

УДК 534-8
DOI: 10.15372/PMTF202315435

ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КАВИТАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МЕЖФАЗНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ГАЗ — ЖИДКОСТЬ ПРИ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ АЭРАЦИИ

Р. Н. Голых, Ж.-Б. Карра*, В. Н. Хмелев, И. А. Маняхин,
В. Д. Минаков, Д. В. Генне, А. Р. Барсуков

Бийский технологический институт — филиал Алтайского государственного
технического университета им. И. И. Ползунова, Бийск, Россия

* Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mails: romangl90@gmail.com, jb.carrat@gmail.com, vnh@bti.secna.ru, manyaxin.ivan@bk.ru,
slava2926@mail.ru, gdv@bti.secna.ru, alexbarscreed@yandex.ru

Разработан стенд для проведения экспериментальных исследований структуры, формы и размеров межфазной поверхности газ — жидкость при ультразвуковом воздействии и принудительной аэрации. Обнаружено, что ультразвуковое воздействие приводит к увеличению площади межфазной поверхности при аэрации приблизительно в 1,5 раза. Установлено существование оптимальной интенсивности ультразвукового воздействия, которая обеспечивает максимальный прирост площади межфазной поверхности на единицу подведенной ультразвуковой энергии.

Ключевые слова: ультразвук, аэрация, скоростная киносъемка, межфазная поверхность, кавитация

Введение. Процесс массообмена газа, растворенного в жидкости, является более медленным диффузионным процессом по сравнению с массообменом газа, растворенного в газе, или жидкости, растворенной в другой жидкости. Это обусловлено значением коэффициента диффузии газа в жидкости [1], которое в $5000 \div 10\,000$ раз меньше коэффициента диффузии газа в газе [2].

Вследствие данного физического ограничения необходимо повышать совокупную скорость массопереноса за счет увеличения площади межфазной поверхности. В свою очередь, возрастание интегрального потока газа при увеличении площади поверхности позволяет увеличить скорость физико-химических процессов (растворение газа (абсорбция) при повышенном парциальном давлении целевого компонента (растворяемого или извлекаемого газа) в газовой фазе, дегазация при пониженном парциальном давлении целевого компонента в газовой фазе, химические реакции газа с жидкостью), происходящих в приповерхностном слое вблизи границы раздела жидкость — газ [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 23-12-00278, <https://rscf.ru/project/23-12-00278/>).

© Голых Р. Н., Карра Ж.-Б., Хмелев В. Н., Маняхин И. А., Минаков В. Д., Генне Д. В.,
Барсуков А. Р., 2024

Основными способами увеличения площади межфазной поверхности газ — жидкость являются распыление жидкости на очень мелкие капли [4] и создание возмущений поверхности газовых пузырьков вплоть до дробления последних [3].

Процесс распыления жидкости для интенсификации массообменных процессов имеет недостаток, который заключается в малой объемной доле жидкости в газодисперсной системе. Как следствие, в ходе абсорбционного процесса ограничена масса поглощаемого газа, поскольку жидкость имеет предел растворимости [5]. Поэтому далее рассматривают-ся барботажный процесс и способ увеличения площади межфазной поверхности, который заключается в развитии возмущений на поверхности газовых пузырьков вплоть до дробления последних [5, 6]. Основным способом увеличения площади межфазной поверхности в барботажном процессе является периодическое силовое воздействие с частотой, во много раз превышающей частоту генерации и пульсаций пузырьков.

1. Формирование ультразвуковых колебаний в кавитационном режиме. Один из наиболее эффективных способов реализации периодического силового воздействия — формирование ультразвуковых колебаний в кавитационном режиме [6]. В этом случае увеличение площади межфазной поверхности происходит в результате следующих процессов.

1. Формирование периодических капиллярных волн [7] на межфазной границе жидкость — газ, которая является поверхностью барботажных пузырьков, под действием ударных волн, образующихся при схлопывании кавитационных пузырьков (длина капиллярных волн меньше радиуса барботажных пузырьков). Для участка сферической поверхности, задаваемой параметрически:

$$\mathbf{r}(\theta, \beta) = R_0 \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \beta \\ \sin \theta \sin \beta \\ \cos \theta \end{pmatrix},$$

при образовании капиллярных волн радиус и площадь межфазной поверхности увеличиваются на следующую величину:

$$\Delta \mathbf{r}(\theta, \beta) = R(\theta, \beta) \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \beta \\ \sin \theta \sin \beta \\ \cos \theta \end{pmatrix},$$

$$\begin{aligned} \Delta S &= \Delta \left(\iint_A \sqrt{\left\| \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \theta} \right\|^2 \left\| \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \beta} \right\|^2 - \left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \theta}, \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \beta} \right)^2} d\beta d\theta \right) = \\ &= \iint_A \left\{ R^2 \sqrt{\sin^2 \theta + \frac{1}{R^2} \left[\left(\frac{\partial R}{\partial \beta} \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \theta} \right)^2 \sin^2 \theta \right]} - R_0^2 \sin \theta \right\} d\beta d\theta. \end{aligned}$$

При наличии на поверхности газового пузырька синусоидальных волн

$$R(\theta, \beta) = R_0 + R_A \sin(\theta/\theta_\lambda)$$

(рассматривается лишь одно направление распространения волны вдоль поверхности; декартова система координат выбирается таким образом, чтобы зависимость R от β отсутствовала) относительное увеличение площади межфазной поверхности равно

$$\begin{aligned} \frac{S_0 + \Delta S}{S_0} &= \iint_S \left[\left(R_0 + R_A \sin \left(\frac{\theta}{\theta_\lambda} \right) \right)^2 \sqrt{\sin^2 \theta + \frac{((R_A/\theta_\lambda) \cos(\theta/\theta_\lambda))^2 \sin^2 \theta}{(R_0 + R_A \sin(\theta/\theta_\lambda))^2}} \right] d\beta d\theta / \\ &\quad / \iint_S R_0^2 \sin \theta d\varphi d\theta \end{aligned}$$

при условиях, которые должны выполняться на данном участке поверхности:

$$R_A \ll R, \quad \theta_\lambda \ll 2\pi, \quad \frac{R_A}{R_0 \theta_\lambda} > 4.$$

Здесь R_0 — начальный радиус сферической поверхности, м; R_A — амплитуда волнообразных возмущений поверхности пузырька, м; $2\pi R_A \theta_\lambda$ — длина волны возмущений поверхности пузырька, м; S — область интегрирования, характеризующая поверхность сферы и представляющая собой декартово произведение отрезков $[0; 2\pi] \times [0; \pi]$ ($\beta \in [0; 2\pi]$; $\theta \in [0; \pi]$). Если капиллярные волны занимают половину площади участка поверхности пузырька, то происходит относительное увеличение площади межфазной поверхности не менее чем в 1,5 раза.

