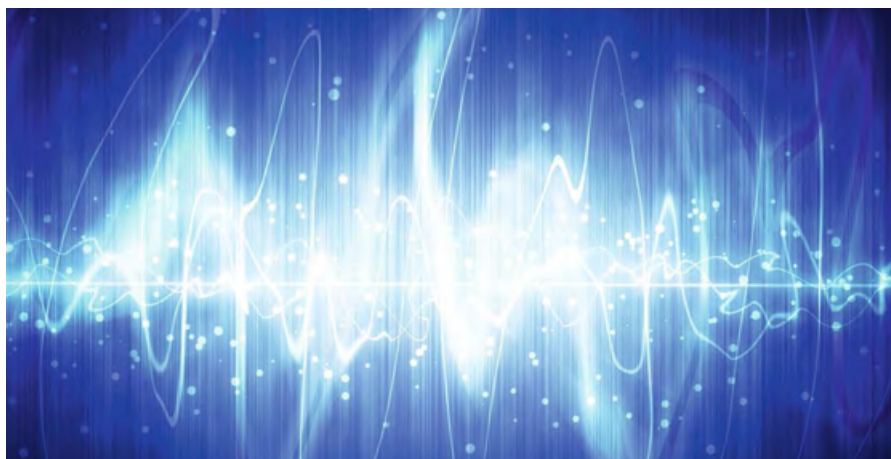




Теоретическая разработка модели ультразвукового воздействия на минерально- липидные соеди- нения в воде

Рецензия эксперта на статью получена
12.09.2019 [Expert review on the article
received on September 12, 2019].

Использование ультразвуковых колебаний в процессах очистки воды от минерально-липидных соединений является частью научной проблемы использования физических методов, которые включают: ультразвуковой, магнитный, высокочастотный, рентгеновский и ультрафиолетовый [1]. Во многих отраслях народного хозяйства — металлургии, машиностроении, теплоэнергетики, тяжёлой промышленности, химических производств и медицине, — использование ультразвукового поля находит широкое применение. Многообразием физико-химических явлений, возникающих в ультразвуковом поле, объясняется применение ультразвука в различных технологиях [1, 2].

Ультразвуковые колебания вызывают диспергирование и эмульгирование веществ, способствуют коагуляции и дегазации, оказывают влияние на процессы кристаллизации и растворения. Ультразвук вызывает разнообразные химические превращения вещества, в числе которых можно назвать реакции окисления, восстановления и полимеризации [2].

В этих условиях постановка вопроса о возможности применения ультразвука для извлечения липидных соединений является актуальной. Однако теоретическая сторона этого вопроса представляет собой научный интерес.

Ультразвуковые колебания относят к упругим колебаниям. При большой интенсивности ультразвуковые волны описываются законами нелинейной акустики. При распространении ультразвуковых волн в жидкости возникают акустические течения, уплотнение и разряжение среды.

Ультразвуковые колебания вызывают диспергирование, а также эмульгирование веществ, способствуют коагуляции и дегазации, оказывают влияние на процессы кристаллизации и растворения. Ультразвук вызывает химические превращения вещества, в том числе реакции окисления, восстановления и полимеризации

УДК 628.2+532.5. Научная специальность: 05.23.04.

Теоретическая разработка модели ультразвукового воздействия на минерально-липидные соединения в воде

П. Д. Видулин, к.т.н., доцент; А. Н. Ерошина, студентка бакалавриата; В. А. Михайлина, студентка бакалавриата, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)

Применение ультразвуковых колебаний в технологии очистки сточных вод от липидов является частью научной проблемы использования в этой области знаний физических методов, которые включают ультразвуковой, магнитный, высокочастотный, рентгеновский, ультрафиолетовый. Ультразвуковые колебания инициируют диспергирование и эмульгирование веществ, способствуют коагуляции и дегазации, оказывают влияние на процессы кристаллизации и растворения; известно, что ультразвук вызывает разнообразные химические превращения вещества, в числе которых можно назвать реакции окисления, восстановления и полимеризации. Объяснение этих явлений находят в многообразии ультразвуковых эффектов: кавитация, ударные волны, микропотоки, акустический ветер. Непрерывно совершенствуются схемы ультразвуковых генераторов, продвигаются работы по развитию методов использования ультразвука и по изысканию новых областей его применения. В этих условиях постановка вопроса о возможности применения ультразвука для очистки сточных вод от липидов является актуальной. Однако теоретическая сторона этого вопроса представляет собой малоизученный объект.

