

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ
ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
НА АБСОРБЦИЮ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА
НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ФАЗ ЖИДКОСТЬ–ГАЗ**

В.С. Болдырев^{1,2,3}

boldyrev.v.s@bmstu.ru

Н.А. Богатов^{1,2}

bogatov.n.a@bmstu.ru

А.С. Савина^{1,2}

savina.a.s@bmstu.ru

А.П. Зоткин^{1,2}

zotkin.a.p@bmstu.ru

Е.И. Пентюхин^{1,2}

pentyukhin.e.i@bmstu.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Российская Федерация

³ НПО «ЛКП», г. Хотьково, Московская обл., Российская Федерация

Аннотация

Работа является продолжением исследования влияния низкочастотных акустических аксиальных малоэнергетических колебаний инфразвукового и начала звукового диапазонов частот на скорость обработки поверхностей различных конструкционных материалов, прежде всего, материалов, применяющихся в радиоэлектронике. Низкочастотная вибрационная обработка поверхностей различных сплавов и полупроводников — одна из самых перспективных современных задач, стоящих перед отечественной радиоэлектронной промышленностью. Применение низкочастотных акустических полей позволяет увеличить скорость процессов обработки поверхности металлов в 2–5 раз. В настоящее время широко применяют так называемый пузырьковый метод травления: пропускание пузырьков воздуха сквозь травильный раствор во время обработки поверхности. Это позволяет интенсифицировать процесс травления поверхности и существенно увеличить скорость (до 3 раз). Травление с применением внешнего акустического поля демонстрирует аналогичные результаты. Проведены исследования сравнения процесса растворения газа в поле низкочастотных воздействий на границе раздела фаз жидкость–газ с процессом барботирования газа, пропускаемого сквозь дистиллированную воду. Представлены результаты экспериментального ис-

Ключевые слова

Низкочастотные акустические воздействия, обработка цветных металлов, кинетика, звукохимические процессы, оптимальные частоты, травление, кавитация, абсорбция, диспергатор

следования, которые объясняют причину ускорения процессов травления в низкочастотном акустическом поле за счет явления абсорбции газов, находящегося на границе разделов фаз. Приведено сравнения акустического воздействия с барботированием и диффузией, протекающей через границу жидкость–газ

Поступила 13.07.2022

Принята 26.09.2022

© Автор(ы), 2023

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-33-90152) и по программе Госзадания (№ FSN-2023-0004)

Введение. Исследования, проводимые отделом «Инжиниринг химико-технологических систем» инжинирингового центра «Автоматика и робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с РХТУ им. Д.И. Менделеева, направлены на применение малоэнергетических акустических аксиальных воздействий инфразвукового и начала звукового диапазонов на поверхность различных конструкционных материалов, которые применяют в радиоэлектронике [1, 2]. Наиболее перспективными и соответствующими современным вызовам для отечественной радиоэлектронной промышленности представляются процессы обработки поверхностей таких конструкционных материалов, как сплавы и полупроводники. Полученные ранее результаты позволяют утверждать, что применение низкочастотных акустических полей может увеличить скорость процессов обработки поверхности металлов в 2–5 раз [3–6].

Однако для внедрения в технологическую практику описанного типа внешнего физического воздействия необходимо понимать, какие существующие аналоги уже применяют в промышленности и какими преимуществами может обладать перспективная технология. В нескольких работах показано, что низкочастотные малоэнергетические акустические аксиальные колебания инфразвукового и начала звукового диапазонов приводят к насыщению жидкой реакционной среды газом, находящимся на границе раздела фаз жидкость–газ. В связи с этим решено провести исследование по сравнению существующего метода обработки поверхности, в котором используются растворенные в реакционной среде газы. Наиболее широко применяется так называемый пузырьковый метод травления [7–23]. Несмотря на различные технические реализации этого метода, суть его заключается в пропускании небольших пузырьков воздуха сквозь травильный раствор во время обработки поверхности. Такое воздействие интенсифицирует процесс травления и позволяет значительно повысить его скорость (в 2–3 раза). Это аналогично результатам, полученным при травлении с применением внешнего акустического поля. В связи с этим и на основании

проведенных ранее исследований, результаты которых представлены в настоящей работе, решено выполнить исследование по сравнению процесса растворения газа, находящегося на границе раздела фаз жидкость–газ в поле низкочастотных воздействий, с процессом барботирования того же самого газа сквозь жидкость — дистиллированную воду.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Для проведения экспериментов использована электромеханическая установка, подробно описанная в [24] и применявшаяся в предшествующих исследованиях. В качестве газа, пропускаемого через дистиллированную воду при барботировании или находящегося на границе фаз в случае низкочастотного воздействия, т. е. в качестве модельной системы выбран углекислый газ. Изменение водородного показателя измерено с помощью рН-метра рН-420 (АО «Аквилон»).