2. Отрыв мелких пузырьков от поверхности исходных барботажных пузырьков, формирующихся вблизи выходного сечения аэрационного канала, за счет распада капиллярных волн. Образование и отрыв мелких пузырьков приводят к увеличению удельной площади межфазной поверхности (совокупной площади межфазной поверхности, отнесенной к единице объема газа). Это обусловлено тем, что удельная площадь межфазной поверхности обратно пропорциональна среднему объемно-поверхностному диаметру пузырьков d_{32} :

$$s = 6 \sum_{i=1}^N d_i^2 \Big/ \sum_{i=1}^N d_i^3 = \frac{6}{d_{32}}.$$

При этом формирование капиллярных волн под действием ультразвуковых колебаний на поверхности тонкой пленки жидкости не рассматривается в качестве еще одного способа увеличения площади межфазной поверхности, вследствие того что при воздействии на тонкую пленку большая часть акустической энергии остается в материале излучателя или переходит в газовую фазу, поскольку толщина пленки значительно меньше длины ультразвуковой волны и волновое сопротивление газовой фазы мало по сравнению с волновым сопротивлением материала излучателя.

Несмотря на то что данные, свидетельствующие об эффективности ультразвукового воздействия, впервые были получены в 1956 г., в настоящее время отсутствуют результаты исследования физических механизмов указанного процесса. Имеются лишь теоретические предположения о формировании волн на поверхности раздела жидкость — газ [8–11], созданы математические модели, позволяющие определить параметры таких волн в частном случае плоской поверхности раздела [7, 10–12], однако экспериментальные исследования формы волн и изменения структуры межфазной поверхности при аэрации в объеме жидкости и одновременном воздействии ультразвуковых колебаний до сих пор не проводились.

Известны результаты наблюдений схлопывающихся кавитационных пузырьков и измерений параметров ударных волн в объеме жидкости [13–15], которые проводились с использованием лазерных вспышек длительностью не более 10 нс, формирующих зондирующее излучение, и шлирен-метода при частоте кадров, не превышающей 70 000 кадр/с (четыре кадра на один период ультразвуковых колебаний). Однако полученные результаты исследований не позволяют сделать вывод об эффективности ультразвукового воздействия в барботажном процессе, поскольку:

- исследования проводились без принудительной аэрации (изучались только возникающие кавитационные пузырьки);
- исследования проводились с малой частотой кадров (четыре кадра за один период колебаний), что не позволяет отследить изменение площади межфазной поверхности в течение даже 1/4 периода колебаний (при переходе от нулевого значения звукового давления до его минимума или максимума);

— отсутствует фокусировка на поверхностях исследуемых газовых пузырьков (толщина зоны градиента — зоны перехода от максимальной яркости света, соответствующей сплошной жидкой фазе, к максимальной яркости, соответствующей дисперсной газовой фазе, составляет более 0,2 радиуса пузырька), что не позволяет достоверно определить протяженность межфазной границы.

Таким образом, актуально проведение экспериментальных исследований, позволяющих определить структуру, форму и размеры межфазной поверхности жидкости при аэрации и одновременном наложении ультразвуковых колебаний.

2. Стенд для проведения экспериментальных исследований. Для проведения экспериментальных исследований был разработан специальный стенд (рис. 1), обеспечивающий формирование области аэрации с развитой кавитацией (периодическим схлопыванием кавитационных пузырьков) в зоне фокуса камеры скоростной киносъемки.

Основным элементом стендад является ультразвуковая колебательная система (УЗКС), позволяющая создавать в жидкости акустические колебания высокой интенсивности (диаметр излучающей поверхности 42 мм), достаточной для образования схлопывающихся кавитационных пузырьков. Корпус стендада состоит из двух частей. В нижней части корпуса располагается основание, в пазы которого установлен нижний резервуар с размещенным в нем концентратором ультразвуковых колебаний. Концентратор является трансформатором и преобразует небольшую (не более 5 мкм) амплитуду колебаний пьезоэлемента, недостаточную для развития кавитации, в амплитуду колебаний (15 мкм и более), при которой в жидкости формируются схлопывающиеся пузырьки. Верхний резервуар имеет уменьшенный поперечный размер, что обеспечивает формирование области кавитации с одновременной аэрацией в зоне фокуса камеры скоростной киносъемки. Верхняя часть отделена от нижней перегородкой, за счет чего увеличивается прочность конструкции. До начала каждого эксперимента верхний и нижний резервуары заполняются жидкостью. Аэрация осуществляется с помощью имеющегося в аэрационной насадке канала диамет-

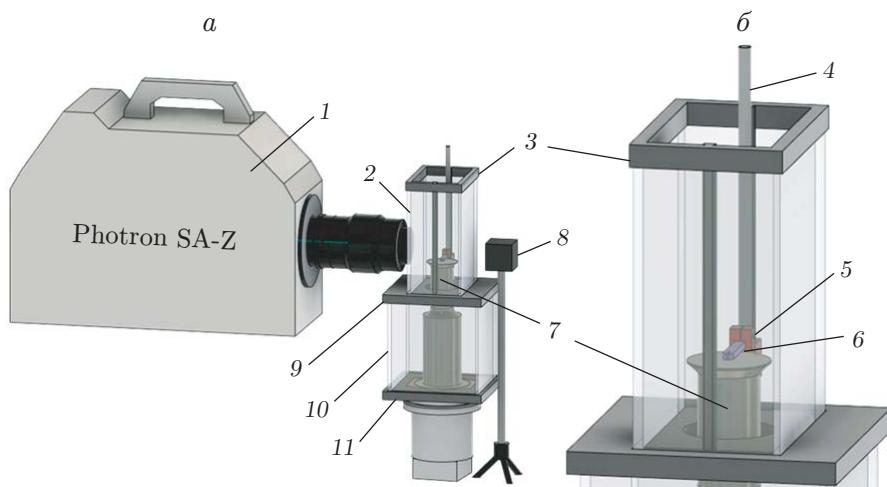


Рис. 1. 3D-модель стендада для исследования ультразвукового воздействия с одновременной аэрацией:

а — общий вид установки, *б* — верхний резервуар в увеличенном масштабе; 1 — камера Photron FASTCAM SA-Z, 2 — верхний резервуар, 3 — рама с направляющими для гидрофона и аэратора, 4 — трубка подачи воздуха, 5 — крепление для аэратора, 6 — аэратор, 7 — ультразвуковая колебательная система, 8 — источник постоянного и равномерного освещения, 9 — основание, 10 — нижний резервуар, 11 — перегородка



Рис. 2. Ультразвуковой технологический аппарат “Волна-М”

ром 1,5 мм, который при проведении эксперимента располагается в непосредственной близости от излучающей поверхности. При этом канал находится в центре излучающей поверхности, т. е. ось симметрии канала совпадает с осью симметрии УЗКС.