Ключевые слова: липиды, минералы, ультразвук, кавитация, разделение, седиментация, флотация.

UDC 628.2+532.5. The number of scientific speciality: 05.23.04.

Theoretical development of the model of ultrasonic action on mineral-lipid compounds in water

P. D. Vikulin, PhD, Associate Professor; A. N. Eroshina, undergraduate student; V. A. Mikhailina, undergraduate student, Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)

The application of ultrasonic vibrations in wastewater treatment technology from lipids is part of the scientific problem of using physical methods in this field of knowledge, which include ultrasonic, magnetic, high-frequency, x-ray, ultraviolet. Ultrasonic vibrations initiate dispersion and emulsification of substances, promote coagulation and degassing, influence the processes of crystallization and dissolution; it is known that ultrasound causes a variety of chemical transformations of substances, including oxidation, reduction and polymerization reactions. The explanation of these phenomena is found in the variety of ultrasonic effects: cavitation, shock waves, micro-flows, acoustic wind. Schemes of ultrasonic generators are continuously improved, works on development of methods of use of ultrasound and on search of new areas of its application advance. Under these conditions, the question of the possibility of using ultrasound for wastewater treatment from lipids is relevant. However, the theoretical side of this question is a little-studied object.

Keywords: lipids, minerals, ultrasound, cavitation, separation, sedimentation, flotation.

К числу нелинейных явлений, возникающих в ультразвуковом поле, относят акустическую кавитацию. В жидкостях ультразвук распространяется в виде объёмных волн [3].

Скорость в среде упругой волны зависит от плотности среды ρ и адиабатического коэффициента сжимаемости $\beta_{ад}$ и вычисляется по следующей формуле:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho \beta_{ад}}}, \quad (1)$$

где c — скорость звука, м/с; ρ — плотности среды, кг/м³; $\beta_{ад}$ — адиабатический коэффициент сжимаемости, Па⁻¹.

Распространение упругих волн в различных средах описывается уравнением:

$$y = A \sin(\omega t), \quad (2)$$

где A — амплитуда колебаний, мм; ω — циклическая частота, рад/с; t — временной период, с⁻¹.

Звуковая волна, проходя через жидкость, создаёт зоны сжатия и разрежения, меняющиеся местами в каждый полупериод прохождения волн.

При этом возникает знакопеременное давление p [Па], которое можно определить по формуле:

$$p = 0,0046 \sqrt{\rho c I}, \quad (3)$$

где I — интенсивность звука, Вт/м².

В данной точке среды в течение периода давление p меняется от максимума до нуля, затем снова возрастает до максимального значения и соответствует описанию гармонических колебаний:

$$p = p_{\max} \sin(\omega t), \quad (4)$$

где $p_{\max}$ — максимальное звуковое давление (амплитуда давления) [Па]:

$$p_{\max} = \omega c \rho A. \quad (5)$$

Сложное движение пузырьков, их схлопывание, слияние друг с другом и т.д. порождают в жидкости импульсы сжатия (микроударные волны) и микропотоки, вызывают локальное нагревание среды, ионизацию. Эти эффекты оказывают влияние на вещество: происходит разрушение находящихся в жидкости твёрдых частиц (кавитационная эрозия), возникает перемешивание жидкости, инициируются или ускоряются различные физические и химические процессы

Теплопроводность и волновое сопротивление среды способствуют поглощению акустической энергии и зависит от плотности среды ρ и скорости звука c . Значение волнового сопротивления среды определяется отношением звукового давления в бегущей плоской волне к колебательной скорости частиц среды:

$$p/v = \rho c, \quad (6)$$

где v — колебательная скорость, м/с.

Частицы упругой среды, в которой распространяются ультразвуковые волны, совершают колебательные движения и поэтому обладают кинетической и потенциальной энергией. Количество энергии, переносимое звуковыми колебаниями за 1 с через площадь в 1 см², которая перпендикулярна направлению их распространения, характеризует интенсивность звука и определяется по формуле:

$$I = E_1 c, \quad (7)$$

где E_1 — плотность энергии, Дж/м³.

