

УДК 534.6

DOI: 10.37816/2713-0789-2021-1-2-6-22

## Ультразвуковое воздействие в решении проблемы уменьшения карбонового следа: научные основы и технические предложения

В. Н. Хмелёв<sup>1</sup>, Р. Н. Голых<sup>1</sup>, С. Н. Цыганок<sup>1,\*</sup>, А. Р. Барсуков<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», Бийск, Россия*

---

### Аннотация

На сегодняшний день актуальной задачей является стремление уменьшить совокупный «карбоновый след». Существует несколько типов устройств разделения газов: криогенные, мембранные и сорбционные, которые наиболее эффективны при их реализации. Из сорбционных способов наибольшее развитие получили те, которые основаны на абсорбции – поглощение газового компонента реализуется всем объёмом жидкости. Для повышения производительности применяют ультразвуковое воздействие на пленку жидкости, вдоль которой движется поток поглощаемого газа – углекислого газа. За прошедшие годы не было проведено глубоких исследований по формированию колебаний жидкости в различных режимах для эффективного взаимодействия с газовым потоком. Поэтому в статье рассмотрены возможности реализации процесса абсорбции углекислого газа при высокоинтенсивном ультразвуковом воздействии (в кавитационном режиме) на дисперсные среды с жидкой фазой. Предложенная и разработанная модель, основанная на анализе влияния возникающих за счет кавитации волнообразных капиллярных возмущений поверхности «жидкость-газ», позволила установить возможность существенного ускорения абсорбции газа в жидкость и выявить оптимальные режимы диффузии в объёме жидкости. Результаты исследований подтвердили возможность ускорения процесса поглощения углекислоты и других вредных и целевых газообразных примесей не менее чем в 3 раза.

### Ключевые слова

ультразвук, карбоновый след, углеродный след, кавитация, абсорбция.

---

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00828, <https://rscf.ru/project/22-29-00828>*

*«Кавитационно-акустическое формирование многосвязной межфазной поверхности «газ-жидкость» для решения проблемы высокоэффективного поглощения газов»*

**Введение.** Карбоновый (или углеродный) след — это количество углекислого газа и мельчайших частиц углерода, поступающих в атмосферу из-за использования человеком продуктов природного

топлива. На сегодняшний день актуальной задачей, возводимой многими странами в ранг государственной политики, является стремление уменьшить совокупный «карбоновый след». Для этого принимаются

специальные государственные экологические программы, поощряется и мотивируется энергосберегающее производство, меняется философия потребления. По прогнозам, в ближайшие 10 лет мировая экономика потратит на сокращение выбросов углерода более 1 трлн. долл. [1]. Целые пакеты проектов, которые уже поддержаны ведущими мировыми компаниями добывающих и перерабатывающих отраслей, преследуют цель снижения «карбонового следа».

При этом за словами о борьбе за сохранение климата и экологии скрыты очевидные экономические интересы: товары и услуги в странах с низким углеродным следом получают дополнительные конкурентные преимущества.

Проблема обостряется в последние десятилетия в результате индустриализации по той причине, что естественное поглощение углекислого газа лесами и другими природными экосистемами уже не справляется с высоким углеродным следом в атмосфере.

Развиваемые искусственные способы поглощения углекислого газа, основанные на использовании свойств определенного газа и реализованные в различных устройствах (например, по патентам US20100251765, JP2008196806, 2035981(РФ), 2347604 (РФ), 2380143 (РФ), 2474462 (РФ), 2464071 (РФ)), имеют ограниченные возможности и сегодня не позволяют даже частично решить существующую проблему.

Вместе с тем, проблема поглощения и разделения газов актуальна не только для решения проблемы удаления углекислого газа из атмосферы, но и для выделения (уничтожения или использования в производственных или лечебных целях) других взрывоопасных, горючих, ядовитых примесей (метан, пропан, бутан, монооксид

углерода, сероводород, пары ртути) или лечебных (озон, окись азота, радон и т.п.).

Поскольку отдельные газовые составляющие могут служить ценным сырьём (например, сероводород для производства серной кислоты, водород), их целенаправленное выделение необходимо для использования в качестве энергоносителей, для инженерного и биомедицинского применения.

Показательным примером служит возрастающая потребность в химически чистом водороде. Кроме того, высокоэффективное решение проблемы регенерации кислорода из CO<sub>2</sub> обеспечит организацию длительных подводных экспедиций и пилотируемых космических полётов. Развитие медицины диктует возрастающую потребность в газах высокой степени чистоты (более 99,5%) как для обеззараживания, так и для оказания лечебного воздействия (кислород, азот, радон, оксид азота и т. д.).

В связи с усиливающимися угрозами распространения эпидемий дыхательных заболеваний, необходимы эффективные способы отделения и концентрирования кислорода.

Множество других примеров могут дополнительно подтвердить необходимость повышения производительности и снижения энергозатрат разделения смеси газов.

Однако, несмотря на широту применения разделения газовых смесей во многих сферах человеческой деятельности, высокопроизводительных и одновременно энергоэффективных способов разделения газов на сегодняшний день не существует. Имеющиеся попытки создания и применения промышленных устройств приводят либо к снижению качества получаемого газового продукта (по степени чистоты), либо к непропорциональному возрастанию энергозатрат, которое делает процесс

разделения газовых смесей экономически невыгодным.

По этой причине возникает необходимость создания высокоэффективных и малозатратных газоразделительных установок для разделения и поглощения любых газов.

**Материалы и методы исследования.** Анализ современных путей развития устройств разделения газов позволил установить, что существующие способы разделения газов в зависимости от положенного в основу физического принципа делятся на три вида:

1) криогенные (основанные на разности температур кипения компонентов смеси) — например по патентам №№ US20100251765, JP2008196806;

2) мембранные (основанные на разности скоростей проникновения компонентов газовой смеси сквозь вещество мембраны) — например по патентам №№ 2035981 (РФ), 2347604 (РФ);

3) сорбционные (основанные на разности скорости поглощения компонентов смеси жидким или твёрдым сорбентом) — например по патентам №№ 2474462 (РФ), 2464071 (РФ).

Среди реализуемых на практике способов наиболее эффективными являются сорбционные способы. Из сорбционных способов наибольшее внимание заслуживают способы, основанные на абсорбции, при которой поглощение газового компонента реализуется всем объёмом жидкости (при адсорбции только поверхностью).

