Водоснабжение и строительные системы охраны водных ресурсов

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-12>
УДК 534-143; 628.339

Н.В. Алан-Рейс, А.А. Еськин, Т.С. Жиликова, П.П. Унру

АЛАН-РЕЙС НИКИТА ВЛАДИМИРОВИЧ – студент, e-mail: alanreys@mail.ru
ЕСЬКИН АНТОН АНДРЕЕВИЧ – старший преподаватель,
SPIN: 8360-6115, ScopusID 56609965900, e-mail: eskin.aa@dvfu.ru
ЖИЛЯКОВА ТАТЬЯНА СЕРГЕЕВНА – студент, e-mail: tanyzh98@mail.ru
Кафедра инженерных систем зданий и сооружений Инженерной школы
УНРУ ПЕТР ПЕТРОВИЧ – старший преподаватель кафедры электроники
и средств связи Инженерной школы, SPIN: 8153-3865, ScopusID: 57192802961,
e-mail: ungrpp@gmail.ru
Дальневосточный федеральный университет
Владивосток, Россия

Влияние ультразвукового излучения на время всплытия микропузырьков воздуха

Аннотация: Представлены результаты экспериментального исследования влияния ультразвукового излучения, генерируемого дисковым пьезокерамическим элементом ЦТС-19, на время всплытия микропузырьков, выделяемых из пересыщенного воздухом водного раствора. Показано, что под действием ультразвука происходит объединение пузырьков в комплексы, что увеличивает скорость их всплытия. Зависимость времени всплытия от частоты излучения носит сложный характер, применение ультразвука с частотой 160 кГц может снизить время всплытия с 39,9 до 13,5 с. Результаты работы могут быть использованы для увеличения производительности установок очистки сточных вод методом напорной флотации.

Ключевые слова: микропузырьки, скорость всплытия, ультразвуковое излучение, акустическая кавитация, газовая эмульсия, напорная флотация.

Введение

Газовые эмульсии микропузырьков воздуха в жидкости находят применение в различных технологических процессах: при очистке сточных вод (прежде всего флотации [2]), в обогащательной промышленности, аквакультуре, медицине и др. На седиментационную устойчивость газовых эмульсий влияет скорость всплытия пузырька, которая зависит главным образом от диаметра пузырька, а также от разности плотностей газа и жидкости, вязкости среды и других параметров. Применительно к очистке сточных вод флотацией уменьшение диаметра пузырьков приводит к увеличению поверхности контакта между фазами, что повышает эффективность извлечения частиц загрязнений, однако при этом уменьшается скорость всплытия, что снижает производительность устройств очистки из-за длительного времени пребывания пузырьков в жидкости.

Одним из направлений интенсификации напорной флотации является применение ультразвукового (УЗ) излучения. Воздействие УЗ на пузырьки газа, присутствующие в жидкости, нашло широкое применение в промышленности для дегазации расплавов металлов и стекла, растворов смол, масел, различных напитков и др. Подробно этот вопрос изложен в

работе [4]. В данной работе большое внимание уделено описанию физических особенностей процесса воздействия УЗ колебаний на одиночный пузырек газа при отсутствии кавитации.

Ультразвуковое излучение находит применение и для повышения скорости растворения газа в жидкости. Так, при всплывании одиночного пузырька углекислого газа в воде под действием УЗ излучения мощностью 1 кВт и частоте 22 кГц коэффициент массоотдачи в жидкой фазе увеличивается в 4 раза [8]. Тот факт, что УЗ излучение применяется одновременно для интенсификации как дегазации жидкости, так и абсорбции газа, свидетельствует о сложности процесса.

В [3, 6] разработана теория колебания и дробления пузырьков газа в акустической волне. Авторами предложен новый резонансный механизм дробления газового пузырька в акустической волне. Показано, что дробление пузырька с резонансным радиусом возможно при относительно небольшой амплитуде давления в возбуждающей волне: порядка нескольких процентов от постоянной части давления.

В [9, 11] показано, что под действием высокочастотного ультразвука микропузырьки ускоренно всплывают. При этом они не сливаются в один крупный пузырек, а сцепляются в комплекс, сравниваемый авторами статьи с гроздью винограда. Явление объяснено тем, что под действием силы Бьеркнеса пузырьки собираются в направлении узла в устойчивой акустической стоячей волне, но из-за одинакового отрицательного электрического заряда они отталкиваются, и коалесценции не происходит (рис. 1).