Плотность звуковой энергии в каждой точке меняется со временем. Среднее значение плотности энергии в данной точке определяется по формуле:

$$E_1 = 0,5 A^2 \omega^2 \rho. \quad (8)$$

Преобразуя уравнения (7) и (8), получим выражение (9):

$$I = 0,5 A^2 \omega^2 \rho c. \quad (9)$$

При распространении звуковых волн в жидкостной среде интенсивность звука I уменьшается с увеличением расстояния от источника излучения по уравнению:

$$I = I_0 e^{(-2\alpha X)}, \quad (10)$$

где I_0 — интенсивность звука при $X = 0$; α — коэффициент поглощения, с²/м.

Важнейшим нелинейным эффектом в ультразвуковом поле является кавитация — возникновение в жидкости массы пульсирующих пузырьков, заполненных паром, газом или их смесью [1, 4].

Сложное движение пузырьков, их схлопывание, слияние друг с другом и т.д. порождают в жидкости импульсы сжатия (микроударные волны) и микропотоки, вызывают локальное нагревание среды, ионизацию. Эти эффекты оказывают влияние на вещество: происходит разрушение находящихся в жидкости твёрдых частиц (кавитационная эрозия), возникает перемешивание жидкости, инициируются или ускоряются различные физические и химические процессы.

Для того чтобы математически описать процесс, происходящий в минерально-липидных соединениях при наложении ультразвукового поля, предположим, что частицы минерального и липидного происхождения представляют собой шарообразную форму, которые под воздействием кавитации будут распадаться на более мелкие части. Причём частицы липидного происхождения в результате освобождения от частиц неорганического состава, стремятся к слипанию между собой. Учитывая плотность воды и частиц, необходимо отметить, что частицы минерального состава всегда тяжелее воды, и поэтому с ними происходит процесс седиментации. Частицы липидного происхождения всегда легче воды, поэтому происходит процесс флотации [5].

Ультразвуковые колебания в кавитационном режиме освобождают частицу липидов от минеральной основы, разрушая вокруг неё плёнку, способствуя выделению липидов из воды, а частицы минеральной основы подвергаются ускоренной седиментации. Минерально-липидные соединения присутствуют в составе шерстистой сточных вод. Модель минерально-липидного соединения исходной воды показана на рис. 1.

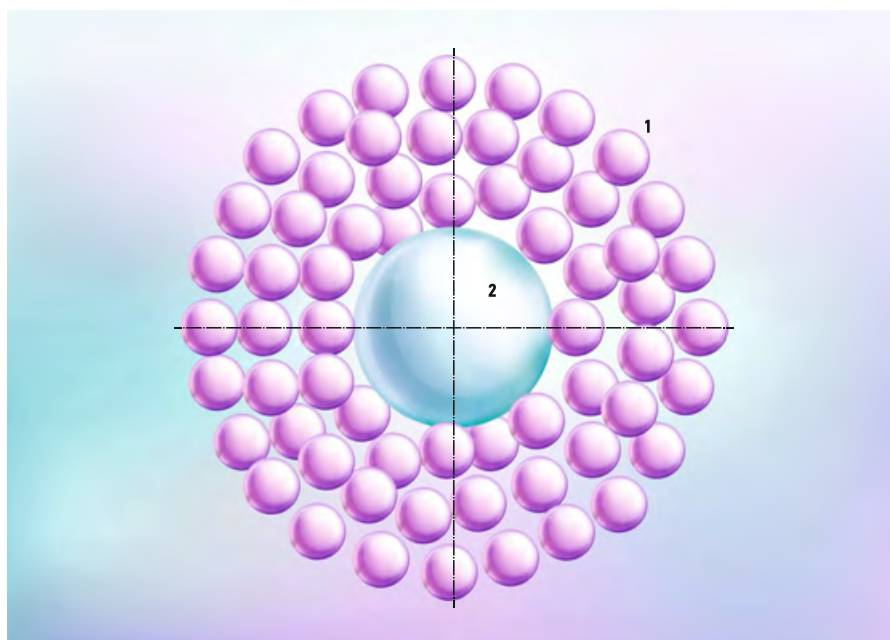


Рис. 1. Модель минерально-липидного соединения исходной воды (1 — шарообразная липидная составляющая соединения; 2 — шарообразная минеральная составляющая соединения)

Допускаем, что минерально-липидные соединения имеют форму шара, и их количество в единице объёма составляет n_1 , при этом диаметр этих частиц будет d_1 . Рассмотрим процесс воздействия ультразвука на минерально-липидные соединения, по стадиям применительно к единице объёма сточной воды V (рис. 2).