Методика проведения эксперимента заключалась в изучении зависимости рН водного раствора угольной кислоты от метода введения CO_2 в жидкую водную среду. В мерный цилиндр с 50 мл дистиллированной воды в течение 2 мин подавался CO_2 над поверхностью на границе жидкость–газ. Рассмотрены три случая.

Первый случай. Углекислый газ в течение еще 1 мин подавался над границей раздела фаз, тем самым создавая газовый слой над жидкостью, массообменный процесс обусловлен только его абсорбцией через поверхность границы жидкость–газ. После чего проводилось измерение рН.

Второй случай. В реакционную среду подавался CO_2 в течение 1 мин с помощью диспергатора (расход газа 5 л/мин, выходное отверстие $d = 1,5$ мм), размещенного на дне сосуда, тем самым обеспечивалось прохождение газа через весь реакционный объем, далее проводилось измерение рН.

Третий случай. Углекислый газ аналогично первому случаю подавался еще 1 мин одновременно с низкочастотным акустическим воздействием с частотой 15 Гц и амплитудой 2,2 см. Затем проводилось измерение рН. Вибропоршень располагался так, чтобы под его нижней кромкой находилось 45 мл воды.

Результаты. Полученные результаты измерения значения рН растворов до и после низкочастотного воздействия приведены ниже (до воздействия рН = 6,03):

	После воздействия
Слой CO_2 над границей раздела фаз	4,89 ± 0,14
Барботирование CO_2	3,95 ± 0,01
Низкочастотное воздействие	3,99 ± 0,02

Согласно полученным результатам, в случае создания слоя CO_2 над поверхностью границы жидкость–газ массообменный процесс происходит значительно хуже по сравнению с другими видами интенсификации процесса растворения газа, представленных в этой серии экспериментов. В свою очередь в процессе барботирования изменение рН наибольшее по сравнению с низкочастотным акустическим воздействием. При этом следует отметить, что значения рН в обоих случаях близки к справочным данным по пределу насыщения угольной кислоты в воде [25].

На основании серии экспериментов решено провести сравнение насыщения дистиллированной воды углекислым газом с учетом разного значения зазора между стенкой реакционной среды и головкой вибропоршня с изменением рН. Проведена серия экспериментов для случаев создания слоя CO_2 над границей раздела фаз, барботирования и низкочастотного акустического воздействия для значений ширины зазора 0,25, 1,5 и 3,5 мм.

Методика эксперимента заключалась в следующем. Аналогично в мерном цилиндре с 50 мл дистиллированной воды создавался слой CO_2 над поверхностью границы жидкость–газ. Для эксперимента, связанного с созданием слоя CO_2 над границей раздела фаз, газ подавался в течение еще 1 мин. В эксперименте, связанном с барботированием, в реакционную среду CO_2 подавался в течение 1 мин с помощью диспергатора, размещенного на дне сосуда. В экспериментах с применением низкочастотного акустического воздействия CO_2 также подавался дополнительно в процессе воздействия продолжительностью 1 мин. При использовании малоэнергетического акустического поля вибропоршни находились на различных глубинах погружения, оптимальных для каждого типа пары толщина зазора–глубина погружения, полученных по результатам предыдущей серии экспериментов. Полученные значения рН исследуемых растворов приведены ниже (до воздействия рН = 6,03):

	После воздействия
Слой CO_2 над границей раздела фаз	4,84 ± 0,42
Барботирование CO_2	3,93 ± 0,01
Низкочастотное воздействие при ширине зазора между стенкой реакционной среды и головкой вибропоршня, мм:	
0,25	4,03 ± 0,09
1,5	3,92 ± 0,04
3,5	4,04 ± 0,04