Рис. 1. Агломерация микропузырьков в узлах ультразвуковой волны.
Здесь и далее рисунки авторов.

В экспериментальном исследовании, описанном в [9], использовался ультразвуковой генератор НМ-303N, Honda Electronics, развивающий частоту излучения 2,4 МГц, с интенсивностью излучения около $2,1 \text{ Вт/см}^2$. Влияние ультразвукового излучения на поведение микропузырьков в воде наблюдалось с помощью макросъемки. Скорость всплывания пузырьков составляла в среднем 0,69 мм/с, но при облучении пузырьков ультразвуком она возрастала до 43 мм/с.

Помимо ускоренного всплывания пузырьков обработка газовой эмульсии ультразвуком может обеспечить снижение диаметра крупных пузырьков. При пневматической флотации размер образующихся пузырьков составляет 1–2 мм: можно предположить, что создаваемая ультразвуком акустическая кавитация будет разрывать крупные пузырьки, а это приведет к снижению их диаметра. Предложенная гипотеза заложена в принцип работы устройства пневматической флотации [5].

Цель данной работы – определить время всплывания микропузырьков газовой эмульсии, получаемой методом выделения воздуха из пересыщенного водного раствора, при воздей-

ствии ультразвукового излучения с частотой до 210 кГц, генерируемого дисковым пьезокерамическим элементом ЦТС-19.

Методика эксперимента

Для проведения экспериментального исследования при участии авторов статьи разработана и введена в эксплуатацию в лабораторном корпусе ДВФУ установка, схема которой представлена на рис. 2.

Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 – компрессор; 2 – насос ХВС; 3 – напорный резервуар; 4 – манометр; 5 – мерный стакан; 6 – пьезокерамический излучатель; 7 – генератор сигналов; 8 – фотокамера.

Наш эксперимент проходил в июне 2019 г. в лабораторном корпусе ДВФУ и осуществлялся следующим образом. Напорный резервуар 3 (мембранный расширительный бак VT.AV.B, Valtec) объемом 12 л заполняли водой, поступающей от насоса системы холодного водоснабжения (ХВС) 2, до избыточного давления 0,1 бар, контролируемого по манометру 4. После этого поршневым компрессором 1 (K29, Бежецкий завод «АСО») в напорный резервуар подавался воздух до достижения давления 2,5 бар. Заполненный напорный бак выдерживался в течение 24 ч, периодически встряхиваясь для лучшего растворения воздуха. Пересыщенная жидкость поступала в мерный стакан 5 объемом 1000 мл, на дне которого размещался излучатель 6 (дисковый пьезокерамический элемент ЦТС-19 диаметром 30 мм и толщиной 13 мм, амплитудно-частотная характеристика – АЧХ которого представлена на рис. 3). Предварительно к излучателю сплавом Вуда были припаяны два провода МГТФ сечением 0,12 мм². В места спая наносился эпоксидный клей ЭДП, после чего весь излучатель покрывался электроизоляционным лаком Urethane Clear 400. Провода излучателя подключали к генератору сигналов 7 (ГЗ-56/1, Великолукский радиозавод), выбранного благодаря его высокому выходному напряжению (не менее 49 В) и равномерной АЧХ (согласно техническому паспорту, неравномерность АЧХ относительно уровня на частоте 1000 Гц не превышает 8% для всего частотного диапазона). Стакан 5 заполнялся пересыщенной водой из резервуара 3, в жидкости выделялись микропузырьки воздуха, время всплытия τ которых фиксировалось с помощью секундомера. Как показывают экспериментальные исследования [1, 10], средний объемно-поверхностный диаметр пузырьков воздуха, выделяющихся из пересыщенной воды с давлением 2,5 бар лежит в диапазоне 80–100 мкм. Скорость всплытия измеряли как в отсутствие УЗ излучения, так и при включенном (сразу после наполнения стакана) генераторе сигналов 7. При этом частота ультразвукового излучения f изменялась в диапазоне от 0 до 210 кГц с шагом в 10 кГц. При каждой частоте проводили три параллельных опыта, после чего рассчитывали среднее значение времени всплытия. Величина напряжения, подаваемого с генератора сигналов 7 на излучатель 6 варьировалась в пределах от 50 до 515 В, а развиваемое акустическое давление – от 0,0334 до 0,7344 атм. Генератор работал в непрерывном режиме излучения. В рамках предварительных экспериментальных исследований, посвященных оценке работы звуковой генерирующей установки без наполнения измерительного стакана микропузырьками, формирования устойчивой стоячей волны зафиксировано не было. Но стоит отметить по-