В результате воздействия явления акустической кавитации на частицу диаметром d_1 происходит разрушение оболочки липидного происхождения. Частицы липидов диаметром d_2 всплывают в воде, а частицы минерального происхождения выпадают в осадок, при этом их диаметр составляет $(d_1 - d_2)$ [22]. Если число частиц минерально-липидных соединений в единице объёма сточной воды равно n_1 , то их объём составляет:

$$V_1 = \frac{\pi d_1^3}{6} n_1, \quad (11)$$

где V_1 — общий объём минерально-липидных соединений в начальный момент разделения, м^3 .

Под воздействием акустической кавитации освобождаются все липидные частицы, и их число составляет n_2 , тогда объём отделённых липидных частиц:

$$V_2 = \frac{\pi d_2^3}{6} n_2, \quad (12)$$

где V_2 — общий объём всплывших липидных частиц, м^3 . Общий объём минеральных частиц диаметром $(d_1 - d_2)$, выпавших в осадок, будет:

$$V_3 = \frac{\pi (d_1 - d_2)^3}{6} n_1, \quad (13)$$

где V_3 — общий объём минеральных частиц диаметром $(d_1 - d_2)$, м^3 .

Составив уравнение материального баланса, учитывая приведённые выше допущения и уравнения (11, 12, 13), получим следующую сумму

$$V_1 = V_2 + V_3, \quad (14)$$

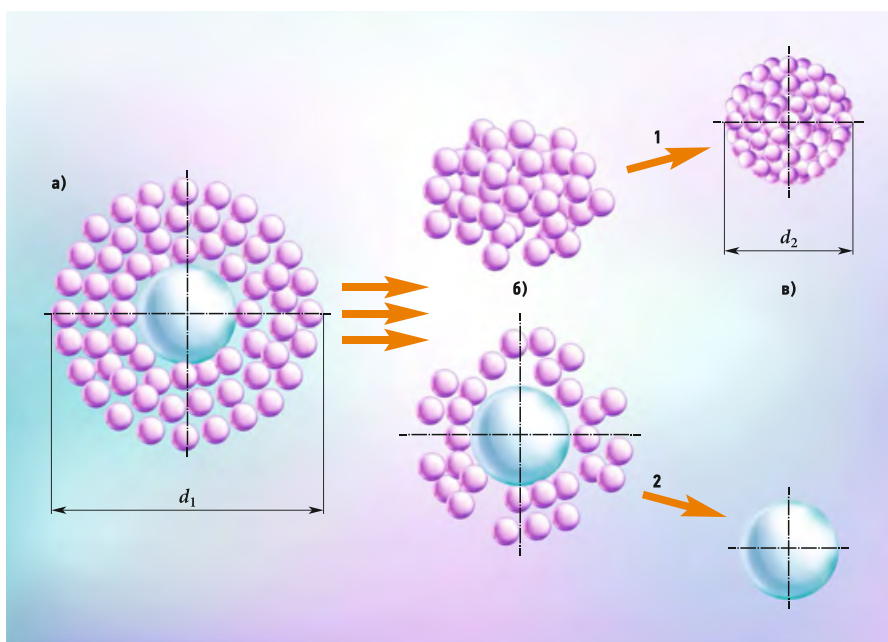


Рис. 2. Действие во времени ультразвуковой кавитации на модель минерально-липидного соединения исходной воды (1 — направление флотации; 2 — направление седиментации; а, б и в — стадии обработки ультразвука)

и тогда

$$\frac{\pi d_1^3}{6} n_1 = \frac{\pi d_2^3}{6} n_2 + \frac{\pi (d_1 - d_2)^3}{6} n_1, \quad (15)$$