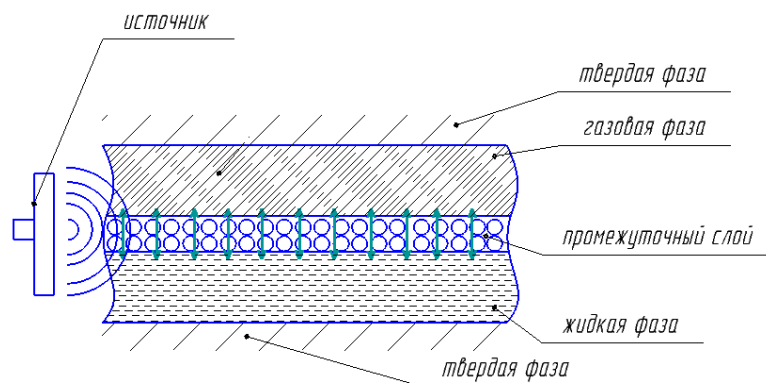
Возможность применения абсорбции и необходимость повышения производительности процесса обуславливают необходимость применения внешних

энергетических воздействий, способствующих увеличению межфазной поверхности «жидкость-газ» и коэффициента диффузии. По этой причине уже более 60 лет назад предложено применять ультразвуковое воздействие на плёнку жидкости [2, 3], вдоль которой движется поток поглощаемого газа. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют об эффективности такого воздействия и увеличении производительности процесса при различных вариантах взаимодействия газового потока с колеблющейся жидкостью (до 10...15% при параллельном движении потоков газа и жидкости, и до 30% при барботировании) [2–5]. К сожалению, исследования проводились только при малых значениях амплитуды колебаний в жидкости, т. е. без формирования кавитационного режима.

За прошедшие годы не было проведено глубоких исследований по формированию колебаний жидкости в различных режимах (в том числе и с созданием кавитации) для эффективного взаимодействия с газовым потоком, не определены оптимальные условия взаимодействия и не установлены предельные возможности практической реализации такого способа.

Поэтому на первом этапе исследований возникла необходимость в создании модели процесса ультразвуковой интенсификации абсорбции при кавитационном воздействии на жидкость для выявления оптимальных режимов (по частоте и интенсивности колебаний) и условий (по площади озвучиваемой поверхности) ультразвукового воздействия.

Ультразвуковая интенсификация абсорбции реализуется в двухслойной системе «газ-жидкость», как показано на рисунке 1.



**Рисунок 1** – Двухслойная система «газ-жидкость» для ультразвуковой интенсификации абсорбции.

Жидкая фаза покрывает твёрдую поверхность в виде тонкой плёнки. Между жидкостью и газом имеется промежуточный слой, который представляет собой переходной слой, содержащий градиент концентрации молекул жидкости и газа. Под действием ультразвуковых колебаний переходной слой может подвергаться волнообразным возмущениям, которые увеличат поверхность раздела «жидкость-газ» [6-8].

В то же время известно, что ультразвуковое воздействие не только формирует волнообразные возмущения на поверхности «жидкость-газ», но и ускоряет процессы массопереноса диффузии в объёме жидкой фазы [9]. В связи с этим моделирование абсорбции должно учитывать ультразвуковое ускорение обеих стадий процесса – поглощение через промежуточный слой и перенос в объёме газовой фазы.

В общем виде математическая постановка задачи моделирования процесса абсорбции формулируется следующим образом (процесс считается стационарным):

$$(u_g, \nabla)C_g = D_g \Delta C_g; \quad (1)$$

$$(u_l, \nabla)C_l = D_l \Delta C_l; \quad (2)$$

$$D_l \frac{\partial C_l}{\partial y} \Big|_{y=h} = D_g \frac{\partial C_g}{\partial y} \Big|_{y=h} = -K_S (C_l - C_g) \Big|_{y=h}; \quad (3)$$

где  $C_l$  – концентрация целевого компонента в жидкой фазе, кг/м<sup>3</sup>;  $D_l$  – усреднённый коэффициент диффузии в жидкой фазе, м<sup>2</sup>/с;  $u_l$  – скорость течения жидкой

фазы, м/с;  $C_g$  – концентрация целевого компонента в газовой фазе, кг/м<sup>3</sup>;  $D_g$  – коэффициент массопереноса в газовой фазе, м<sup>2</sup>/с;  $u_g$  – скорость течения жидкой фазы, м/с;  $K_S$  – коэффициент концентрационного взаимодействия, м/с;  $h$  – толщина плёнки жидкости, м.

Известны стандартные аналитические и численные методы решения уравнений (1-3) [10-14]. Однако для расчёта кинетики и эффективности процесса абсорбции, интенсифицируемого ультразвуковыми колебаниями, необходимы подмодели для определения эквивалентных усреднённых коэффициентов в уравнениях (1-3).

При создании подмоделей приняты следующие допущения.

1. Мгновенность диффузии целевого компонента внутри пузырька по сравнению с диффузией в жидкой фазе (то есть резкий скачок концентрации целевого компонента), так как в газах диффузия протекает быстрее.

Основываясь на справочных данных, без ультразвука объемный коэффициент диффузии ( $D_g$ ) углекислого газа в воздухе равен  $0,14 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с [15], в свою очередь объемный коэффициент диффузии ( $D_l$ ) углекислого газа в воде равен  $0,000015 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с [16]. Это позволяет судить о том, что диффундирование целевого компонента в жидкой фазе происходит намного медленнее, чем в газовой фазе ( $D_l \ll D_g$ ).

Поэтому из двух усреднённых коэффициентов диффузии (при действии ультразвука) достаточно определить один – коэффициент диффузии в жидкости.

2. Жидкость-абсорбент является линейно-вязкой (ньютоновской), так как при практических приложениях неньютоновские среды, являющиеся, как правило, высокомолекулярными (высокодисперсными), не используются для абсорбции газов.

3. Количество кавитационных пузырьков в жидкости определяется процессами их коалесценции при расширении и дробления при их схлопывании.

*Подмодель для определения эквивалентного коэффициента диффузии в жидкой фазе.*

Эквивалентный коэффициент диффузии в жидкой фазе, в первую очередь, определяется кавитационными процессами.

На основании принятого допущения о том что жидкость является линейно-вязкой, зависимость радиуса пузырька от времени в стадии расширения описывается уравнением Нолтинга–Непайреса (4), в стадии сжатия уравнением Кирквуда–Бете (5):

$$\rho \left( \frac{3}{2} \left( \frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 + R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} \right) = -4\mu \frac{\partial R}{R} + \quad (4)$$

$$+ p_v + \left( p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - p_\infty;$$

$$R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} \left( 1 - \frac{\partial R}{C} \right) + \frac{3}{2} \left( \frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 \left( 1 - \frac{\partial R}{3C} \right) = \quad (5)$$

$$= H \left( 1 + \frac{\partial R}{C} \right) + \frac{\partial H}{\partial t} \frac{R}{C} \left( 1 - \frac{\partial R}{C} \right),$$

где  $R$  – мгновенный радиус пузырька, м;  $\rho$  – плотность кавитирующей среды, кг/м<sup>3</sup>;  $p_0$  – статическое давление в жидкости, Па;  $\mu$  – вязкость жидкости, Па·с;  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкой фазы, Н/м;  $H$  – энтальпия жидкости, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;

$C$  – локальная скорость звука в жидкой фазе, м/с.

