



УДК 628.16

doi: 10.48612/dnitii/2023\_49\_76-82

---

## ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПРИРОДНЫХ ВОД

**В. Б. Викулина**

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва

---

### **Аннотация**

В статье рассматриваются ультразвуковые эффекты в водной среде, возникающие в режиме кавитации. Отмечены следующие эффекты: эрозия, химические реакции, звуколюминесценция, ускорение диффузии, коагуляция аэрозолей и гидрозолей, диспергирование, кристаллизация и дегазация. В статье указано на возникновение активных радикалов, способствующих интенсификации технологических процессов очистки природных вод. Рассмотрены временные факторы воздействия ультразвукового поля на водную среду для получения эффекта снижения доз реагентов в технологии очистки природных вод. Указано изменение значений рН воды в зависимости от интенсивности ультразвуковых колебаний в кавитационном режиме.

### **Ключевые слова**

*ультразвуковое поле, кавитация, цветность, мутность, коагуляция, фильтрация*

### **Дата поступления в редакцию**

27.11.2023

### **Дата принятия к печати**

30.11.2023

---

В последние годы в отечественной и зарубежной литературе уделяется много внимания физико-химическим методам водоподготовки [1–4], которые основаны на взаимодействии с водой различных внешних физических полей, вызывающих ее структурно-химические изменения. К таким внешним физическим полям относят электромагнитное, акустическое, гравитационное поля и радиационное излучение.

В свете современных воззрений физические методы обработки малоконцентрированных суспензий могут рассматриваться с позиции теории жидкого состояния.

Структура воды представляет собой молекулярное соединение с несимметричным строением молекул, которые имеют два атома водорода, соединены с атомом кислорода под углом в  $105^\circ$ . Жидкая вода, наряду с простыми молекулами  $H_2O$ , содержит состав, который выражается общей формулой  $(H_2O)_x$ .

Это объединение молекул характеризуется их противоположными зарядами, в результате чего молекулы притягиваются между собой разноимёнными полюсами, образуя удвоенные, утроенные молекулы.

Установлено, что атом водорода, ковалентно связанный с атомом электроотрицательного элемента, может взаимодействовать с другим атомом того же элемента. Полученная связь будет называться водородной.

Исследованиями И. Е. Эльпинера и др. [5–7] установлено, что воздействие на вещество ультразвука большой интенсивности ( $I > 1 \text{ Вт/см}^2$ ) обусловлено большими значениями давления и ускорения, имеющих место в интенсивных ультразвуковых волнах, влиянием скорости, а также различными вторичными явлениями. К их числу относятся радиационное давление и звуковой ветер.

В ультразвуковом поле кавитационного режима в жидкости образуются каверны, движение которых приводит к таким сильнодействующим эффектам, как эрозия, химические реакции, звуколюминесценция, ускорение диффузии, коагуляция аэрозолей и гидрозолей, диспергирование, кристаллизация, дегазация.

При этом подтверждается существование предела диапазона, который может вызвать кавитацию. Предел характеризуется способностью однородной жидкости разрываться, преодолевая молекулярные связи.

Из теории известно, что жидкости способны выдерживать очень высокие напряжения растяжения. Между тем реальные жидкости нарушают свою стабильность при давлениях близких давлению упругости их паров.

Этому способствуют присутствующие в воде разного рода примеси, паровые, газовые, микроэлементы, которые способствуют возникновению кавитационных полостей. В подобных полостях происходят концентрация энергии, при этом осуществляется переход под действием звукового поля в энергию высокой плотности схлопывающегося кавитационной полости.

Вследствие воздействия высокой концентрации энергии на развитие событий в малых объемах, акустическая кавитация может вызвать в свою очередь сильнодействующие эффекты в водной среде, эрозию твердых тел, интенсификация химических реакций и люминесценцию.

Вследствие чего наблюдаются при трансформации энергии звуковой волны, схлопывания акустической полости в высокую плотность энергии.

Трансформация энергии звуковой волны в высокую плотность, связанную с схлопыванием акустической полости, может быть только в случае нелинейного движения. Внутри пузырька могут возникать очень высокие температуры, в то время как ударные волны образуются у границы раздела и излучаются в жидкость.