Питание УЗКС обеспечивается с помощью электронного генератора ультразвуковых колебаний, входящего в состав аппарата серии “Волна-М”, производимого ООО “Центр ультразвуковых технологий Алтайского государственного технического университета” (рис. 2). Ультразвуковой аппарат обеспечивает непрерывную работу УЗКС в резонансном режиме. При этом происходит непрерывная подстройка частоты с учетом изменения акустических характеристик среды за счет развития кавитации и изменения температуры.

Измерение акустических характеристик осуществляется на основе измерения комплексного сопротивления первичного пьезопреобразователя электрических колебаний в механические. Для разработки алгоритма измерения комплексное сопротивление представлялось в виде эквивалентной электрической схемы, включающей две параллельно соединенные ветви [16]: емкость диэлектрических потерь пьезоэлемента и комплексное сопротивление УЗКС и среды, подвергаемой акустическому воздействию. Действительная часть сопротивления определяется внутренними потерями в УЗКС и потерями энергии в среде в процессе кавитации. Мнимая часть обусловлена инерцией излучателя и среды, а также объемной упругостью излучателя среды.

Для определения акустических характеристик среды сначала проводилось измерение комплексного сопротивления пьезопреобразователя при работе УЗКС на воздухе, затем регистрировались значения составляющей комплексного сопротивления, обусловленной наличием среды, подвергаемой акустическому воздействию.

Ультразвуковой технологический аппарат “Волна-М” имеет следующие характеристики: потребляемая полная мощность — не более 1000 Вт, частота ультразвуковых колебаний — $(22,00 \pm 1,65)$ кГц, интенсивность ультразвуковых колебаний — не менее 10 Вт/см², диаметр излучающей поверхности — 42 мм.

Формирование поверхностных волн, возникающих на поверхности барботажных пузырьков, регистрировалось с помощью скоростной съемки. При этом частота кадров 210 000 кадр/с во много раз превышала частоту ультразвуковых колебаний 22 кГц, размер изображения превышал размер барботажного пузырька, а размер пикселя изображения был много меньше длины формирующейся капиллярной волны. Для регистрации структуры, формы и размеров межфазной поверхности использовались камера скоростной киносъемки Photron FASTCAM SA-Z и макрообъектив с максимальным увеличением в 5 раз. Изображения с камеры охватывают область высотой 18 мм и шириной 7,5 мм на расстоянии от излучающей поверхности, равном 3 мм (что соответствует толщине

аэратора 3 мм), в ее центральном сечении. Такой выбор области обеспечивает визуализацию воздушного пузырька и кавитационных пузырьков для всего диапазона мощности излучателя.

Скоростная киносъемка проводилась при следующих значениях параметров: разрешение — 380×160 пиксель, масштаб — 47 мкм/пиксель, частота кадров — 210 кадр/с.

При ультразвуковом воздействии использовалась увеличенная частота кадров, что обеспечивает за один период ультразвуковых колебаний не менее 10 кадров. Это позволяет отследить динамику изменения площади межфазной поверхности в течение $1/4$ периода. При этом, поскольку частота кадров не является кратной частоте ультразвуковых колебаний, количество различных фаз колебаний, в которые происходит съемка, существенно больше 10 за все время регистрации кадров (при ультразвуковом воздействии регистрировалось более 209 000 кадров в течение одного эксперимента). Фазы ультразвуковых колебаний, в которые происходит съемка каждого кадра, регистрировались с помощью системы сбора данных National Instruments (NI PXIe-6376), обеспечивающей максимальную частоту регистрации до 3,5 МГц, и специально разработанного в LabView программного обеспечения для обработки данных.

3. Методика проведения экспериментов. При проведении экспериментов сначала выполнялась фокусировка камеры скоростной киносъемки на поверхности барботажных пузырьков вблизи центрального канала насадки. Фокусировка осуществлялась с помощью трехкоординатного механизма перемещения камеры, обеспечивающего точность позиционирования до 0,01 мм. Результаты скоростной киносъемки процесса аэрации жидкости без ультразвукового воздействия представлены на рис. 3. Интервал времени между соседними изображениями, приведенными на рис. 3, соответствует 500 кадрам или $1/420$ с.

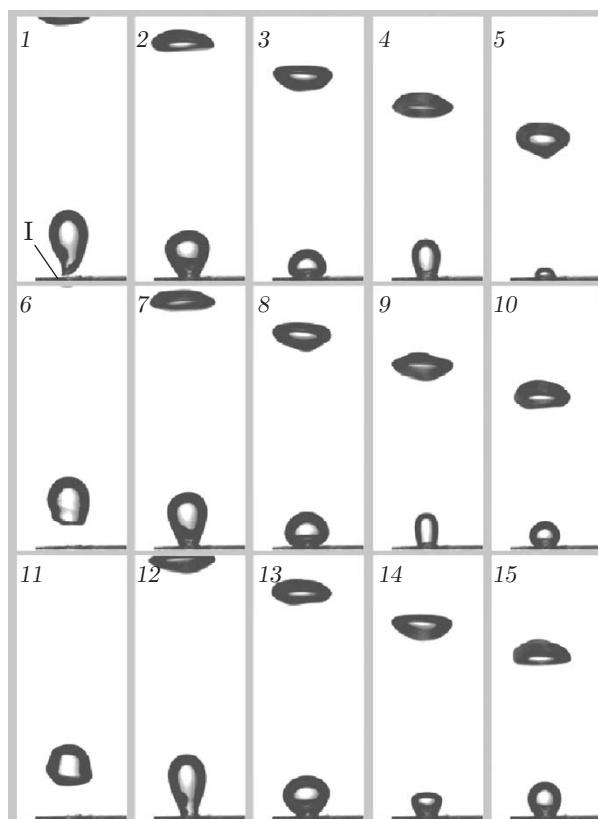


Рис. 3. Кадры (1–15) скоростной киносъемки процесса аэрации жидкости без ультразвукового воздействия (I — отверстие канала аэрационной насадки)

Далее проводились регистрация кадров и дальнейшая обработка полученных изображений согласно приведенному ниже алгоритму.

Исходными данными алгоритма являются:

- 1) ширина изображения W в пикселях и высота изображения H в пикселях;
- 2) количество кадров N ;
- 3) дискретная функция $B(k, i, j)$, представляющая собой отображение $B: ([0; N - 1] \cap \mathbb{Z}) \times ([0; W - 1] \cap \mathbb{Z}) \times ([0; H - 1] \cap \mathbb{Z}) \rightarrow \{0, 1\}$, где $k = \overline{0, N - 1}$ — номер кадра; i, j — координаты пикселя изображения по горизонтали и вертикали соответственно; \mathbb{Z} — множество целых чисел.

Значение функции B , равное нулю, соответствует светлым областям на рис. 3, $B = 1$ — затемненным областям вследствие рассеяния света на стенках кавитационных пузырьков.