Определение концентрации кавитационных пузырьков проводилось в небольшой области, размер которой намного меньше длины ультразвуковой волны и намного больше размера отдельного кавитационного пузырька. Концентрация кавитационных пузырьков определяется двумя процессами: объединением пузырьков во время каждого расширения пузырьков и их распадом на несколько зародышей во время схлопывания. Концентрация определяется по уравнению (6) [17]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{n(j-1)}{iT_0} - k_B n^2, \quad (6)$$

где  $n$  – количество кавитационных пузырьков в зависимости от времени  $t$ , м<sup>-3</sup>;  $i$  – среднее число пульсаций пузыря до его схлопывания;  $k_B$  – постоянная скорости слияния пузырьков, м<sup>3</sup>/с;  $T_0$  – период ультразвуковых колебаний, с;  $j$  – среднее количество зародышей, образованных отдельным разрывом пузырька. Стационарная концентрация, когда процессы слияния и распада находятся в равновесии, не зависит от начальной концентрации ядер кавитации и определяется следующим выражением:

$$n_{bub} = \frac{j-1}{ik_B T_0}. \quad (7)$$

Константа слияния пропорциональна средней скорости (за период ультразвуковых колебаний) схождения пузырьков и поперечного сечения столкновения пузырьков:

$$k_B = \frac{S_{eff} \langle u \rangle}{2}, \quad (8)$$

где  $S_{eff}$  – эффективное сечение столкновения пузырьков (определяется расстоянием между пузырьками, при этом продолжительность слияния много меньше периода ультразвуковых колебаний), м<sup>2</sup>;  $\langle u \rangle$  – средняя скорость схождения пузырьков, м/с.



$S_{eff}$  определяется как:

$$S_{eff} = 25\pi R_{MAX}^2. \quad (9)$$

Средняя скорость схождения пузырьков определяется уравнением, полученным авторами из 2-го закона Ньютона с учетом действия сил Бьеркнеса:

$$\begin{aligned} & \frac{4\pi R_0^3}{3} \rho_G \frac{\partial^2 \mathbf{d}_{12}}{\partial t^2} = \\ & = -2 \frac{4\pi R^3}{3 |\mathbf{d}_{12}|^3} \rho_L \frac{\partial \left( R^2 \frac{\partial R}{\partial t} \right)}{\partial t} \mathbf{d}_{12} + \\ & + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{4\pi R^3}{3} \rho_L \left( -\frac{\partial \mathbf{d}_{12}}{\partial t} \right) \right) + \\ & + 4\pi \eta R \left( -\frac{\partial \mathbf{d}_{12}}{\partial t} \right), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\mathbf{d}_{12}$  — трехмерный вектор расстояния между двумя пузырьками, м;  $R^0$  — начальный радиус пузырька, м;  $\rho_G$  — плотность газовой фазы зародышей, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_L$  — плотность жидкой фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta$  — вязкость жидкости, Па·с.

Численное решение уравнения (10) позволило выявить зависимость вектора линии центров двух отдельных пузырьков от времени и рассчитать среднюю скорость их сближения по следующему выражению:

$$\langle u \rangle = \frac{|\mathbf{d}_{12}(T) - \mathbf{d}_{12}(0)|}{T}.$$

Число ядер  $j$  после развала рассчитывалось косвенным методом с использованием экспериментальных данных о зависимости концентрации пузырьков от интенсивности ультразвука [18].

При известных концентрации и радиусе пузырьков определяли объемное содержание пузырьков:

$$\delta_l(t) = \frac{4}{3} \pi R^3(t) n_{bub} = \frac{4(j-1)\pi R^3(t)}{3ik_B T_0}.$$

В дальнейшем выражение для объемного содержания пузырьков используется для определения эквивалентного коэффициента диффузии и увеличения границы раздела «газ-жидкость».

Кавитирующая жидкость — это неоднородная среда. Поэтому для определения коэффициента диффузии используется

микроскопическое уравнение диффузии (учитывающее разницу между коэффициентом в твердо-жидкой фазе и в кавитационной полости):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\mathbf{u}, \nabla) C = \text{div}(D_{micro}(\mathbf{r}) \nabla C), \quad (11)$$

где  $D_{micro}$  — коэффициент микроскопической диффузии, м<sup>2</sup>/с.

В уравнении (11) коэффициент диффузии зависит от пространственной координаты и определяется типом фазы в наблюдаемой точке (газовая фаза, жидкая фаза или переходный слой между фазами).

Это непрерывно дифференцируемая функция относительно координаты из-за наличия переходного слоя. Следовательно, необходимо усреднить это уравнение по объему (размеры которого намного меньше толщины жидкой пленки, но намного больше, чем у кавитационного пузырька) для расчета абсорбционной способности.

Согласно обобщению исследований и оценок, акустические потоки слабо влияют на коэффициент диффузии [19–21].

Определение эквивалентного коэффициента диффузии для газожидкостной смеси путем усреднения уравнения (11) по объему проводилось с использованием результатов исследований, представленных в [16, 22]. Согласно этим исследованиям, коэффициент диффузии жидкости, содержащей пузырьки газа, равен:

$$D = \frac{1 - y_A}{\frac{y_B}{D_{l0}} + \frac{y_C}{D_{g0}}}, \quad (12)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $D_{l0}$ ,  $D_{g0}$  — коэффициент диффузии в жидкой и газовой фазах, м<sup>2</sup>/с;  $y_A$ ,  $y_B$ ,  $y_C$  — молярные концентрации, кг/моль.

С учётом принятого допущения о том, что  $\frac{y_C}{D_{g0}} \ll \frac{y_B}{D_{l0}}$ ; объемный коэффициент диффузии ( $D_g$ ) диоксида углерода в воздухе равен  $0,14 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с без ультразвука [15]; коэффициент объемной диффузии ( $D_l$ )

диоксида углерода в воде составляет  $0,000015 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$  [16]), выражение преобразуется к следующему упрощённому виду:

$$D = \frac{D_{l0}}{1 - \delta_l}, \quad (13)$$

где  $\delta_l$  — объемное содержание пузырьков (индекс кавитации).