Я. И. Френкель [8] высказал предположение, что при образовании кавитационной полости на ее границах оказываются ионы жидкости различных знаков, в результате чего в пузырьке появляется электрическое поле, напряжение которого из-за малых размеров пузырька может достигать нескольких сот вольт на сантиметр. Это приводит к разрядам внутри пузырька, что вызывает ионизацию продиффундировавших в пузырек газов или молекул. Эти образовавшиеся ионы могут являться причиной химических реакций, возникающих под действием ультразвука.

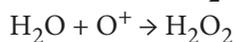
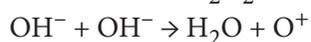
Модель, предложенная Я. И. Френкелем, получила свое развитие в работах английского ученого Е. Н. Гарвея. При воздействии ультразвукового поля на воду (в режиме кавитации) создаются такие условия внутри кавитационных пузырьков, при которых происходит расщепление молекул воды. Основной химической реакцией является реакция расщепления молекул воды на атом водорода и гидроксильную группу.

В звуковом поле в жидкости образуются полости, развитие которых вызывает такие сильнодействующие реакции, как коагуляция аэрозолей и гидрозолей, дегазация, кристаллизация, эрозия, звуколюминесценция, ускорение диффузии, диспергирование.



Не исключена вероятность взаимодействия между отдельными атомами и свободными радикалами. Поэтому могут быть образованы другие химические соединения и свободные радикалы.

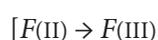
Реакции взаимодействия возможны по следующим уравнениям:



и т. д.

Вероятность подобных реакций подтверждается появлением перекиси водорода  $\text{H}_2\text{O}_2$  [9 – 10].

Образующиеся в водном растворе под действием кавитации свободные гидроксильные ионы в процессе окисления, могут происходить по следующей схеме:

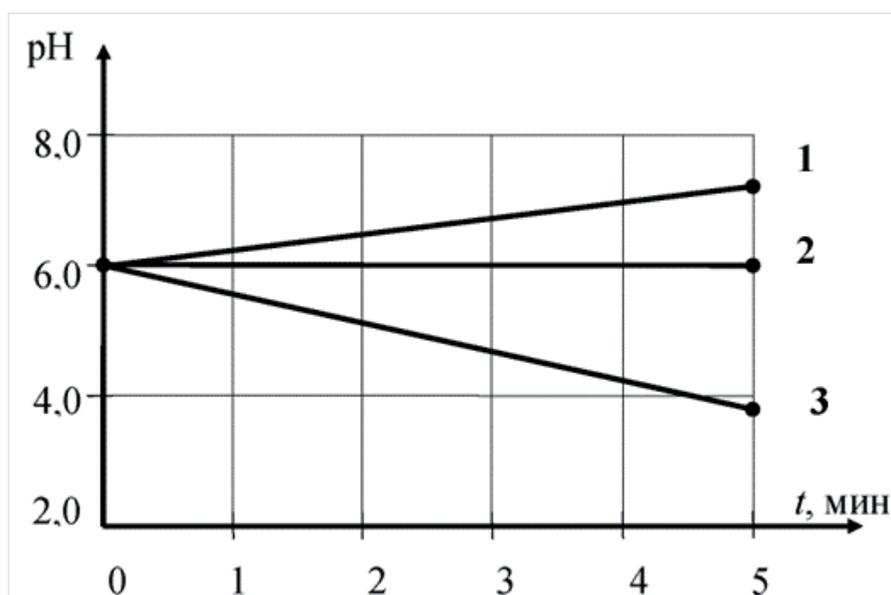


При захлопывании кавитационной полости в воде разрушаются водородные связи и возникают радикалы  $\text{H}^+$  и  $\text{ОН}$ . В связи с этим возможно изменение рН среды.

На изменение рН может влиять также растворенный углекислый газ, свободный кислород и водород. В зависимости от частоты ультразвука рН изменяется в кислую или щелочную сторону, [11], что иллюстрируется **рис. 1**.

Все перечисленные выше явления в жидкостях, связанные с кавитацией в ультразвуковом поле, позволили применить ультразвук в различных технологических процессах.