Результатом выполнения алгоритма является вычисленная удельная площадь межфазной поверхности, рассчитываемая как отношение протяженности контура к площади, занятой пузырьками, в плоскости разреза, соответствующей фокальной плоскости объектива камеры. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 4, 5 (L — протяженность контуров, суммируемая по всем кадрам, S — площадь области, занятой изображением пузырьков, суммируемая по всем кадрам).

В ходе работы алгоритма сначала проводится выделение области, не занятой газовыми пузырьками, поскольку в случае крупных пузырьков светлые области могут соответствовать как сплошной жидкой фазе, так и газовой (через центр пузырька свет проходит, слабо рассеиваясь). Для этого в области выбирается точка, заведомо не принадлежащая пузырькам. Затем с помощью алгоритма рекурсивной заливки [17] отмечались все остальные точки (значения элементов массива $B[k, i, j]$ устанавливались равными двум), не принадлежащие пузырькам. Выбор рекурсивного алгоритма для заливки обусловлен тем, что область, соответствующая жидкой фазе, является односвязной.

Указанное предположение связано с тем, что регистрация пузырьков осуществляется в фокальной плоскости камеры. Согласно предварительным результатам съемки изображения пузырьков в параллельных плоскостях, находящихся на расстоянии, большем размера пузырька, относительно фокальной плоскости, имеют яркость, которая отличается от яркости фона на величину, не превышающую порога бинаризации. Это означает, что изображения пузырьков в указанных параллельных плоскостях отсутствуют на бинаризованных изображениях.

Далее отмечались все точки на границе жидкой и газовой фаз. Выбор граничных точек осуществлялся согласно условию “плавности”, чтобы среди четырех соседних точек, построенных при изменении одной из координат на $+1$ или -1 (другая координата при этом не меняется, т. е. рассматриваются изменения в четырех направлениях, коллинеарных направлениям одной из осей координат), присутствовали точки, находящиеся как на стороне газовой фазы, так и на внутренней стороне жидкой фазы, которая не включает стенку. В этом случае исключаются прямые углы, вершины которых обращены в сторону газовой фазы. Наличие таких углов приводит к появлению искусственных пилообразных возмущений на растеризованном контуре — границе сред жидкость — газ, что увеличивает погрешность расчета площади межфазной поверхности.

Множество граничных точек, сформированное в ходе работы алгоритма, представлено на рис. 6.

После выявления граничных точек проводился поиск линейных односвязных участков контуров с использованием “жадного” алгоритма, который состоит в том, что на каждой итерации цикла выбирается произвольная граничная точка, не входящая ни в один из найденных односвязных участков контуров, затем, начиная с данной точки, строит-



Рис. 4. Блок-схема алгоритма определения удельной площади межфазной поверхности (поиск граничных точек на серии изображений)

ся максимальная по протяженности последовательность соседних точек. В случае если указанная граничная точка не найдена, цикл завершается. При этом последовательность строится от выбранной точки в двух противоположных направлениях. Построенная последовательность является новым линейным односвязным участком контура.

Далее определяется протяженность межфазной границы как сумма протяженностей каждого из односвязных участков контура. В свою очередь, протяженность каждого односвязного участка определяется как сумма евклидовых расстояний между парами соседних точек.

Поскольку в экспериментах аэрация осуществляется в центре излучателя, форма барботажного пузырька оказывается близкой к осесимметричной (относительно оси симмет-

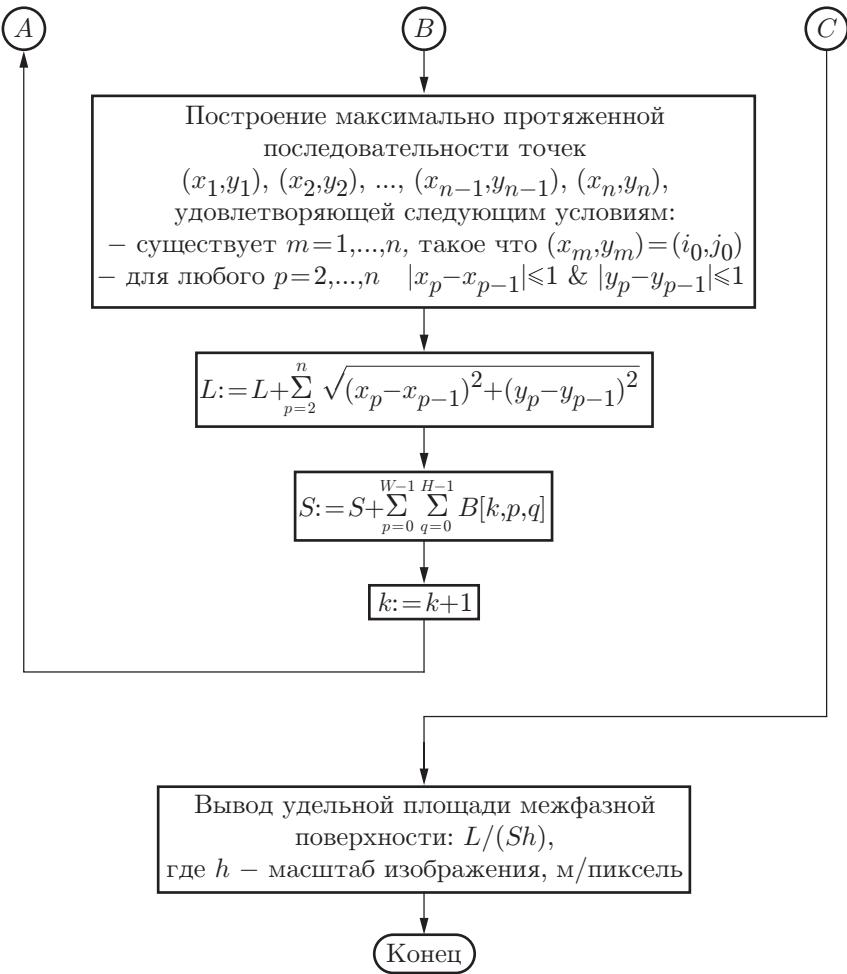


Рис. 5. Блок-схема алгоритма определения удельной площади межфазной поверхности (расчет протяженности контуров и удельной площади межфазной поверхности)

рии излучателя) [18, 19]. При этом формирующееся кавитационно-акустическое поле также является осесимметричным. Это означает, что размер пузырька и проекция межфазной поверхности на плоскость, расположенную вдоль линии зрения, имеют те же характеристики, что и в плоскости, перпендикулярной линии зрения (плоскости полученного изображения). Указанный факт свидетельствует о возможности обобщения полученных результатов на трехмерный случай.

Тестовые расчеты по определению протяженности растеризованного контура проводились для дуги окружности, имеющей длину $\pi R/2$. Полученная в результате расчетов зависимость отношения длины растеризованного контура к длине нерастеризованной дуги от количества пикселей, приходящихся на радиус дуги, представлена на рис. 7.