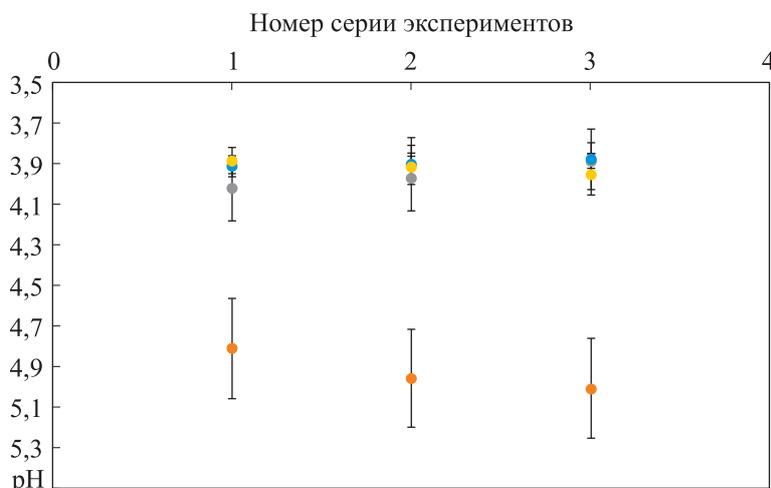
Согласно полученным данным, можно сделать следующие выводы. Хуже всего массообменный процесс происходит при формировании слоя CO_2 над поверхностью дистиллированной воды. В этом случае массообменный процесс обеспечен исключительно диффузией газа через границу раздела фаз. Однако следует отметить, что эффективность инфразвукового воздействия сравнима с эффективностью барботирования, которое проводилось в стандартном цилиндре с шириной зазора между стенкой и головкой вибропоршня 1,5 мм. При этом массообменный процесс протекает хуже в случаях, когда ширина зазора между стенкой реакционной среды и поверхностью вибропоршня составляет 3,5 или 0,25 мм, что можно объяснить недостаточно развитым возмущением границы раздела фаз. При ширине зазора 0,25 мм наблюдалось значительное выплескивание дистиллированной воды из цилиндра, что приводило к гидродинамической картине искажения эксперимента. Ориентируясь на данные из [26–29], можно утверждать следующее: для проведения работ, связанных с исследованием влияния большого деформационного пузыря, который образуется только при небольшом значении ширины зазора, требуется изменение рабочего объема для реакционной зоны в конструкции экспериментальной установки.

Учитывая, что низкочастотное воздействие приводит не только к насыщению реакционной среды газами, находящимися на границе раздела фаз, но к перемешиванию внутри реакционной среды, было решено поставить эксперимент и сравнить данные не только с процессом барботирования, но еще и с одновременным перемешиванием реакционной среды магнитной мешалкой (скорость 900 мин^{-1}). Исследована зависимость рН водного раствора угольной кислоты от метода введения CO_2 в жидкую водную среду. В стандартный мерный цилиндр (с шириной зазора между стенкой и головкой вибропоршня в 1,5 мм) с 50 мл дистиллированной воды в течение 2 мин подавался CO_2 . Эксперименты проводились следующим образом. Для первого эксперимента газ подавался со дна сосуда (аналогично ранее проведенным по барботированию) в течение 1 мин. Для второго эксперимента газ подавался в течение 2 мин так, чтобы создать слой CO_2 в пространстве под границей раздела фаз. Для третьего эксперимента газ в течение 1 мин подавался в пространство над вибропоршнем и жидкостью и в течение следующей 1 мин система дополнительно перемешивалась инфразвуковым воздействием. Для четвертого эксперимента газ подавался аналогично первому в течение 1 мин, параллельно с подачей газа жидкость перемешивалась якорем магнитной

мешалки со скоростью 900 мин^{-1} . При применении инфразвукового воздействия поршень находился на оптимальной глубине погружения 45 мл по нижней кромке вибропоршня. Полученные значения рН растворов приведены ниже (до воздействия рН = 6,03):

	После воздействия
Барботирование	$3,90 \pm 0,01$
Слой CO_2 над границей раздела фаз	$4,92 \pm 0,24$
Низкочастотное воздействие	$3,96 \pm 0,17$
Барботирование с перемешиванием	$3,92 \pm 0,07$

Согласно полученным результатам, хуже всего массообменный процесс происходит, как и в предыдущих исследованиях, при формировании слоя CO_2 над поверхностью границы раздела фаз. Результат для низкочастотного акустического малоэнергетического воздействия аналогичен результату для процесса барботирования в стандартном мерном цилиндре. Отличий для процесса барботирования с одновременным перемешиванием магнитной мешалкой от процесса барботирования без перемешивания в рамках эксперимента не обнаружено (рисунок).