Так как расчёты приведены к единице объёма, составим следующее уравнение:

$$1 = \frac{n_2}{n_1} \frac{d_2^3}{d_1^3} + \frac{(d_1 - d_2)^3}{d_1^3}. \quad (16)$$

Далее обозначим через N концентрацию липидных частиц в единице объёма, а через ΔN — концентрацию липидных частиц, выделяемых из единицы объёма сточной воды. Составляем пропорцию:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\Delta N}{N} = y, \quad (17)$$

$$\text{где } y = f\left(\frac{n_2}{n_1}, \frac{\Delta N}{N}\right).$$

Подставим выражение (17) в уравнение (16) и запишем:

$$y = \frac{1 - \frac{(d_1 - d_2)^3}{d_1^3}}{\frac{d_2^3}{d_1^3}}, \quad (18)$$

раскрывая скобки, получим выражение:

$$y = 3 \frac{d_1}{d_2} - 3 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 + 1. \quad (19)$$

В общем виде это уравнение можно записать как:

$$y = bx - ax^2 + 1, \quad (20)$$

где a и b — константы, определяемые из эксперимента для каждого конкретного случая.

Выводы

1. Разработана модель ультразвукового воздействия на минерально-липидные соединения в воде.
2. Получена квадратичная зависимость влияния ультразвукового поля на процессы седиментации и флотации минерально-липидных соединений в воде. ●



1. Голямина И.П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. — М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.
2. Физика и техника мощного ультразвука. Т. 2. Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л.Д. Розенберга. — М.: Изд-во «Книга по требованию», 2012. 268 с.
3. Викулин П.Д. Физико-химические проявления акустического поля в технологиях кондиционирования воды: монография. — М.: Изд-во «АСВ», 2004. 251 с.
4. Флинн Г.Г. Физическая акустика. Т. 1. Методы и приборы ультразвуковых исследований / Пер. с англ. под ред. Л.Д. Розенберга. — М.: Мир, 1967. 362 с.
5. Алексеев Е.В. Основы технологии очистки сточных вод флотацией. — М.: Изд-во «АСВ», 2009. 137 с.

References — see page 94.

Theoretical development of the model of ultrasonic action on mineral-lipid compounds in water. Pp. 14–16.

Pavel D. Vikulin, PhD, Associate Professor; **Anna N. Eroshina**, undergraduate student; **Valeria A. Mikhailina**, undergraduate student, Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)

1. Goljamina I.P. Ul'trazvuk. *Malen'kaja jenciklopedija* [Ultrasound. The little encyclopedia]. Moscow. *Sovetskaja jenciklopedija* ["The Soviet Encyclopedia" Publishing House]. 1979. 400 p. [In Russian]
2. *Fizika i tehnika moshhnogo ul'trazvuka. T. 2. Moshhnye ul'trazvukovyje polja* [Physics and technology of powerful ultrasound. Vol. 2. Powerful ultrasonic fields]. Edited by L.D. Rozenberg. Moscow. *Izd-vo "Kniga po trebovaniju"* ["The book on demand" Publishing House]. 2012. 268 p. [In Russian]
3. Vikulin P.D. *Fiziko-himicheskie projavlenija akusticheskogo polja v tehnologijah kondicionirovanija vody: monografija* [Physico-chemical manifestations of the acoustic field in water conditioning technologies: A monograph]. Moscow. *Izd-vo "ASV"* [Publishing House of the Association of Construction Universities]. 2004. 251 p. [In Russian]
4. Flinn G.G. *Fizicheskaja akustika. T. 1. Metody i pribory ul'trazvukovyh issledovanij* [Physical acoustics. Vol. 1. Methods and instruments of ultrasonic research]. Trans. from Eng. and edited by L.D. Rozenberg. Moscow. *Mir* ["The World" Publishing House]. 1967. 362 p. [In Russian]
5. Alekseev E.V. *Osnovy tehnologii ochistki stochnyh vod flotaciej* [The basics of flotation wastewater treatment technology]. Moscow. *Izd-vo "ASV"* [Publishing House of the Association of Construction Universities]. 2009. 137 p. [In Russian]