Из рис. 7 следует, что при определении протяженности контура относительная погрешность растеризации не превышает 6 %.

4. Результаты экспериментов. Эксперименты проводились на примере аэрации дистиллированной воды воздухом. Давление окружающей среды равно атмосферному. Температура воды поддерживалась в диапазоне 21,0 \div 23,6 $^{\circ}$ С. Эксперименты проводились при мощности ультразвукового аппарата от 40 % (соответствует нижней границе образования кавитации) до 100 % (соответствует режиму вырожденной кавитации) от

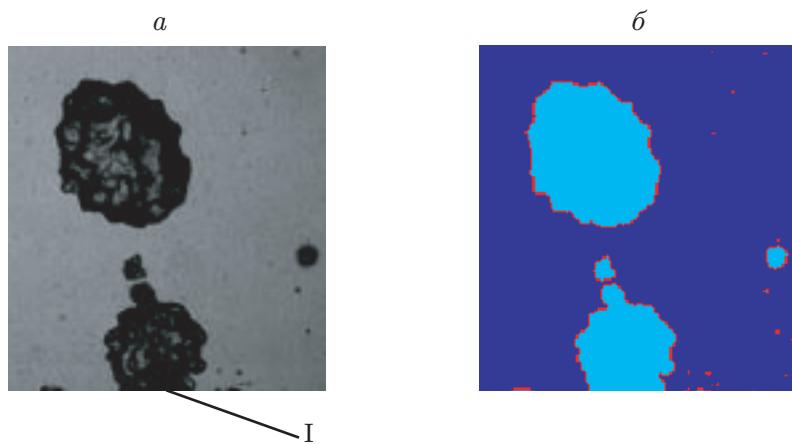


Рис. 6. Бинаризация изображения системы жидкость — газ с помощью предлагаемого алгоритма при интенсивности $I = 4 \text{ Вт/см}^2$:
 a — исходное изображение, b — бинаризованное изображение; I — отверстие канала аэрационной насадки

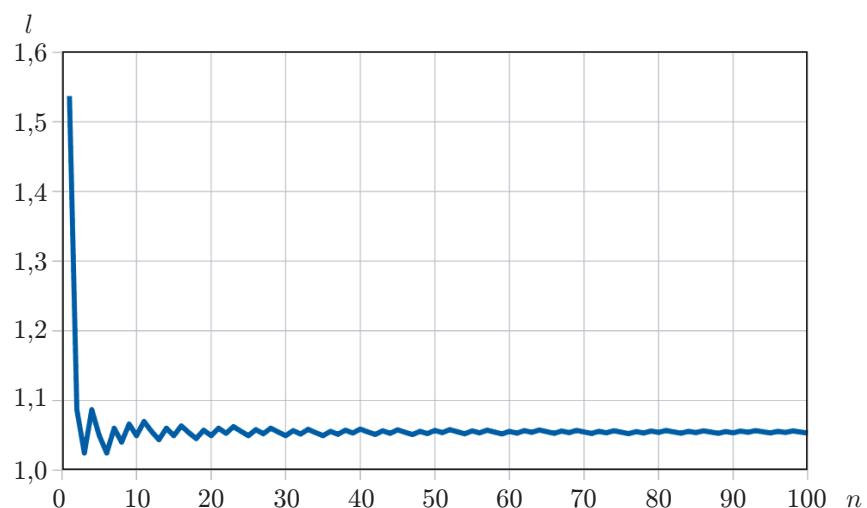


Рис. 7. Зависимость относительной протяженности растеризованного контура l от количества пикселей n , приходящихся на радиус

максимальной (в абсолютных значениях это соответствует интенсивности излучаемых колебаний от 2 до 5 Вт/см^2).

До начала каждого эксперимента проводился контрольный эксперимент по определению относительной удельной площади межфазной поверхности для контроля постоянства потока газа. Расчеты с помощью разработанного алгоритма показали (см. рис. 4, 5), что удельная площадь межфазной поверхности одинакова при всех исследуемых значениях интенсивности (с дисперсией менее 3 %) и, следовательно, расход газа во всех случаях идентичен. Поэтому далее проводились эксперименты при различных значениях интенсивности ультразвукового воздействия, соответствующих развитой кавитации [20–23].

На рис. 8 представлена зависимость относительной удельной площади межфазной поверхности (отношение площади межфазной поверхности при ультразвуковом воздействии к площади межфазной поверхности в отсутствие ультразвукового воздействия) от количества бинаризованных кадров при различных значениях интенсивности ультразвукового воздействия. Удельная площадь межфазной поверхности без ультразвукового воздействия

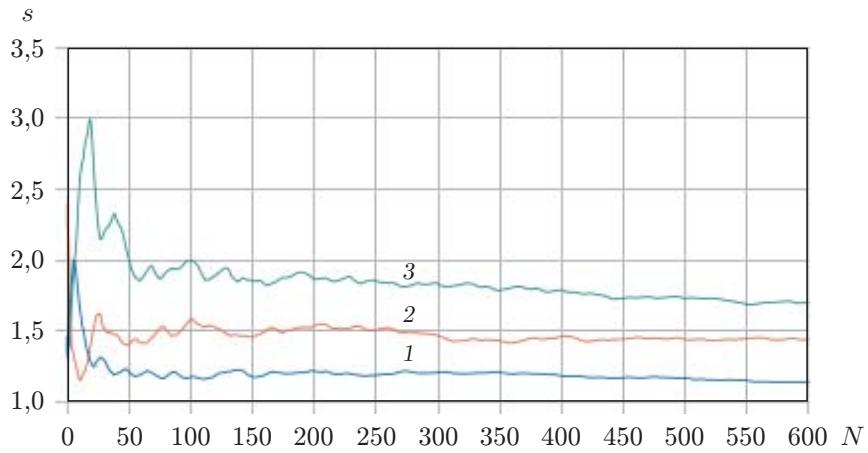


Рис. 8. Зависимость относительной удельной площади межфазной поверхности s от количества бинаризованных кадров N при различной интенсивности ультразвукового воздействия I :

1 — $I = 3 \text{ Вт/см}^2$, 2 — $I = 4 \text{ Вт/см}^2$, 3 — $I = 5 \text{ Вт/см}^2$

рассчитывается по формуле

$$s = L_{tot}/(S_{tot}h),$$

где L_{tot} — сумма длин межфазных границ во всех экспериментах без ультразвукового воздействия, пиксель; S_{tot} — сумма площадей областей изображений, занятых газовой фазой, во всех экспериментах без ультразвукового воздействия, пиксель²; h — масштаб изображения, м/пиксель. При построении зависимости, приведенной на рис. 8, учитывалось общее количество бинаризованных кадров для каждого эксперимента (для случаев ультразвукового воздействия по $205\,000 \div 215\,000$ кадров для каждого из трех экспериментов).

