.М. Рамм. – 2-е изд., перераб. – М.: Химия, 1976.

6. Семенов, И.А. Влияние ультразвука на массоотдачу в жидкой фазе при свободном всплытии пузырька газа [Текст] / И.А. Семенов, Б.А. Ульянов, Д.П. Свиридов, А.С. Камаев // Изв. вузов. Прикл. химия и биотехнология. – 2013. – № 2. – С. 57–61.

*Гольх Роман Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru.*

*Барсуков Александр Романович – старший преподаватель кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: barsukov.ar@bti.secna.ru.*

*Ильясов Сергей Гаврилович – доктор химических наук, главный научный сотрудник ИПХЭТ СО РАН, e-mail: [ipcet@mail.ru](mailto:ipcet@mail.ru)*

*Суханов Геннадий Тимофеевич – доктор химических наук, главный научный сотрудник ИПХЭТ СО РАН, e-mail: [ipcet@mail.ru](mailto:ipcet@mail.ru)*

*Пышиноград Григорий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор АлтГТУ*

*Комарова Лариса Фёдоровна – доктор технических наук, профессор АлтГТУ*

*Блазнов Алексей Николаевич – доктор технических наук, профессор Бийского технологического института (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, e-mail: [blaznov74@mail.ru](mailto:blaznov74@mail.ru)*

*Овчаренко Александр Григорьевич – доктор технических наук, профессор Бийского технологического института (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ*

# CALCULATION OF ULTRASONIC ENHANCEMENT OF GAS DIFFUSION IN LIQUID

R.N. Golykh<sup>1</sup>, A.R. Barsukov<sup>1</sup>, S.G. Ilyasov<sup>2</sup>, G.T. Sukhanov<sup>2</sup>, G.V. Pyshnograd<sup>3</sup>,  
L.F. Komarova<sup>3</sup>, A.N. Blaznov<sup>1</sup>, A.G. Ovcharenko<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*IPCET SB RAS, Biysk*

<sup>3</sup>*Polzunov Altay State Technical University, Biysk*

This article is devoted to a computational analysis of ultrasonic enhancement of gas-liquid diffusion as applied to wastewater treatment processes. The relevance of the study lies in the fact that the efficiency of gas-liquid processes used to purify domestic and industrial wastewater from pathogenic microorganisms, bacteria, and unwanted impurities is largely determined by the rate of gas dissolution and the intensity of mass transfer, which are normally limited by diffusion mechanisms. The authors examine the influence of high-intensity ultrasonic vibrations on gas transfer processes in liquids and analyze the physical factors arising in the acoustic field, including cavitation phenomena and gas bubble dynamics. Based on the calculated parameters of the interaction between the ultrasonic field and the gas-liquid medium, dependencies were obtained linking the characteristics of ultrasonic action with changes in the conditions of gas diffusion in the liquid. It is shown that ultrasound leads to changes in the structure of the boundary region at the interphase surface and affects the intensity of mass transfer. The obtained calculation results can find practical application for quantitative assessment of the degree of intensification of diffusion processes when introducing gas (including ozone or ozone-containing mixtures) into a liquid and for substantiating the choice of ultrasonic exposure modes, in particular, in the development of new wastewater treatment technologies.

Index terms: ultrasonic, intensification, gas-liquid systems, modeling.

## REFERENCES

1. Novoselov, A. G., A. B. Duzhiy, and E. Yu. Golikova, "Molecular diffusion of gases in liquids. Molecular diffusion coefficients of carbon dioxide in water," *Scientific Journal NRU ITMO. Series "Processes and Equipment of Food Production,"* no. 2, 2014.
2. Podryga, V. O., E. V. Vikhrov, and S. V. Polyakov, "Molecular dynamics calculation of gas diffusion coefficients for argon, nitrogen, hydrogen, oxygen, methane, and carbon dioxide," *Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS Preprint*, no. 96, Moscow, 2019.
3. Kasatkin, A. G., *Basic Processes and Apparatus of Chemical Technology*. Moscow, USSR: Goskhimizdat, 1961.
4. Shadrin, E. Yu., I. S. Anufriev, and O. V. Sharypov, "Investigation of atomization and combustion of coal-water fuel using a pneumatic nozzle," *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 62, no. 3, pp. 165–171, 2021.
5. Ramm, V. M., *Gas Absorption*, 2nd ed. Moscow, USSR: Khimiya, 1976.
6. Semenov, I. A., B. A. Ulyanov, D. P. Sviridov, and A. S. Kamaev, "Effect of ultrasound on mass transfer in the liquid phase during free rise of a gas bubble," *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya*, no. 2, pp. 57–61, 2013.

Golykh Roman Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, professor at the chair of methods and means of measuring and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, (3854)432570, e-mail: [grn@bti.secna.ru](mailto:grn@bti.secna.ru).

Barsukov Aleksandr Romanovich – senior lecturer at the chair of methods and means of measuring and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, (3854)432570, e-mail: [barsukov.ar@bti.secna.ru](mailto:barsukov.ar@bti.secna.ru).

Ilyasov Sergey Gavrilovich – Doctor of Chemical Sciences, Chief Researcher at IPHET SB RAS, e-mail: [ipcet@mail.ru](mailto:ipcet@mail.ru)

Sukhanov Gennady Timofeevich – Doctor of Chemical Sciences, Chief Researcher at IPHET SB RAS, e-mail: [ipcet@mail.ru](mailto:ipcet@mail.ru)

Pyshnograd Grigory Vladimirovich – Doctor of Physico-mathematical Sciences, Professor of AltSTU

Komarova Larisa Fedorovna – Doctor of Technical Sciences, Professor at AltSTU

Blaznov Alexey Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Biysk Institute of Technology (branch) of the AltSTU Federal State Budgetary Educational Institution, e-mail: [blaznov74@mail.ru](mailto:blaznov74@mail.ru)

Ovcharenko Alexander Grigoryevich – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Biysk Institute of Technology (branch) of the AltSTU Federal State Budgetary Educational Institution