Конечные значения рН воды при барботировании (●), низкочастотном воздействии (●), формировании слоя CO_2 на границе раздела фаз (●) и барботировании с перемешиванием (●)

Обсуждение полученных результатов. Как уже было отмечено [1–3], применение низкочастотных колебаний инфразвукового и начала звукового диапазонов создает благоприятные возможности для изучения некоторых физико-химических взаимодействий: диффузии, дегазации, образования и разрушения поверхностных соединений при топохимиче-

ских реакциях. На основании проведенного исследования можно сделать вывод, что низкочастотные малоэнергетические акустические аксиальные колебания приводят к насыщению реакционной среды газами, находящимися на границе раздела фаз, и по результату воздействия аналогичны процессу барботирования, который в настоящее время достаточно широко используется в химической промышленности. Следует отметить, что полученный результат является нетривиальным и неочевидным, так как энергетические эквиваленты колебаний начала звукового и инфразвукового диапазонов довольно малы. В первую очередь этот результат объясняется изменением условий химико-физических взаимодействий и позволяет объяснить особенности механизма протекающих реакций в низкочастотных акустических полях. Проведенные исследования важны как для понимания процессов травления и обработки поверхностей, так и для решения вопросов оптимизации технологического применения процессов барботирования. Этот вывод может быть использован при создании принципиально новых установок и устройств для травления печатных плат и обработки различных поверхностей, обладающих скоростью обработки в 2–5 раз выше существующих в настоящее время промышленных образцов; при разработке и внедрении в производственную практику химической промышленности [30–32] принципиально новых систем барботирования; как метод изучения различных окислительно-восстановительных процессов.

Обнаруженный эффект абсорбции газов, находящихся на границе раздела фаз, жидкой средой при низкочастотном акустическом малоэнергетическом воздействии инфразвукового и начала звукового диапазонов частот имеет не только практическое, но и важное теоретическое значение. Это позволит объяснить формирование большего деформационного пузыря и многих других синонимических процессов, протекающих в акустических полях, с позиции изменения концентрации растворенных газов.

Заключение. Прикладное значение работы заключается в том, что на основании результатов проделанных экспериментов предложено объяснение процесса интенсификации низкочастотным малоэнергетическим акустическим воздействием процессов травления металлов (в том числе цветных) и печатных плат.

Теоретическое значение результатов настоящей работы заключается в понимании механизмов, протекающих на границе разделов фаз жидкость–газ в низкочастотных акустических полях, а также их влияния на физические, химические и физико-химические параметры жидкости.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Фадеев Г.Н., Болдырев В.С., Богатов Н.А. и др. Особенности окислительно-восстановительного процесса в поле низкочастотного воздействия. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки*, 2020, № 1 (88), с. 80–92. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2020-1-80-92>
- [2] Фадеев Г.Н., Болдырев В.С., Аверина Ю.М. и др. Обработка поверхности металлов в поле низкочастотных воздействий. *Цветные металлы*, 2019, № 10, с. 73–77. DOI: <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.10.12>
- [3] Boldyrev V., Men'shikov V., Savina A., et al. Development and application of removable varnish for wall protection paint coating booths. *Proc. METAL*, 2021, pp. 675–678. DOI: <https://doi.org/10.37904/metal.2021.4164>
- [4] Essola D., Jean Ch.A., Ngayihi Abbe C.V., et al. Enhancement of metallic machine parts mechanical properties by the use of vibratory processing for oxide coated films formation and MoS₂ solid lubricant coating deposit. *Int. J. Mech. Mater. Eng.*, 2019, vol. 14, art. 8. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40712-019-0103-8>
- [5] Essola D., Njomoue A.P., Offole F., et al. Low frequency vibratory cleaning of paint and rust contaminants from machines parts. *Proc. Inst. Mech. Eng. B: J. Eng. Manuf.*, 2021, vol. 236, no. 4, pp. 387–400. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544054211031451>
- [6] Essola D., Offole F., Nikongho A.J., et al. A study on the experimental investigation of low frequency vibration wave assisted disassembly of press-fit joints. *J. Manuf. Process.*, 2020, vol. 49, pp. 70–81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.11.014>
- [7] Aparicio Alcalde M., Quevedo H., Svaiter N.F. Single-bubble sonoluminescence as dicke superradiance at finite temperature. *Physica A*, 2014, vol. 416, pp. 142–148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.08.044>
- [8] Wang M., Zhou Y. Numerical investigation of the inertial cavitation threshold by dual-frequency excitation in the fluid and tissue. *Ultrason. Sonochem.*, 2018, vol. 42, pp. 327–338. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.11.045>
- [9] Thiemann A., Holsteys F., Cairos C., et al. Sonoluminescence and dynamics of cavitation bubble populations in sulfuric acid. *Ultrason. Sonochem.*, 2017, vol. 34, pp. 663–676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.013>
- [10] Клинов И.Я. Коррозия химической аппаратуры и коррозионно-стойкие материалы. М., Машиностроение, 1960.
- [11] Кудачов У.Д., Силаев И.В., Наконечников А.В. и др. Влияние растворенных в технологических жидкостях газов на качество обработки поверхностей полупроводников. *Современные наукоемкие технологии*, 2010, № 2, с. 30–31.
- [12] Артамонов В.П., Артамонов В.В., Быков П.О. и др. Исследование процесса травления меди в гидразине. *Известия вузов. Цветная металлургия*, 2015, № 1, с. 18–21. DOI: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2015-1-18-21>
- [13] ИТС 36-2017. Обработка поверхностей металлов и пластмасс с использованием электролитических или химических процессов. М., Бюро НДТ, 2017.