Поскольку объёмное содержание пузырьков зависит от времени (из-за расширения и схлопывания пузырьков), данный коэффициент диффузии усредняется за период колебаний (14).

$$\langle D \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{D_{l0} dt}{1 - \delta_l(t)}, \quad (14)$$

где  $T$  — период ультразвуковых колебаний, с.

*Подмодель для определения эквивалентного коэффициента концентрационного взаимодействия в жидкой фазе.*

Так как коэффициент концентрационного взаимодействия пропорционален площади межфазной поверхности,

$$K_S = K_{S0} \frac{S_{US}}{S_{N_0US}}, \quad (15)$$

необходимо исследование формирования капиллярных волн, влияющих на площадь.

Разработанная авторами модель для определения относительного увеличения площади межфазной поверхности  $\frac{S_{US}}{S_{N_0US}}$  основывается на уравнениях каждой стадии образования капиллярных волн: сферически симметричного расширения кавитационного пузырька; его ассиметричного схлопывания; образования узконаправленных ударных волн и формирования волнообразных возмущений профиля поверхности раздела «газ – жидкость».

При рассмотрении стадии расширения кавитационного пузырька определяется его максимальный радиус  $R_{MAX}$  на основании уравнения Нолтинга-Непайреса (4).

Затем определяется форма пузырька при его схлопывании с максимального радиуса  $R_{MAX}$  до минимальных размеров на основании интегрального уравнения (16) с граничными условиями для потенциала скорости жидкости на стенке пузырька (17).

$$\frac{\phi(\mathbf{r}_0)}{2} = \int_{S_A \cup S_B} \left( E_{r_0} V_n - \frac{\partial E_{r_0}}{\partial \mathbf{n}} \phi \right) \partial S; \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{|V_n|^2 + |V_\tau|^2}{2} = \\ = \frac{2\sigma K}{\rho} - \frac{p_v}{\rho} \left( \frac{3V}{4\pi R_{MAX}^3} \right)^\gamma, \end{aligned} \quad (17)$$

где  $\mathbf{r}_0$ ,  $\mathbf{r}$  — векторы координат точек стенки кавитационного пузырька или распылительной поверхности, м;  $\phi$  — потенциал скорости движения жидкости на стенке кавитационного пузырька  $S_A$  или твёрдой поверхности  $S_B$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $V_n$  и  $V_\tau$  — нормальная и тангенциальная компоненты скорости движения жидкости,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $E_{r_0}(\mathbf{r})$  — фундаментальное решение уравнения Лапласа;  $V$  — объём кавитационного пузырька,  $\text{м}^3$ ;  $p_n$  — давление насыщенных паров жидкости,  $\rho$  и  $\sigma$  — плотность ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) и поверхностное натяжение ( $\text{Н}/\text{м}$ ) жидкости соответственно;  $K$  — средняя кривизна стенок пузырька,  $\text{м}^{-1}$ .

Пузырёк фактически представляет собой полусферический излучатель ударной волны, профиль давления которой на границе «жидкость-газ» аппроксимируется полученным выражением (18):

$$\begin{aligned} p(\mathbf{r}, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f a \varepsilon \text{Re} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} p_c(t_1) \times \\ \times e^{\frac{2\pi i f n}{c} \left( c(t-t_1) + \frac{a}{\varepsilon} \frac{\pi n f}{\rho c^2} + z \varepsilon \cos \psi \right)} \times \\ \times \sin \psi J_0 \left( 2\pi n \frac{f}{c} r \varepsilon \sin \psi \right) \partial t_1 \partial \psi; \\ \varepsilon = \frac{a}{\sqrt{r^2 + z^2}}, \end{aligned} \quad (18)$$

где  $(r, z)$  — координаты точки границы раздела «жидкость-газ», м;  $f$  — частота

ультразвукового воздействия,  $c^{-1}$ ;  $t$  и  $t_1$  — моменты времени, с;  $\eta$  — вязкость жидкости, Па·с;  $\rho$  и  $c$  — плотность ( $\text{кг/м}^3$ ) и скорость звука ( $\text{м/с}$ ) в жидкости соответственно;  $p_c(t_1)$  — давление в ядре кавитационного пузырька, Па;  $a$  — радиус кавитационного пузырька при достижении максимума давления в его ядре, м.

Найденный профиль давления ударной волны используется в дальнейшем для определения относительного увеличения площади поверхности раздела фаз исходя из полученного выражения (19),

$$\frac{S_{US}}{S_{No US}} = 1 + \frac{4h}{\pi} f \left\langle \frac{j-1}{R_{MAX}^2 U} \right\rangle \int_0^{0,5\lambda} r \sqrt{1 + \left( \frac{1}{\rho} \int_0^t \int_0^{t_2} \frac{\partial^2 p}{\partial z \partial r} \partial t_1 \partial t_2 \right)^2} dr; \quad (19)$$

$$\int_0^t \int_0^{t_2} \frac{\partial^2 p}{\partial z \partial r} \left( \frac{\lambda}{2}, z, t_1 \right) \partial t_1 \partial t_2 = 0. \quad (20)$$

учитывающего изменение концентрации пузырьков за счёт их коалесценции и дробления (20)

В формулах (19) и (20)  $\lambda$  — длина капиллярной волны, м, определяемая из условия (5);  $R_{MAX}$  — максимальный радиус пузырька, м;  $U$  — средняя скорость сближения пузырьков, м/с;  $j$  — количество зародышей, образуемых при дроблении отдельного пузырька,  $\langle \rangle$  — знак усреднения по толщине плёнки жидкости;  $h$  — толщина плёнки, м.