явление на частотах 30 и 90 кГц нестационарных и нестабильных узлов, в которых концентрировались микропузырьки, образованные за счет кавитации, что можно описать как квазистоячую волну. Ряд опытов фиксировался фото- и видеосъемкой зеркальной камерой Canon EOS 80D.

Зная высоту столба жидкости в мерном стакане ($h=140$ мм), можно получить расчетное значение средней скорости всплытия $v_{\text{ср}}=h/\tau_{\text{ср}}$.

Рис. 3. Нормализованная измеренная амплитудно-частотная характеристика излучателя.

Результаты эксперимента

На рис. 4 представлена серия фотоснимков состояния газовой эмульсии во времени без применения ультразвука. Среднее время всплытия пузырьков составило 39,9 с ($v_{\text{ср}}=3,51$ мм/с).

Рис. 4. Всплытие микропузырьков воздуха при выключенном излучателе. Без применения ультразвука граница всплытия пузырьков размыта, при этом после всплытия основной массы пузырьков продолжается всплытие небольшого количества пузырьков меньшего диаметра.

После включения УЗ излучения в эмульсии появляется четкая граница между жидкой и газовой фазами и наблюдается ускоренное всплытие всех пузырьков. На рис. 5 представлена серия фотоснимков состояния газовой эмульсии во времени при включенном генераторе сигналов на частоте 160 кГц. Среднее время всплытия составило 13,5 с (средняя скорость всплытия – 10,41 мм/с).

Рис. 5. Всплытие микропузырьков воздуха при включенном излучателе.

Обработка результатов эксперимента

На рис. 6 точками нанесены результаты измерения времени всплытия пузырьков, полученные в течение трех параллельных опытов.

Обработка результатов эксперимента проводилась в программе MS Excel с использованием пакета «Анализ данных». Для описания зависимости принят полином 3-й степени, после исключения незначущих факторов получена итоговая зависимость:

$$\tau = 38,44 - 0,0028f^2 + 1,2508 \cdot 10^{-5}f^3, \quad (1)$$

где τ – время всплытия микропузырьков, с;
 f – частота ультразвукового излучения, кГц.

Рис. 6. Зависимость скорости всплытия микропузырьков от частоты ультразвука.

Проведена проверка адекватности полученной математической модели с использованием F-критерия Фишера в соответствии с методикой, изложенной в [7]. Критерий Фишера, рассчитанный для выборок средних значений результатов измерений и значений, полученных по зависимости (1), составил $F=1,13$, при этом табличное значение критерия $F_{таб}=2,12$. Так как табличное значение критерия Фишера больше, чем расчетное, то полученная модель адекватно описывает проведенный эксперимент. Коэффициент детерминации R^2 равен 0,88, что свидетельствует о хорошей аппроксимации моделью экспериментальных данных.

Обобщение результатов эксперимента показывает, что с увеличением частоты ультразвукового излучения от 0 до 160 кГц время всплытия микропузырьков, как правило, плавно уменьшается, достигая максимального значения до 13,5 с, что соответствует скорости всплытия 10,41 мм/с. При увеличении частоты от 160 до 210 кГц зависимость прини-

мает обратный характер. В [9] Kobayashi получил максимальную скорость всплытия пузырьков, равную 43 мм/с при частоте ультразвука 2,4 МГц. Таким образом, можно сделать вывод, что зависимость времени всплытия пузырьков от частоты ультразвукового излучения носит сложный характер. Несмотря на то что в целом наблюдается тенденция уменьшения времени всплытия с увеличением частоты ультразвука, необходимо экспериментально подбирать оптимальную частоту ультразвукового излучения из допустимого диапазона генератора, при которой скорость всплытия будет максимальной. Также необходимо отметить, что полученная зависимость времени всплытия от частоты практически не коррелирует с АЧХ излучателя, что свидетельствует о слабом влиянии развиваемого акустического давления на время всплытия микропузырьков. Также на скорость всплытия не оказало большого влияния формирование квазистоячей волны на частотах 30 и 90 кГц, что было зафиксировано в рамках подготовительных экспериментов.