- [14] Терешкин В., Григорьева Л., Колесниченко Д. Комплексная электрохимическая система «Травление-регенерация» для плат 5-го и выше классов точности. *Технологии в электронной промышленности*, 2015, № 4, с. 6–9.
- [15] Князев В.А. Совершенствование технологии предварительной очистки высококонцентрированных сточных вод гальванопроизводств. Дис. ... канд. техн. наук. Пенза, ПГУАС, 2017.
- [16] Кудakov У.Д., Силаев И.В., Наконечников А.В. и др. Удаление растворенных газов из рабочих растворов, применяемых в производстве полупроводниковых приборов. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 2019, № 5, с. 107.
- [17] Аверина Ю.М., Аснис Н.А., Ваграмян Т.А. и др. Исследование скорости окисления ионов Fe^{2+} в воде при барботировании воздуха. *Теоретические основы химической технологии*, 2018, т. 52, вып. 1, с. 79–82.
DOI: <https://doi.org/10.7868/S0040357118010104>
- [18] Кодзука Х., Иноуэ М., Имура К. и др. Микропузырьковая система очистки для крупного изделия, такого как транспортное средство. Патент РФ 2507014. Заявл. 24.02.2011, опубл. 20.02.2014.
- [19] Сачек Н.Дж. Способ удаления загрязняющих веществ из выходящих газов. Патент РФ 2648894. Заявл. 13.01.2014, опубл. 28.03.2018.
- [20] Кривошеин Д.А., Пискунов В.А., Зубарев Ю.В. и др. Способ травления меди и ее сплавов. Патент РФ 2013466. Заявл. 18.11.1991, опубл. 30.05.1994.
- [21] Брусницына Л.А., Степановских Е.И. Технология изготовления печатных плат. Екатеринбург, Изд-во Урал. ун-та, 2015.
- [22] Беккерт М., Клемм Х. Справочник по металлографическому травлению. М., Металлургия, 1979.
- [23] Меньшиков В.В., Болдырев В.С., Богатов Н.А. и др. Устройство для интенсификации химических процессов в жидкой среде. Патент РФ 206891. Заявл. 20.04.2021, опубл. 30.09.2021.
- [24] Богатов Н.А., Болдырев В.С., Савина А.С. и др. Устройство для акустической интенсификации физико-химических процессов в жидких растворах. Патент РФ 213619. Заявл. 27.04.2022, опубл. 19.09.2022.
- [25] Таубе П.Р., Баранова А.Г. Химия и микробиология воды. М., Высш. шк., 1983.
- [26] Margulis I.M., Margulis M.A. Interaction dynamics of bubbles in a cavitation cloud. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2004, vol. 78, no. 7, pp. 1159–1170.
- [27] Маргулис М.А. Основы звукохимии. М., Высш. шк., 1984.
- [28] Маргулис М.А., Грундель Л.М. Химическое действие низкочастотных акустических колебаний. *ДАН СССР*, 1982, т. 256, № 2, с. 914–917.
- [29] Болдырев В.С. Действие низкочастотных колебаний на биохимически активные структуры. Дис. ... канд. техн. наук. М., РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2013.
- [30] Богомоллов Б.Б., Болдырев В.С., Зубарев А.М. и др. Интеллектуальный логико-информационный алгоритм выбора энергоресурсоэффективной химической тех-

нологии. *Теоретические основы химической технологии*, 2019, т. 53, № 5, с. 483–492. DOI: <http://doi.org/10.1134/S0040357119050026>

[31] Болдырев В.С., Аверина Ю.М., Меньшиков В.В. и др. Технологически-организационный инжиниринг окрасочных производств. *Теоретические основы химической технологии*, 2020, т. 54, № 3, с. 299–303.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S004035712003001X>

[32] Болдырев В.С., Кузнецов С.В., Меньшиков В.В. Инновационное развитие малотоннажных научно-производственных предприятий лакокрасочной отрасли. М., Пэйнт-Медиа, 2021.