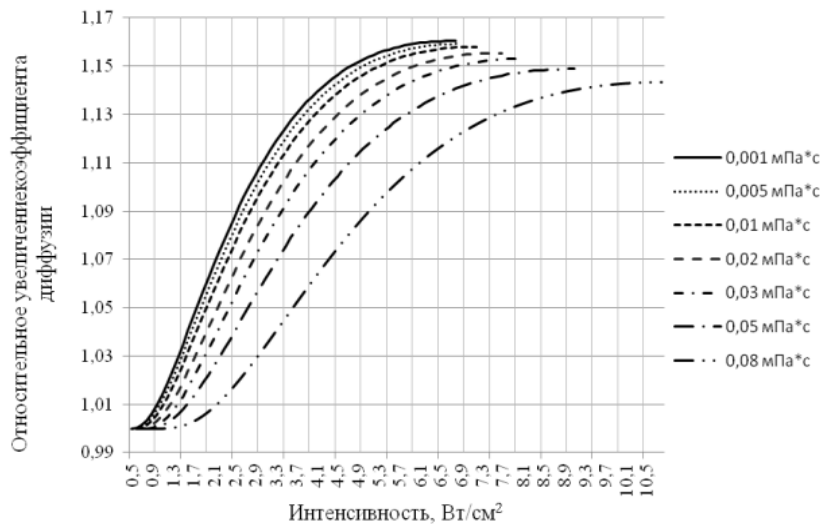
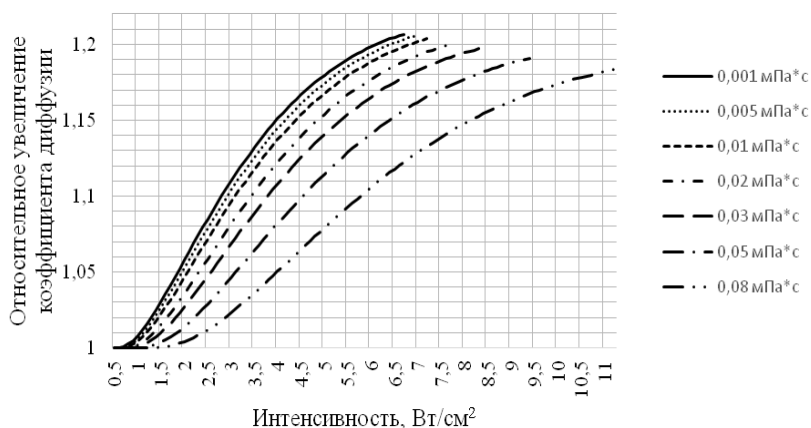
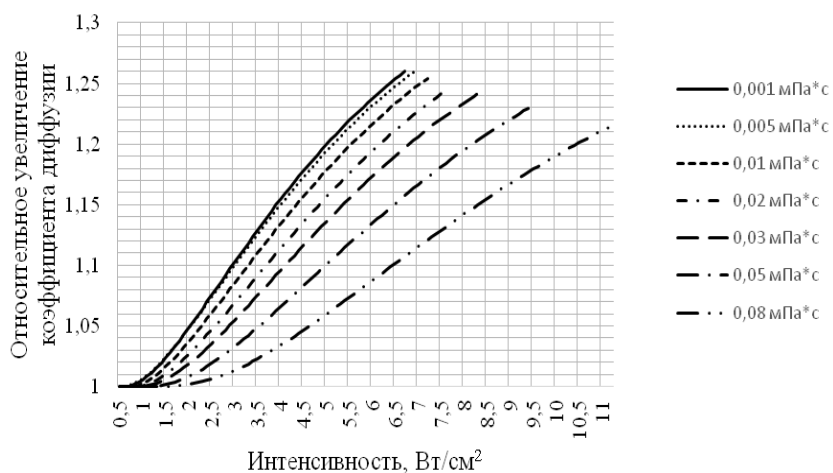


Рисунок 2 — Зависимости относительного увеличения коэффициента диффузии от интенсивности колебаний при различной вязкости (частота 22 кГц).

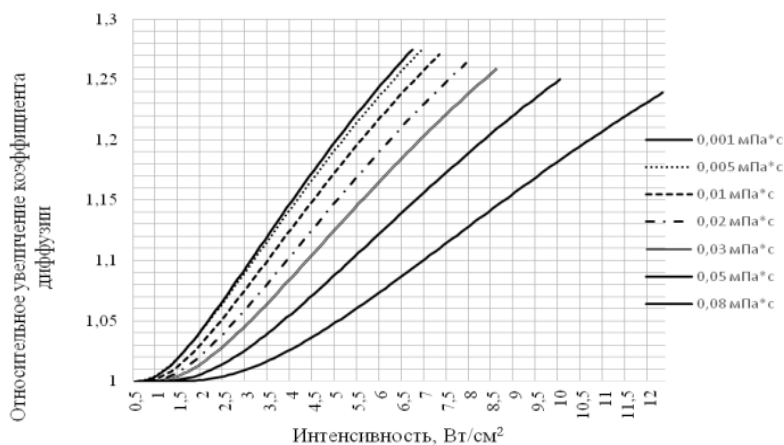




**Рисунок 3** — Зависимости относительного увеличения коэффициента диффузии от интенсивности колебаний при различной вязкости (частота 25 кГц).



**Рисунок 4** — Зависимости относительного увеличения коэффициента диффузии от интенсивности колебаний при различной вязкости (частота 30 кГц).



**Рисунок 5** — Зависимости относительного увеличения коэффициента диффузии от интенсивности колебаний при различной вязкости (частота 33 кГц).

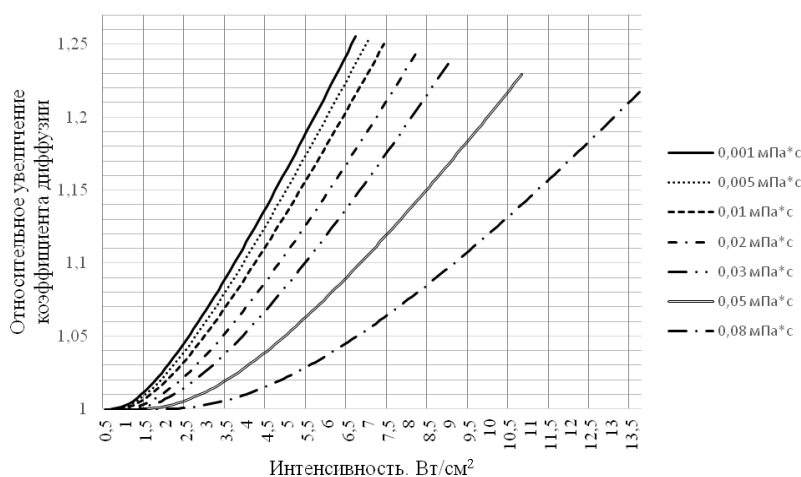


Рисунок 6 — Зависимости относительного увеличения коэффициента диффузии от интенсивности колебаний при различной вязкости (частота 44 кГц).