Из представленных на рис. 8 зависимостей следует, что с увеличением количества бинаризованных кадров зависимость удельной площади межфазной поверхности выходит на плато с небольшими локальными осцилляциями. Плато достигается после бинаризации более 450 000 кадров, что соответствует интервалу времени 2,15 с, который превышает интервал времени между актами формирования и всплытия барботажных пузырьков. При этом амплитуда осцилляций на достигнутом плато не превышает $\pm 2\%$ среднего значения.

На рис. 9 приведена зависимость удельной площади межфазной поверхности от интенсивности ультразвукового воздействия.

Относительная погрешность определения площади межфазной поверхности находится в диапазоне $-5 \div 11\%$ и обусловлена отклонением расхода газа от среднего значения $\pm 3\%$; погрешностью определения протяженности контура, обусловленной растеризацией, в диапазоне $0 \div 6\%$ (см. рис. 7) и осцилляциями осредненной площади межфазной поверхности при увеличении количества бинаризованных кадров (не более $\pm 2\%$ (см. рис. 8)).

Из зависимости, представленной на рис. 9, следует, что ультразвуковое воздействие может приводить к увеличению площади межфазной поверхности более чем в 1,5 раза, что свидетельствует о его эффективности.

Указанный результат достигнут при ультразвуковом воздействии на объем жидкости, в случае когда более 60 % энергии ультразвуковых колебаний переходит в кавитацию, поскольку волновое сопротивление жидкости сопоставимо с волновым сопротивлением материала излучателя. Оценка введенной доли энергии проводилась с использованием результатов измерения электрической мощности, потребляемой ультразвуковым излучателем,

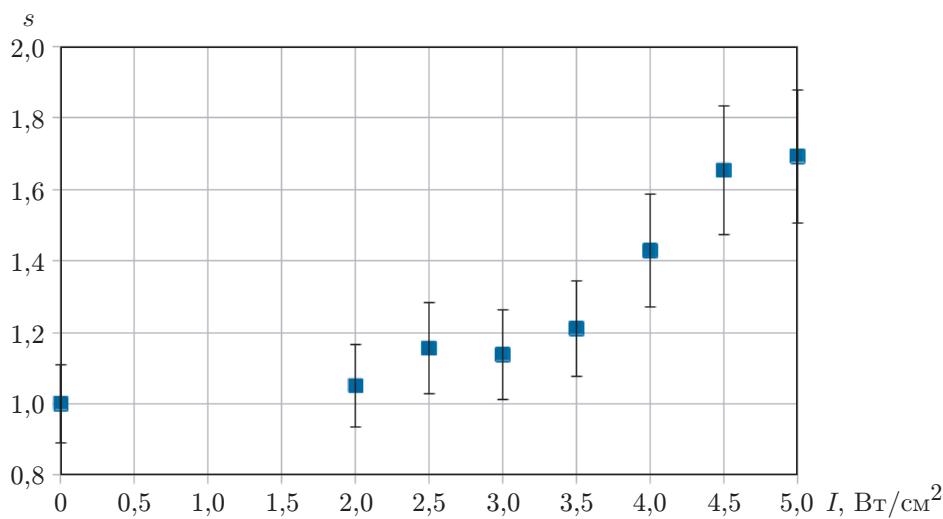


Рис. 9. Экспериментальная зависимость удельной площади межфазной поверхности от интенсивности ультразвукового воздействия

и результатов измерения акустической мощности, подведенной к жидкости, с помощью калориметрического метода.

В работе [12], посвященной исследованию увеличения площади межфазной поверхности под действием ультразвука, рассматривался случай тонкой пленки, использование которой неэффективно на стадии преобразования энергии колебаний излучателя в кавитацию в жидкости. Так как размер пленки много меньше длины ультразвуковой волны, то в кавитацию в жидкости переходит менее 10 % введенной энергии ультразвукового излучения.

На рис. 10 представлена серия кадров, на которых заметно изменение площади межфазной поверхности под действием ультразвуковых колебаний с интенсивностью 5 Вт/см². Данная серия отражает осредненные изменения формы и положения газовых пузырьков (интервал между изображениями — 10 кадров).

На рис. 11 приведена зависимость удельной площади межфазной поверхности от времени. Видны осцилляции поверхности в течение одного периода ультразвуковых колебаний. Период локальных осцилляций составляет 38 \div 60 мкс, что по порядку величины соответствует периоду ультразвуковых колебаний 43 \div 46 мкс. Приведенная на рис. 11 зависимость свидетельствует о том, что при значениях интенсивности ультразвукового воздействия, близких к значению интенсивности, при котором происходит зарождение кавитации ($2 \div 3$ Вт/см²), удельная площадь межфазной поверхности увеличивается не более чем в 1,3 раза. При интенсивности $I \geq 3,5$ Вт/см² происходит резкий рост, а при $I \approx 5$ Вт/см² — уменьшение зависимости $s(N)$ (см. рис. 8). Указанная особенность обусловлена наличием как минимум двух физических механизмов формирования возмущений на поверхности газ — жидкость [22]:

- формирование ударных волн при схлопывании кавитационных пузырьков вблизи барботажных пузырьков;

- формирование течений Шлихтинга и Эккарта вблизи поверхности кавитационных пузырьков и аэрационного канала [23].

При интенсивности ультразвуковых колебаний, превышающей критическое значение, при котором возникает кавитация, и не превышающей значения, при котором кавитация не является вырожденной, энергия ударных волн оказывается пропорциональной разности текущего значения интенсивности и ее критического значения.

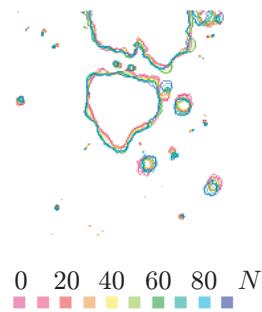


Рис. 10. Серия контуров изображений, представляющая поверхностные возмущения на границе жидкость — газ в течение одного периода колебаний, при $I = 5 \text{ Вт/см}^2$ (интервал между изображениями — 10 кадров ($t = 1/21\,000 \text{ с}$))