Болдырев Вениамин Станиславович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Химия» МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий отделом «Инжиниринг химико-технологических систем» инжинирингового центра «Автоматика и робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); студент магистратуры факультета цифровых технологий и химического инжиниринга РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9); советник директора НИИ НПО «ЛКП» (Российская Федерация, 141370, Московская обл., Хотьково, Художественный проезд, д. 2е).

Богатов Никита Алексеевич — научный сотрудник отдела «Инжиниринг химико-технологических систем» инжинирингового центра «Автоматика и робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); ассистент кафедры физики РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Савина Анастасия Сергеевна — научный сотрудник отдела «Инжиниринг химико-технологических систем» инжинирингового центра «Автоматика и робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); ассистент кафедры физики РХТУ им. Д.И. Менделеева, аспирантка кафедры инновационных материалов и защиты от коррозии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Зоткин Александр Павлович — инженер отдела «Инжиниринг химико-технологических систем» инжинирингового центра «Автоматика и робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, студент магистратуры кафедры «Безопасность в цифровом мире» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); лаборант кафедры физики РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Пентюхин Егор Игоревич — техник отдела «Инжиниринг химико-технологических систем» инжинирингового центра «Автоматика и робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); лаборант кафедры физики РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Болдырев В.С., Богатов Н.А., Савина А.С. и др. Исследование влияния низкочастотных виброакустических полей на абсорбцию углекислого газа на границе раздела фаз жидкость–газ. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2023, № 6 (111), с. 55–69. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-6-55-69>

INVESTIGATION OF THE LOW-FREQUENCY VIBROACOUSTIC FIELDS INFLUENCE ON THE CARBON DIOXIDE ABSORPTION AT THE LIQUID-GAS PHASE BOUNDARY

V.S. Boldyrev^{1, 2, 3}

boldyrev.v.s@bmstu.ru

N.A. Bogatov^{1, 2}

bogatov.n.a@bmstu.ru

A.S. Savina^{1, 2}

savina.a.s@bmstu.ru

A.P. Zotkin^{1, 2}

zotkin.a.p@bmstu.ru

E.I. Pentukhin^{1, 2}

pentyukhin.e.i@bmstu.ru

¹ **Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

² **Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation**

³ **NPO “Lakokraspokrytie”, Khotkovo, Moscow Region, Russian Federation**

Abstract

The work is a continuation of studying the influence of low-frequency acoustic axial low-energy vibrations of the infrasonic and early sound frequency ranges on the surface treatment rate of various structural materials, primarily those used in the radio electronics. Low-frequency vibration surface treatment of various alloys and semiconductors is one of the most promising modern tasks facing the domestic radio-electronic industry. Introduction of the low-frequency acoustic fields makes it possible to increase the rate in the metal surface treatment processes by 2–5 times. Currently, the so-called bubble etching method is widely used; it implies passing air bubbles through the etching solution during surface treatment. This allows intensifying the surface etching process and significantly increasing the rate (up to 3 times). Etching that uses the external acoustic field shows the similar results. Studies were performed to compare the process of gas dissolution in the field of low-frequency influences at the liquid-gas phase boundary and the process of bubbling the gas passing through distilled water. Experimental study results are presented explaining the reason for the etching process-

Keywords

Low-frequency acoustic effects, non-ferrous metals treatment, kinetics, sonochemical processes, optimal frequencies, etching, cavitation, absorption, dispersant

es acceleration in the low-frequency acoustic field due to the phenomenon of gas absorption at the phase boundary. A comparison of acoustic effects with bubbling and diffusion through the liquid-gas interface is provided

Received 13.07.2022

Accepted 26.09.2022

© Author(s), 2023

The work was funded by RFBR (project no. 20-33-90152) and the work was carried out according to the program of the State Assignment (no. FSN-2023-0004)