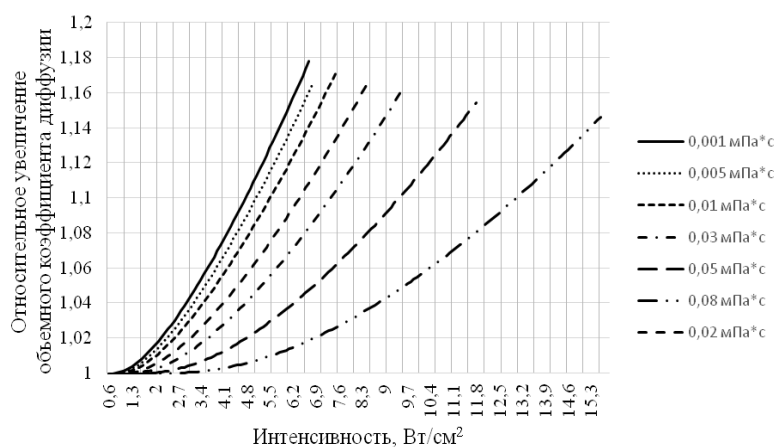


Рисунок 7 — Зависимости относительного увеличения коэффициента диффузии от интенсивности колебаний при различной вязкости (частота 60 кГц).

### Результаты и их обсуждение

Таким образом предложенная модель процесса, разработанные подмодели и их анализ позволяют выявить все необходимые усреднённые коэффициенты (диффузии в объёме жидкой фазы и концентрационного взаимодействия на поверхности «жидкость-газ») для определения эффективности процесса абсорбции.

Полученные расчётные зависимости эквивалентного коэффициента диффузии на основании предложенной модели (с учетом ультразвукового воздействия) представлены на рисунках 2–7

Как следует из представленных графиков, при повышении интенсивности возрастает объёмный коэффициент диффузии за счёт увеличения индекса кавитации.

Обрыв графиков соответствует наступлению режима вырожденной кавитации, когда пузырьки перестают схлопываться и вырождаются в долгоживущие [23]. При этом из-за монотонного возрастания индекса кавитации с повышением интенсивности обрыв соответствует максимально достигаемому коэффициенту диффузии при данной частоте колебаний и свойствах жидкости.

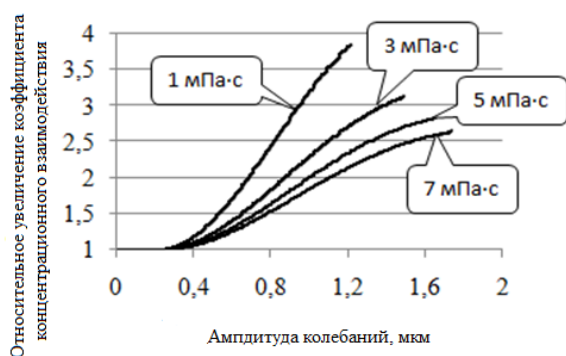
Анализ зависимости максимально достигаемого коэффициента диффузии от частоты позволил установить, что существует оптимальная частота ультразвукового воздействия, при которой объёмный коэффициент диффузии максимален. Оптимальная частота не зависит от вязкости

жидкости–абсорбента и интенсивности колебаний и составляет 33 кГц.

Наличие оптимальной частоты обусловлено тем, что при частотах ниже оптимальной образуется меньшее число кавитационных пузырьков большего размера, а при частотах выше оптимальной образуются пузырьки меньшего размера и, соответственно, критический радиус пузырька, при котором он вырождается в долгоживущий, также уменьшается.

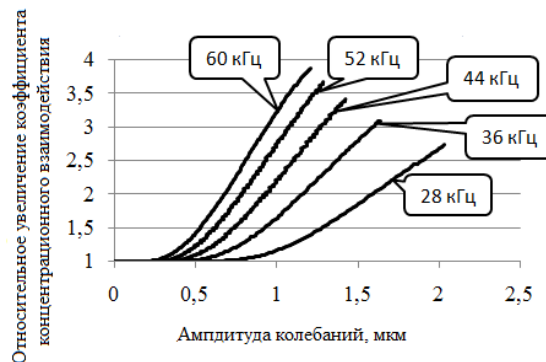
При оптимальной частоте воздействия, предельно допустимой интенсивности колебаний (при которой пузырьки начинают вырождаться в долгоживущие) и равномерном озвучивании по всему объёму жидкости диффузия ускоряется до 30%, что свидетельствует о возможности существенного повышения эффективности в сравнении с достигнутыми ранее экспериментальными результатами.

Из результатов проведенного анализа очевидно, что практическая реализация технологии поглощения газов при помощи ультразвукового воздействия требует изучения влияния ещё одного фактора — площади поверхности раздела «жидкость–газ» (эквивалентного коэффициента концентрационного взаимодействия).



а)

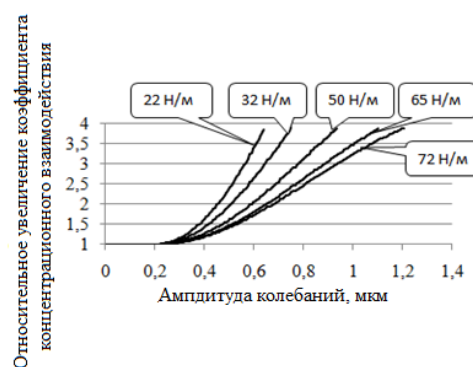
Расчётные зависимости эквивалентного коэффициента концентрационного взаимодействия в зависимости от амплитуды колебаний поверхности представлены на рисунках 8, 9.



**Рисунок 8** — Зависимости относительного увеличения коэффициента концентрационного взаимодействия от амплитуды колебаний при различных частотах.

Обрыв графиков свидетельствует о том, что капиллярная волна теряет устойчивость и начинает распадаться на капли.

На рисунке 9 приведены зависимости удельной площади поверхности раздела фаз от свойств жидкости — вязкости (а) и поверхностного натяжения (б), которые оказывают существенное влияние на профиль поверхности контакта фаз наряду с режимами УЗ воздействия.



б)

**Рисунок 9** — Зависимости удельной площади границы раздела фаз от амплитуды при различных свойствах жидкости (частота 60 кГц).

Представленные на рисунке 9 зависимости позволяют сделать вывод о том, что увеличение вязкости приводит к уменьшению площади поверхности раздела из-за сил вязкого трения. При этом уменьшение поверхностного натяжения приводит к увеличению площади, поскольку поверхностная энергия связана с ним прямой зависимостью.

В итоге, в широком диапазоне свойств жидкости, ультразвуковое воздействие позволяет увеличить площадь поверхности раздела «жидкость-газ» в 2,5...4 раза.

Таким образом, ультразвуковое воздействие, с учётом увеличения скорости диффузии в объёме жидкости теоретически может обеспечить ускорение процесса абсорбции не менее чем в 3...5 раз.

#### Заключение

Проведенные исследования позволили показать возможность увеличения скорости поглощения при различных вариантах взаимодействия газового потока с жидкостью, подвергаемой ультразвуковому воздействию при высоких значениях амплитуды, т.е. с формированием в ней кавитационного процесса.