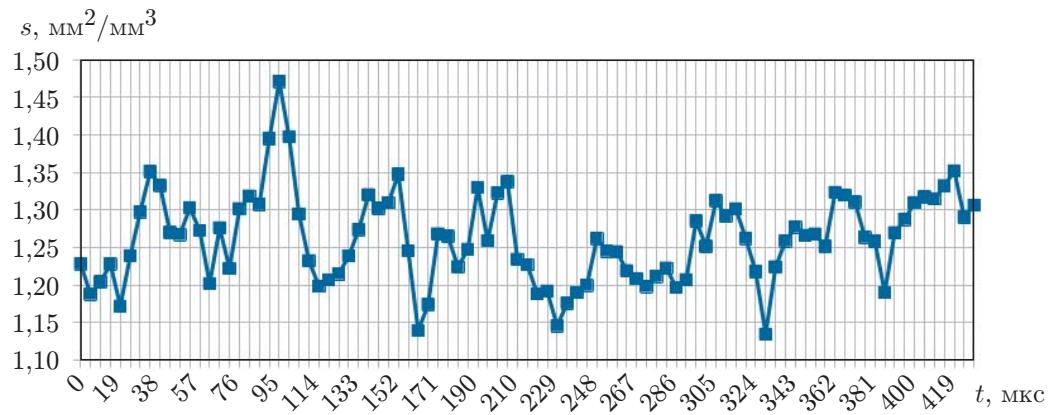


Рис. 11. Зависимость удельной площади межфазной поверхности от времени при $I = 5 \text{ Вт/см}^2$

Амплитуды течений Шлихтинга и Эккарта (или акустических течений) пропорциональны не только интенсивности ультразвуковых колебаний (квадрату амплитуды колебательной скорости), но и коэффициенту поглощения ультразвуковых колебаний [23], который в кавитационном режиме определяется, главным образом, энергией, затрачиваемой на схлопывание пузырьков, а не вязкостью жидкости [24, 25]. Акустические течения вызваны дрейфом сплошной жидкой фазы при поглощении колебаний. Процесс формирования акустических течений заключается в следующем:

- элемент объема сплошной жидкой фазы переходит из зоны с координатой \mathbf{r} в зону с координатой $\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}_+$ за время положительного полупериода колебаний;
- в зоне с координатой $\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}_+$ вследствие поглощения амплитуда колебательной скорости $U_A(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}_+) < U_A(\mathbf{r})$;
- в течение отрицательного полупериода колебаний объем сплошной жидкой фазы возвращается на расстояние $\Delta\mathbf{r}_-$ ($|\Delta\mathbf{r}_-| < |\Delta\mathbf{r}_+|$), поскольку $U_A(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}_+) < U_A(\mathbf{r})$;
- происходит одностороннее смещение объема сплошной жидкой фазы $\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}_+ - \Delta\mathbf{r}_-$ (отсюда следует пропорциональность не только интенсивности колебаний, но и коэффициенту поглощения).

Скорость акустических течений u_{flow} пропорциональна $\rho k_* U_A^2$ (ρ — плотность сплошной жидкой фазы, кг/м^3 ; k_* — коэффициент поглощения акустических колебаний, м^{-1} ; U_A — амплитуда колебательной скорости, м/с). При этом в силу закона сохранения массы и ограниченности объема акустические течения имеют вихревой характер [23].

Поскольку скорость акустических течений пропорциональна не только интенсивности колебаний (квадрату амплитуды колебательной скорости), но и коэффициенту поглощения [23], характер полученной зависимости объясняется влиянием следующих факторов:

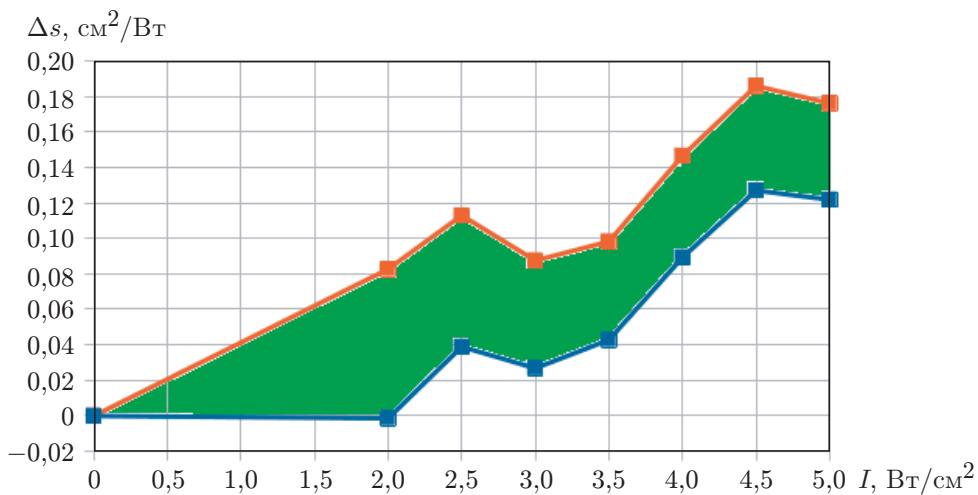


Рис. 12. Зависимость прироста удельной площади межфазной поверхности на единицу интенсивности от интенсивности ультразвукового воздействия (заштрихованная область — область погрешности измерений)

1. При интенсивности колебаний, близкой к пороговой, необходимой для возникновения кавитации ($2 \div 3$ Вт/см²), удельная площадь межфазной поверхности увеличивается медленно (влияет, главным образом, один фактор — ударные волны образующихся при схлопывании кавитационных пузырьков, которые затухают с амплитудой, обратно пропорциональной расстоянию до центра масс пузырька).

2. При дальнейшем увеличении интенсивности возрастает коэффициент поглощения колебаний α [26], что обусловлено затратами энергии акустических колебаний на образование ударных волн. Одна часть энергии расходуется на нагрев жидкости, а другая часть — на увеличение площади межфазной поверхности. При этом увеличение коэффициента вызвано увеличением количества кавитационных пузырьков за счет их размножения, вызванного дроблением при схлопывании [23]. Следовательно, добавляется влияние другого фактора — наличия течения Шлихтинга вблизи межфазной поверхности. Это обуславливает более быстрый рост удельной площади с увеличением интенсивности колебаний.

3. При интенсивности воздействия, близкой к 5 Вт/см², увеличение удельной площади межфазной поверхности замедляется. Это может быть обусловлено уменьшением коэффициента поглощения колебаний вследствие коалесценции кавитационных пузырьков.

Таким образом, при теоретическом описании процесса увеличения площади межфазной поверхности под действием ультразвука необходимо учитывать ряд факторов.

На рис. 12 представлена зависимость относительного прироста площади межфазной поверхности Δs от интенсивности колебаний. Из рис. 12 следует, что интенсивность воздействия, близкая к $4,5 \div 5,0$ Вт/см², обеспечивает максимальный КПД ультразвукового излучения, т. е. расход максимальной доли энергии колебаний на увеличение площади межфазной поверхности.

Заключение. Разработан стенд для проведения экспериментальных исследований структуры и размеров межфазной поверхности газ — жидкость при ультразвуковом воздействии и принудительной аэрации. Стенд позволяет отслеживать изменение формы и размеров межфазной поверхности в течение одного периода ультразвуковых колебаний. С использованием предложенного алгоритма обработки результатов экспериментальных исследований определено изменение площади межфазной поверхности при различных значениях интенсивности ультразвуковых колебаний в случае введения ультразвука в объ-

ем жидкости. При использовании данного способа введения ультразвука доля энергии, расходуемой на генерацию кавитационных пузырьков в жидкости, больше энергии ранее рассмотренного воздействия на тонкую пленку.