REFERENCES

- [1] Fadeev G.N., Boldyrev V.S., Bogatov N.A., et al. Specifics of reduction-oxidation processes exposed to a low-frequency acoustic field. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2020, no. 1 (88), pp. 80–92 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2020-1-80-92>
- [2] Fadeev G.N., Boldyrev V.S., Averina Yu.M., et al. Metal surface treatment in a low-frequency exposure field. *Tsvetnye metally*, 2019, no. 10, pp. 73–77 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.10.12>
- [3] Boldyrev V., Men'shikov V., Savina A., et al. Development and application of removable varnish for wall protection paint coating booths. *Proc. METAL*, 2021, pp. 675–678. DOI: <https://doi.org/10.37904/metal.2021.4164>
- [4] Essola D., Jean Ch.A., Ngayihi Abbe C.V., et al. Enhancement of metallic machine parts mechanical properties by the use of vibratory processing for oxide coated films formation and MoS₂ solid lubricant coating deposit. *Int. J. Mech. Mater. Eng.*, 2019, vol. 14, art. 8. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40712-019-0103-8>
- [5] Essola D., Njomoue A.P., Offole F., et al. Low frequency vibratory cleaning of paint and rust contaminants from machines parts. *Proc. Inst. Mech. Eng. B: J. Eng. Manuf.*, 2021, vol. 236, no. 4, pp. 387–400. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544054211031451>
- [6] Essola D., Offole F., Nikongho A.J., et al. A study on the experimental investigation of low frequency vibration wave assisted disassembly of press-fit joints. *J. Manuf. Process.*, 2020, vol. 49, pp. 70–81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.11.014>
- [7] Aparicio Alcalde M., Quevedo H., Svaiteer N.F. Single-bubble sonoluminescence as dicke superradiance at finite temperature. *Physica A*, 2014, vol. 416, pp. 142–148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.08.044>
- [8] Wang M., Zhou Y. Numerical investigation of the inertial cavitation threshold by dual-frequency excitation in the fluid and tissue. *Ultrason. Sonochem.*, 2018, vol. 42, pp. 327–338. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.11.045>
- [9] Thiemann A., Holsteys F., Cairos C., et al. Sonoluminescence and dynamics of cavitation bubble populations in sulfuric acid. *Ultrason. Sonochem.*, 2017, vol. 34, pp. 663–676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.013>
- [10] Klinov I.Ya. Korroziya khimicheskoy apparatury i korrozionno-stoykie materialy [Corrosion of chemical equipment and corrosion-resistant materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1960.

- [11] Kudakov U.D., Silaev I.V., Nakonechnikov A.V., et al. Influence of gases dissolved in technological liquids on the quality of semiconductor surface treatment. *Sovremennyye naukoemkie tekhnologii* [Modern High Technologies], 2010, no. 2, pp. 30–31 (in Russ.).
- [12] Artamonov V.P., Artamonov V.V., Bykov P.O., et al. Investigation into etching of copper in hydrazine. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy], 2015, no. 1, pp. 18–21 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2015-1-18-21>
- [13] ITS 36-2017. Obrabotka poverkhnostey metallov i plastmass s ispolzovaniem elektroliticheskikh ili khimicheskikh protsessov [Surface treatment of metals and plastics using electrolytic or chemical processes]. Moscow, Byuro NDT Publ., 2017.
- [14] Tereshkin V., Grigoryeva L., Kolesnichenko D. Complex electrochemical system “Etching-regeneration” for boards of the 5th and higher accuracy classes. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti*, 2015, no. 4, pp. 6–9 (in Russ.).
- [15] Knyazev V.A. Sovershenstvovanie tekhnologii predvaritelnoy oчитki vysokokontsentririrovannykh stochnykh vod galvanoproizvodstv. Dis. kand. tekhn. nauk [Improving technology of pre-treatment of highly concentrated wastewater from galvanizing plants. Cand. Sc. (Eng.) Diss.]. Penza, PGUAS Publ., 2017.
- [16] Kudakov U.D., Silaev I.V., Nakonechnikov A.V. et al. Removal of dissolved gases from working solutions used in the production of semiconductor devices. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*, 2019, no. 5, p. 107 (in Russ.).
- [17] Averina Yu.M., Asnis N.A., Vagramyan T.A., et al. Study of the oxidation rate of Fe²⁺ ions in water during air bubbling. *Theor. Found. Chem. Eng.*, 2018, vol. 52, no. 1, pp. 74–77. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040579518010013>
- [18] Kodzuka Kh., Inoue M., Imura K., et al. Mikropuzyrkovaya sistema oчитki dlya krupnogo izdeliya, takogo kak transportnoe sredstvo [Micro-bubble system for lathe-size articles as vehicle]. Patent RU 2507014. Appl. 24.02.2011, publ. 20.02.2014 (in Russ.).
- [19] Sachek N.Dzh. Sposob udaleniya zagryaznyayushchikh veshchestv iz vykhodyashchikh gazov [Method for removing pollutant substances from leaving gases]. Patent RU 2648894. Appl. 13.01.2014, publ. 28.03.2018 (in Russ.).
- [20] Krivoshein D.A., Piskunov V.A., Zubarev Yu.V., et al. Sposob travleniya medi i ee splavov [Method of copper and its alloys etching]. Patent RU 2013466. Appl. 18.11.1991, publ. 30.05.1994 (in Russ.).
- [21] Brusnitsyna L.A., Stepanovskikh E.I. Tekhnologiya izgotovleniya pechatnykh plat [Printed circuit board manufacturing technology]. Ekaterinburg, Ural Univ. Publ., 2015.
- [22] Beckert M., Klemm H. Handbuch der metallographischen Ätzverfahren. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1966.
- [23] Menshikov V.V., Boldyrev V.S., Bogatov N.A., et al. Ustroystvo dlya intensivatsii khimicheskikh protsessov v zhidkoy srede [Device for the intensification of chemical processes in a liquid medium]. Patent RU 206891. Appl. 20.04.2021, publ. 30.09.2021 (in Russ.).