Заключение

В работе показана возможность применения дискового пьезокерамического элемента ЦТС-19 для ускорения всплытия пузырьков газовоздушной эмульсии, получаемой методом выделения воздуха из пересыщенного водного раствора. Генерация ультразвукового излучения частотой 160 Гц увеличивает скорость всплытия пузырьков практически в 3 раза – с 3,5 мм/с до 10,4 мм/с. При этом визуальное наблюдение за эмульсией позволяет утверждать, что ускоренное всплытие происходит не за счет коалесценции пузырьков, а за счет их сцепления и образования агломератов. Одной из основных причин отсутствия коалесценции является присутствие электростатических сил отталкивания между пузырьками, однако возможны и другие причины (или их комбинации). Среди них можно выделить наличие гидродинамических сил отталкивания пульсирующих пузырьков, возникающих из-за вязкости жидкости, а также трансформацию радиальных мод колебаний в высшие моды поверхностных гармоник, проявляющихся наиболее сильно на ближних дистанциях.

Одним из направлений применения представленной технологии может являться увеличение производительности устройств очистки сточных вод напорной флотацией. В дальнейшем планируется провести экспериментальное исследование эффективности очистки нефтеводяной эмульсии методами пневматической и напорной флотации в присутствии ультразвукового излучения.

Вклад авторов в статью: Н.В. Алан-Рейс – проведение экспериментальных исследований, написание основной части статьи; А.А. Еськин – общее руководство работой, правка текста статьи, написание введения и заключения; Т.С. Жиликова – проведение и обработка экспериментальных исследований; П.П. Унру – разработка принципиальной схемы, изготовление компонентов и монтаж экспериментальной установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев С.Ю., Гришин Б.М., Алексеева Т.В., Ширшин И.Б. Новая технология безреагентной флотационной очистки сточных вод, содержащих нефтепродукты // Региональная архитектура и строительство. 2011. № 1. С. 148–152.
2. Антонова Е.С., Сазонов Д.В. Повышение эффективности очистки воды в пневмогидравлических флотационных установках // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. № 1(77). С. 3–9.
3. Вановский В.В., Петров А.Г. Условие резонансного дробления газового пузырька в акустической волне в жидкости // Доклады Академии наук. 2016. Т. 469, № 2. С. 162–166.
4. Капустина О.А. Дегазация жидкостей // Физика и техника мощного ультразвука. Кн. 3. Физические основы ультразвуковой технологии / под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука, 1970. С. 255–336.
5. Пат. 181416. Российская Федерация. МПК CO2F 1/36. Устройство для очистки жидкости / А.А. Еськин, Н.В. Алан-Рейс, Н.С. Ткач, П.П. Унру; заявитель и патентообладатель Дальневосточный федеральный университет. № 2018116091; заявл. 28.04.2018; опубл. 13.07.2018. Бюл. № 20.

6. Петров А.Г. Механизмы слияния и дробления пульсирующих в жидкости газовых пузырьков // Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2011. Т. 4, № 3. С. 1034–1035.
7. Семёнов Б.А. Инженерный эксперимент в промышленной теплотехнике, теплоэнергетике и теплотехнологиях. СПб.: Лань, 2013. 400 с.
8. Семёнов И.А., Ульянов Б.А., Кулов Н.Н. Влияние ультразвука на растворение углекислого газа в воде // Теоретические основы химической технологии. 2011. Т. 45, № 1. С. 23–27.
9. Daisuke Kobayashi, Yoshiyuki Hayashida, Kazuki Sano, Koichi Terasaka. Effect of surfactant addition on removal of microbubbles using ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2014;54(6):1425–1429. DOI: 10.1016/j.ultras.2014.03.010
10. Edzwald J.K. Dissolved air flotation and me. *Water Research*. 2010;44(7):2077–2106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.12.040>
11. Masayoshi Takahashi. Zeta potential of microbubbles in aqueous solutions: electrical properties of the gas-water interface. *J. of Physical Chemistry B*. 2005;109(46):21858–21864. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/jp0445270>

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2020. N 2/43

Water Supply, Construction Systems for Water

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-12>

Alan-Reise N., Eskin A., Zhilyakova T., Unru P.