Предложенная и разработанная модель ультразвуковой интенсификации процесса абсорбции, учитывающая влияние волнообразных капиллярных возмущений поверхности «жидкость-газ» и ускорение диффузии в объёме жидкости за счёт кавитации, позволила выявить оптимальные условия взаимодействия и установить предельные возможности практической реализации ультразвукового воздействия на плёнку жидкости, взаимодействующей с потоком поглощаемого газа.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности увеличения скорости диффузии в объёме жидкости не менее чем в 3...5 раз и создании практических конструкций устройств, обеспечивающих

разделение и поглощение любых газов и способствующих решению проблемы «карбонового следа».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Углеродный след – главная угроза XXI века. *Комсомольская правда*, [Online], Январь, 2016. Режим доступа: <https://www.irk.kp.ru/daily/26484/3354493/>
- [2]. Мальцев Н. Н. Поглощение бензола и возможность его усиления под действием ультразвука: канд. дисс. Днепропетровск, Украина, 1956.
- [3]. Рамм В. М., Газопоглощение. Москва, Химия, 1976.
- [4]. N. Khan, and Y. Adewuyi, Modeling the Ultrasonic Cavitation-Enhanced Removal of Nitric Oxide from Flue Gases In a Bubble Column Reactor, in *American Institute of Chemical Engineerings 2008 Annual Meeting*, 2008.
- [5]. F. Laugier, C. Andriantsiferana, A.M. Wilhelm, and H. Delmas, Ultrasound in gas-liquid systems: Effects on solubility and mass transfer, *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 15, Iss. 6, 2008, pp. 965–972.
- [6]. A. Rahimzadeh, M.-R. Ahmadian-Yazdi, and M. Eslamian, Experimental study on the characteristics of capillary surface waves on a liquid film on an ultrasonically vibrated substrate, *Fluid Dynamics Research*, Vol. 50, No. 6, October 2018.
- [7]. A. Sugondo, Sutrisno, W. Anggono, and O. Anne, Effect of Frequency on Droplet Characteristics in Ultrasonic Atomization Process, in *2018 The 1st International Conference on Automotive, Manufacturing, and Mechanical Engineering (IC-AMME 2018)*, 2008, 7 p.
- [8]. V. Preobrazhensky, V. Aleshin, and P. Pernod, Explosive Instability of Gravity-Capillary Waves under Ultrasound Radiation

- Pressure, *Phys. Wave Phen.*, 26, 2018, pp. 234–242.
- [9]. Y.G. Adewuyi, and N.E. Khan, Enhanced Removal of Nitrogen Oxide from Flue Gases in a Bubble Column Reactor, *American Institute of Chemical Engineers Journal*, Vol. 58, No. 8, 2012, pp. 2387–2411.
- [10]. Q. Xu, and H. An, A class of domain decomposition based nonlinear explicit–implicit iteration algorithms for solving diffusion equations with discontinuous coefficient, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 386, 2021.
- [11]. F. Muhiddin, and J. Sulaiman, Fourth-Order Crank-Nicolson Solution for Solving Diffusion Equation Using MSOR Iteration, *Advanced Science Letters*, 24, 2018, pp. 1912–1916.
- [12]. H. Huang, X. Wang, and X. Ma, A comparison study of solving diffusion equations with different algorithm methods, *AIP Advances*, 6, 2016.
- [13]. H. Jafari, H. Tajadodi, and S. Johnston, A decomposition method for solving diffusion equations via local fractional time derivative, *Thermal Science*, 19, 2015, pp. 123–129.
- [14]. M. Paripour, E. Babolian, and J. Saeidian, Analytic solutions to diffusion equations, *Mathematical and Computer Modeling*, 51, 2010, pp. 649–657.
- [15]. Кошкин Н. Н., Ширкевич М. Справочник по элементарной физике. Москва, Наука, 1976.
- [16]. Новоселов А. Г., Дужий А. Б., Голикова Е. Ю. Молекулярная диффузия газов в жидкости. Коэффициенты молекулярной диффузии диоксида углерода в воде. Научный журнал НИУ ИФМО, серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. №2.
- [17]. Маргулис М. А., Маргулис И. М. Динамика ансамбля пузырьков в кавитационной жидкости. Журнал физической химии. 2007. №81 (12). С. 2290–2295.
- [18]. Розенберг Л. Д. Мощные ультразвуковые поля. М., Наука, 1968.
- [19]. V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golykh, and V.A. Nesterov, Theoretical study coagulation of aerosols in thin resonant gaps, *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2019, Novosibirsk, Russia*, 2019, pp. 180–187.
- [20]. Руденко О. В., Солюян С.И. Теоретические основы нелинейной акустики, Москва, Наука, 1975.
- [21]. K.S. Yong, and K. Sangmo, Acoustic Streaming, *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*, 2015, pp. 1–15.
- [22]. C. Y. Wang, and C. Beckermann, A Multiphase Solute Diffusion Model for Dendritic Alloy Solidification, *Metallurgical transactions A*, Vol. 24A, 1993, pp. 2787–2802.
- [23]. R. Golykh, A. Shalunov, V. Khmelev, R. Lopatin, V. Minakov, and V. Shakura, Evaluation of Optimum Model and Conditions Providing Increasing Ultrasonic Cavitation Area in High-Viscous and Non-Newtonian Fluids, *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*, 2020, Vol. 17, No. 2, pp. 101–108.

**Хмелёв Владимир Николаевич** — д-р техн. наук, профессор, заместитель директора по научной работе, кафедра методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, 27).

**Голых Роман Николаевич** — д-р техн. наук, доцент, кафедра методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, 27).

**Цыганок Сергей Николаевич** — канд. техн. наук, доцент, кафедра методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, 27).

**Барсуков Александр Романович** — студент, кафедра методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, 27).



## Ultrasonic impact in solving the problem of carbon trace reduction: scientific basis and technical proposals

V. N. Khmelev<sup>1</sup>, R. N. Golykh<sup>1</sup>, S. N. Tsyganok<sup>1,\*</sup>, A. R. Barsukov<sup>1</sup>

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

---

### Abstract

Today, an urgent task is to strive to reduce the total "carbon footprint". There are several types of gas separation devices: cryogenic; membrane and sorption, which are most effective in their implementation. Among the sorption methods, the most developed are those based on absorption — the absorption of the gas component is realized by the entire volume of the liquid. To increase productivity, ultrasonic action is used on a liquid film, along which a flow of absorbed gas - carbon dioxide - moves. Over the past years, no deep research has been carried out on the formation of fluid oscillations in various modes for effective interaction with the gas flow. Therefore, the article discusses the possibilities of implementing the process of absorption of carbon dioxide under high-intensity ultrasonic action (in cavitation mode) on dispersed media with a liquid phase. The proposed and developed model, based on the analysis of the influence of the wave-like capillary disturbances of the liquid-gas surface arising due to cavitation, made it possible to establish the possibility of a significant acceleration of gas absorption into the liquid and to reveal the optimal diffusion modes in the volume of the liquid. The research results confirmed the possibility of accelerating the absorption of carbon dioxide and other harmful and target gaseous impurities by at least 3 times.