- [24] Bogatov N.A., Boldyrev V.S., Savina A.S., et al. *Ustroystvo dlya akusticheskoy intensivatsii fiziko-khimicheskikh protsessov v zhidkikh rastvorakh* [Device for acoustic intensification of physical and chemical processes in liquid solutions]. Patent RU 213619. Appl. 27.04.2022, publ. 19.09.2022 (in Russ.).
- [25] Taube P.R., Baranova A.G. *Khimiya i mikrobiologiya vody* [Chemistry and microbiology of water]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983.
- [26] Margulis I.M., Margulis M.A. Interaction dynamics of bubbles in a cavitation cloud. *Russ. J. Phys. Chem*, 2004, vol. 78, no. 7, pp. 1159–1170.
- [27] Margulis M.A. *Osnovy zvukokhimii* [Fundamentals of sound chemistry]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1984.
- [28] Margulis M.A., Grundel L.M. Chemical action of low-frequency acoustic oscillations. *Doklady AN SSSR*, 1982, vol. 256, no. 2, pp. 914–917 (in Russ.).
- [29] Boldyrev V.S. *Deystvie nizkochastotnykh kolebaniy na biokhimicheski aktivnye struktury*. Dis. kand. tekhn. nauk [Effect of low-frequency oscillations on bioactive structures. Cand. Sc. (Eng.) Diss.]. Moscow, MUCTR Publ., 2013 (in Russ.).
- [30] Bogomolov B.B., Boldyrev V.S., Zubarev A.M., et al. Intelligent logical information algorithm for choosing energy- and resource-efficient chemical technologies. *Theor. Found. Chem. Eng.*, 2019, vol. 53, no. 5, pp. 709–718.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040579519050270>
- [31] Boldyrev V.S., Averina Yu.M., Menshikov V.V., et al. Technological and organizational engineering of paint processing. *Theor. Found. Chem. Eng.*, 2020, vol. 54, no. 3, pp. 420–424. DOI: <https://doi.org/10.1134/S004057952003001X>
- [32] Boldyrev V.S., Kuznetsov S.V., Menshikov V.V. *Innovatsionnoe razvitiye malotonnazhnykh nauchno-proizvodstvennykh predpriyatiy lakokrasochnoy otrasli* [Innovative development of small-tonnage scientific and production enterprises of paint and coating industry]. Moscow, Peynt-Media Publ., 2021.

Boldyrev V.S. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Chemistry, Bauman Moscow State Technical University, Head of the Department of Engineering of Chemical and Technological Systems, Engineering Center Automation and Robotics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Master’s Student, Faculty of Digital Technology and Chemical Engineering, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation); Director’s Adviser, Research Institute, NPO “Lakokraspokrytie” (Khudozhestvennyy proezd 2e, Moscow Region, Khotkovo, 141370 Russian Federation).

Bogatov N.A. — Researcher, Department of Engineering of Chemical and Technological Systems, Engineering Center Automation and Robotics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Assistant Lecturer, Department of Physics, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Savina A.S. — Researcher, Department of Engineering of Chemical and Technological Systems, Engineering Center Automation and Robotics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Assistant, Department of Physics, Post-Graduate Student, Department of Innovative Materials and Corrosion Protection, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miuskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Zotkin A.P. — Engineer, Department of Engineering of Chemical and Technological Systems, Engineering Center Automation and Robotics, Bauman Moscow State Technical University, Master's Student, Department of Security in the Digital World, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Laboratory Assistant, Department of Physics, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miuskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Pentukhin E.I. — Technician, Department of Engineering of Chemical and Technological Systems, Engineering Center Automation and Robotics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Laboratory Assistant, Department of Physics, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miuskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Boldyrev V.S., Bogatov N.A., Savina A.S., et al. Investigation of the low-frequency vibroacoustic fields influence on the carbon dioxide absorption at the liquid-gas phase boundary. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2023, no. 6 (111), pp. 55–69 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-6-55-69>