NIKITA ALAN-REIS, Student, e-mail: alanreys@mail.ru

ANTON ESKIN, Senior Lecturer, ScopusID 56609965900, e-mail: eskin.aa@dvfu.ru

TATYANA ZHILYAKOVA, Student, e-mail: tanyzh98@mail.ru

Department of Engineering Systems of Buildings and Structures

PETR UNRU, Senior Lecturer, Department of Electronics and Communications,

ScopusID: 57192802961, e-mail: unrupp@gmail.ru

School of Engineering, *Far Eastern Federal University*

Vladivostok, Russia

Effect of ultrasonic radiation on the air bubbles ascent time

Abstract: The paper presents the results of an experimental study of the effect of ultrasonic radiation generated by a piezoelectric ceramic disk on the ascent time of microbubbles released from an aqueous solution saturated with air. It was shown that being irradiated by ultrasound, the bubbles combine into complexes, which increases the rate of their ascent. Dependency of the ascent time on the frequency of ultrasonic radiation is of a complex nature; however, the use of ultrasound with a frequency of 160 kHz can reduce the ascent time from 39.9 to 13.5 s. The results can be used to increase the productivity of wastewater treatment plants by pressure flotation.

Keywords: microbubbles, ascent rate, ultrasonic radiation, acoustic cavitation, gas emulsion, pressure flotation.

REFERENCES

1. Andreev S.Y., Grishin B.M., Aleksejeva T.V., Shirshin I.B. New technology of reagentless floatation treatment of waste water containing oil products. *Regional Architecture and Engineering*. 2011;1:148–152.
2. Antonova E.S., Sazonov V.D. Increasing wastewater treatment efficiency in pneumohydraulic floatators. *Water and Ecology: Problems and Solutions*. 2019;(77):3–9.
3. Vanovskiy V.V., Petrov A.G. Condition of resonant break-up of gas bubbles by an acoustic wave in liquid. *Doklady Physics*. 2016;469(2):162–166.
4. Kapustina O.A. Degassing of liquids. *Physics and technology of powerful ultrasound*, Ed. Rosenberg L.D. III. Physical fundamentals of ultrasound technology. M., Nauka, 1970, p. 255–336.
5. Pat. 181416. Russian Federation. IPC CO2F 1/36. A device for cleaning liquid. A.A. Yeskin, N.V. Alan-Reis, N.S. Weaver, P.P. Unru; Applicant and patent holder FEFU. N 2018116091; declared 04/28/2018; publ. 07/13/2018. Bull. N 20.

6. Petrov A.G. Mechanisms of fusion and crushing of gas bubbles pulsating in liquids. Bulletin of the Nizhny Novgorod University. N.I. Lobachevsky. 2011;4(3):1034–1035.
7. Semenov B.A. Engineering experiment in industrial heat engineering, heat power engineering and heat technologies. St. Petersburg, Lan, 2013, 400 p.
8. Semenov I.A., Ulyanov B.A., Kulov N.N. Effect of ultrasound on the dissolution of carbon dioxide in water. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2011;45(1):23–27.
9. Daisuke Kobayashi, Yoshiyuki Hayashida, Kazuki Sano, Koichi Terasaka. Effect of surfactant addition on removal of microbubbles using ultrasound. Ultrasonics Sonochemistry. 2014;54(6):1425–1429. DOI: 10.1016/j.ultras.2014.03.010
10. Edzwald J.K. Dissolved air flotation and me. Water Research. 2010;44(7):2077–2106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.12.040>
11. Masayoshi Takahashi. Zeta potential of microbubbles in aqueous solutions: electrical properties of the gas-water interface. The J. of Physical Chemistry B. 2005;109(46):21858–21864. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/jp0445270>