Установлено, что ультразвуковое воздействие позволяет увеличить площадь межфазной поверхности при аэрации более чем в 1,5 раза в фиксированной плоскости разреза. Показано, что существует оптимальное значение интенсивности $I = (4,5 \pm 0,5)$ Вт/см², обеспечивающее максимальную долю энергии ультразвуковых колебаний, затрачиваемую на увеличение площади межфазной поверхности (КПД ультразвука).

Установлено наличие критического значения интенсивности, начиная с которого проявляется дополнительный механизм влияния кавитации на межфазную поверхность, обусловленный наличием течения Шлихтинга.

Таким образом, при теоретическом описании воздействия кавитации на межфазную поверхность при принудительной аэрации необходимо учитывать ряд факторов.

Полученные результаты подтверждают эффективность способа увеличения скорости массопереноса в системах газ — жидкость со сплошной жидкой фазой путем увеличения площади межфазной поверхности и целесообразность проведения дальнейших экспериментальных исследований в данном направлении с использованием плоского излучателя со встроенными аэрационными каналами. В этом случае кавитация, создаваемая вблизи излучателя, оказывает непосредственное влияние на процессы, происходящие вблизи аэрационного канала.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Новоселов А. Г., Дужий А. Б., Голикова Е. Ю.** Молекулярная диффузия газов в жидкости. 1. Коэффициенты молекулярной диффузии диоксида углерода в воде // Науч. журн. НИУ ИТМО. Сер. Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. № 2.
2. **Подрыга В. О., Вихров Е. В., Поляков С. В.** Молекулярно-динамический расчет коэффициента диффузии газов на примере аргона, азота, водорода, кислорода, метана и углекислого газа. М., 2019. (Препр. / Ин-т прикл. математики им. М. В. Келдыша РАН; № 96). DOI: 10.20948/prepr-2019-96.
3. **Касаткин А. Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Госхимиздат, 1961.
4. **Шадрин Е. Ю., Ануфриев И. С., Шарыпов О. В.** Исследование процесса распыления и сжигания водоугольного топлива с использованием пневматической форсунки // ПМТФ. 2021. Т. 62, № 3. С. 165–171.
5. **Рамм В. М.** Абсорбция газов. 2-е изд., перераб. М.: Химия, 1976.
6. **Семенов И. А., Ульянов Б. А., Свиридов Д. П., Камаев А. С.** Влияние ультразвука на массоотдачу в жидкой фазе при свободном всплытии пузырька газа // Изв. вузов. Прикл. химия и биотехнология. 2013. № 2. С. 57–61.
7. **Khmelev V. N., Shalunov A. V., Golykh R. N., et al.** Determination of the modes and the conditions of ultrasonic spraying providing specified productivity and dispersed characteristics of the aerosol // J. Appl. Fluid Mech. 2017. V. 10, N 5. P. 1409–1419.
8. **Остапенко В. В.** О законах сохранения теории мелкой воды // Докл. АН. 2015. Т. 464, № 5. С. 558–561.
9. **Остапенко В. В.** Модифицированные уравнения теории мелкой воды, допускающие распространение прерывистых волн по сухому руслу // ПМТФ. 2007. Т. 48, № 6. С. 22–43.
10. **Abbasov I. B.** Numerical simulation of nonlinear surface gravity waves transformation under shallow-water conditions // Appl. Math. 2012. V. 3. P. 135–141.

11. **Lannes D., Marche F.** Nonlinear wave-current interactions in shallow water // *Studies Appl. Math.* 2016. V. 136, iss. 4. P. 382–423.
12. **Golykh R. N.** Evaluation of optimum modes and conditions of cavitation and acoustic absorption intensification for increasing // *J. Appl. Fluid Mech.* 2017. V. 10, N 5. P. 1235–1246.
13. **Morton J., Khavari M., Priyadarshi A., et al.** Dual frequency ultrasonic cavitation in various liquids: High-speed imaging and acoustic pressure measurements // *Phys. Fluids.* 2023. V. 35, iss. 1. 017135.
14. **Rabinowitz G., Wilson F., Bjerke G., et al.** Experimental investigation of cylindrical shock wave interactions // *Res. Square.* 2023. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3393606/v1.
15. **Vinoth K. P., Jayaprakash N.** Application of CED and HED techniques for shockwave detection with high-speed schlieren and shadowgraph images // *Res. Square.* 2023. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3392084/v2.
16. **Хмелев В. Н.** Ультразвук. Принципы построения, алгоритмы и системы управления ультразвуковыми аппаратами / В. Н. Хмелев, Р. В. Барсуков, Д. В. Генне, Д. С. Абраменко, А. Р. Барсуков. Барнаул: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2021.
17. **André P.** Intelligent flood fill or: The use of edge detection in image object extraction. Southampton: Univ. of Southampton, 2005.
18. **Насибуллаева Э. Ш., Ахатов И. Ш.** Исследование диффузионной устойчивости пузырьков в кластере // ПМТФ. 2007. Т. 48, № 4. С. 40–48.
19. **Максимов А. О., Половинка Ю. А.** Коалесценция газовых пузырьков в звуковом поле // ПМТФ. 1987. № 2. С. 94–97.
20. **Long Xu, Wang Yao.** Simulation of the ultrasonic cavitation process of the double-bubble // *Acta Phys. Sinica.* 2023. V. 72.
21. **Kim M. J., Song S. H., Kim W. D., Han J.-G.** An experimental study on bubble collapsing effect of nanobubble using ultrasonic wave // *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2020. V. 20. P. 636–642.
22. **Розенберг Л. Д.** Физические основы ультразвуковой технологии. М.: Наука, 1970.
23. **Розенберг Л. Д.** Мощные ультразвуковые поля. М.: Наука, 1968.
24. **Khmelev S. S., Khmelev V. N., Golykh R. N.** Evaluation of optimum modes and conditions of ultrasonic cavitation influence on high-viscous and non-Newtonian liquid mediums // *Roman. J. Acoust. Vibrat.* 2015. N 1. P. 20–28.
25. **Голых Р. Н.** Повышение эффективности ультразвукового кавитационного воздействия на химико-технологические процессы в гетерогенных системах с несущей высоковязкой или неильтоновской жидкостью: Дис. канд. техн. наук. Барнаул, 2014.
26. **Golykh R., Shalunov A., Khmelev V., et al.** Evaluation of optimum modes and conditions providing increasing ultrasonic cavitation area in high-viscous and non-Newtonian fluids // *Roman. J. Acoust. Vibrat.* 2020. N 2. P. 101–108.

Поступила в редакцию 30/XI 2023 г.,

после доработки — 29/II 2024 г.

Принята к публикации 25/III 2024 г.