### Keywords

ultrasound, carbon footprint, cavitation, absorption.

---

### REFERENCES

- [1]. The carbon footprint is the main threat of the 21st century, *Komsomolskaya Pravda* [Online], January 2016. Available: <https://www.irk.kp.ru/daily/26484/3354493>
- [2]. N. N. Maltsev, Absorption of benzene and the possibility of its intensification under the action of ultrasound: Ph. D. thesis, Dnepropetrovsk, UA, 1956. (In Russ.)
- [3]. V.M. Ramm, Gas absorption, Moscow, RU: Chemistry, 1976. (In Russ.)
- [4]. N. Khan, and Y. Adewuyi, Modeling the Ultrasonic Cavitation-Enhanced Removal of Nitric Oxide from Flue Gases In a Bubble Column Reactor, in *American Institute of Chemical Engineerings 2008 Annual Meeting*, 2008.
- [5]. F. Laugier, C. Andriantsiferana, A.M. Wilhelm, and H. Delmas, Ultrasound in gas-liquid systems: Effects on solubility and mass transfer, *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 15, Iss. 6, 2008, pp. 965–972.
- [6]. A. Rahimzadeh, M.-R. Ahmadian-Yazdi, and M. Eslamian, Experimental study on the characteristics of capillary surface

- waves on a liquid film on an ultrasonically vibrated substrate, *Fluid Dynamics Research*, Vol. 50, No. 6, October 2018.
- [7]. A. Sugondo, Sutrisno, W. Anggono, and O. Anne, Effect of Frequency on Droplet Characteristics in Ultrasonic Atomization Process, in 2018 The 1st International Conference on Automotive, Manufacturing, and Mechanical Engineering (IC-AMME 2018), 2008, 7 p.
- [8]. V. Preobrazhensky, V. Aleshin, and P. Pernod, Explosive Instability of Gravity-Capillary Waves under Ultrasound Radiation Pressure, *Phys. Wave Phen.*, 26, 2018, pp. 234–242.
- [9]. Y.G. Adewuyi, and N.E. Khan, Enhanced Removal of Nitrogen Oxide from Flue Gases in a Bubble Column Reactor, *American Institute of Chemical Engineers Journal*, Vol. 58, No. 8, 2012, pp. 2387-2411.
- [10]. Q. Xu, and H. An, A class of domain decomposition based nonlinear explicit–implicit iteration algorithms for solving diffusion equations with discontinuous coefficient, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 386, 2021.
- [11]. F. Muhiddin, and J. Sulaiman, Fourth-Order Crank-Nicolson Solution for Solving Diffusion Equation Using MSOR Iteration, *Advanced Science Letters*, 24, 2018, pp. 1912-1916.
- [12]. H. Huang, X. Wang, and X. Ma, A comparison study of solving diffusion equations with different algorithm methods, *AIP Advances*, 6, 2016.
- [13]. H. Jafari, H. Tajadodi, and S. Johnston, A decomposition method for solving diffusion equations via local fractional time derivative, *Thermal Science*, 19, 2015, pp. 123-129.
- [14]. M. Paripour, E. Babolian, and J. Saeidian, Analytic solutions to diffusion equations, *Mathematical and Computer Modeling*, 51, 2010, pp. 649–657.
- [15]. N.N. Koshkin, and M.G. Shirkevich, *Elementary Physics Handbook*, Moscow, RU: Science, 1976.
- [16]. A.G. Novoselov, A.B. Duzhiy, and E.Y. Golikova, Molecular diffusion of gases in a liquid. Molecular diffusion coefficients of carbon dioxide in water, *Scientific Journal of NRU IFMO. Series “Processes and devices of food productions”*, No. 2, 2014. In Russian
- [17]. M.A. Margulis, and I.M. Margulis, Dynamics of bubbles ensemble in cavitation liquid, *Journal of physical chemistry*, 81, 12, 2007, pp. 2290–2295.
- [18]. L.D. Rozenberg, *Powerful ultrasonic fields*, RU, Moscow: Science, 1968.
- [19]. V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golykh, and V.A. Nesterov, Theoretical study coagulation of aerosols in thin resonant gaps, *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM’2019*, Novosibirsk, Russia, 2019, pp. 180-187.
- [20]. O.V. Rudenko, and S.I. Soluyan, *Theoretical foundations of nonlinear acoustics*, Moscow, RU: Science, 1975.
- [21]. K.S. Yong, and K. Sangmo, *Acoustic Streaming*, *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*, 2015, pp. 1–15.
- [22]. C. Y. Wang, and C. Beckermann, A Multiphase Solute Diffusion Model for Dendritic Alloy Solidification, *Metallurgical transactions A*, Vol. 24A, 1993, pp. 2787–2802.
- [23]. R. Golykh, A. Shalunov, V. Khmelev, R. Lopatin, V. Minakov, and V. Shakura, Evaluation of Optimum Model and Conditions Providing Increasing Ultrasonic Cavitation Area in High-Viscous and Non-Newtonian Fluids, *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*, Vol. 17, No. 2, 2020, pp. 101-108.

**Khmelev V. N.** — Dr. Sc. (Eng.), professor, deputy director for research, department of methods and instruments of measurement and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation)

**Golykh R. N.** — Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, department of methods and instruments of measurement and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation).

**Tsyganok S. N.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, department of methods and instruments of measurement and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation).

**Barsukov A. R.** — student, department of methods and instruments of measurement and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Ультразвуковое воздействие в решении проблемы уменьшения карбонового следа: научные основы и технические предложения / В. Н. Хмелёв, Р. Н. Голых, С. Н. Цыганок, А. Р. Барсуков // Промышленные процессы и технологии. 2021. № 1. С. 6–22

DOI: 10.37816/2713-0789-2021-1-2-6-22

**Please cite this article as:**

Khmelev V. N., Golykh R. N., Tsyganok S. N., Barsukov A. R. Ultrasonic impact in solving the problem of carbon trace reduction: scientific basis and technical proposals. Industrial processes and Technologies, 2021, no. 1, pp. 6–22.

DOI: 10.37816/2713-0789-2021-1-2-6-22