Бойте, Фурбах и Серенсен [12] наблюдали изменение физических свойств воды, а именно мутности, жесткости и др. под действием ультразвука. (**табл. 1**).



**Рис. 1.** Изменения рН от частоты ультразвука: 1 — 22 кГц; 2 — 8 кГц; 3 — 1 МГц

Таблица 1

## Результаты опытов по ультразвуковой обработке водопроводной воды (объём 0,5 л)

Воздействие ультразвука	Конечная температура, °С	Общая жесткость, мг-экв./л	Карбонатная жесткость, мг-экв./л	Некарбонатная жесткость, мг-мг-экв./л
Нет	20	4,2	3,6	0,6
120 мин	69,7	2	1,5	0,5
120 мин нагревания	70,3	3	2,4	0,6

Это вызвало повышенный интерес к возможности осаждения примесей в воде с помощью ультразвукового поля и удаления солей, характеризующих жесткость воды.

Проводилось облучение ультразвуком раствора гипса, которое привело к выпадению гипса. Частота ультразвука составляла 380 кГц.

Действие ультразвука проверялось также на воде, питающей теплообменные аппараты [13]. Предполагается, что под действием ультразвукового поля, вызывающего ориентацию молекул воды, происходит разделение крупных молекулярных ассоциаций на более мелкие устойчивые нейтральные пары.

Указанное воздействие приводит к изменению физических и химических свойств воды. Одновременно ультразвук оказывает кристаллизующее действие [14]. В результате проведенных Ю. Л. Новожиловым опытов [15] по обработке ультразвуком котловой воды, выявлено ускорение процесса выделения солей жесткости, в том числе и ускорение распада бикарбоната.

Ускорение процессов выделения солей жесткости является следствием образования во всем объеме центров кристаллизации.

Отмечено увеличение вязкости на 1 – 2% при обработке ультразвуком, уменьшение растворимости CaCO<sub>3</sub>. А. П. Капустинным были проведены многочисленные опыты по выявлению действия ультразвука на кинетику кристаллизации различных растворов.

Опыты показали, что выпадающие из раствора кристаллы в ультразвуковом поле имеют более мелкую структуру, чем кристаллы, образованные в спокойном состоянии водной среды.

На основании вышеизложенного были сделаны предположения о возможности применения ультразвука для обработки природных вод и были проведены исследования, в частности, опыты по использованию ультразвуковых колебаний для снижения жесткости природной воды.

Для опытов использовалась артезианская вода с исходной жесткостью 7,0 мг-экв./л, щелочностью 7,1 мг-экв./л. Проба объемом 200 мл облучалась ультразвуком (режим кавитации).

В опытах использовался генератор заводского изготовления УЗГ-2-10 и преобразователь УЗВД-6. Частота ультразвуковых колебаний 18 кГц, напряжение выхода 350 В. Рабочая поверхность выполнена из нержавеющей стали.

Перед озвучиванием в пробу вводилась известь. Жесткость и щелочность после обработки проверялись титрованием (табл. 2).

Таблицу 2 см. на следующей странице

Данные опытов ультразвуковой обработки воды на генераторе УЗГ-2-10

Время обработки	Доза извести, МГ/л					
	200		100		50	
	Ж, мг-экв/л	Щ, мг-экв/л	Ж, мг-экв/л	Щ, мг-экв/л	Ж, мг-экв/л	Щ, мг-экв/л
15 с	–	–	–	–	4,8	5,0
30 с	4,0	4,0	4,4	4,4	5,0	5,0
	3,2	3,2				
1 мин	2,6	3,0	4,0	4,6	4,8	5,0
	3,4	3,0	4,0	4,0		
	4,0	4,0	4,0	4,2	4,2	4,4
2 мин	–	–	4,0	4,0	–	–
			4,4	4,6	–	–
5 мин	2,6	3,0	4,4	4,6	4,4	4,6
	2,6	2,4	4,0	4,0	4,8	5,0
	3,0	2,4	–	–	–	–
Без обработки ультразвуком	4,4	4,6	5,6	5,4	6,4	6,3

При нагревании до 50°C воды жесткость снизилась от 7,0 до 5,8 мг-экв/л, а щелочность снизилась от 7,1 до 6,4 мг-экв/л.

Проведенные опыты показали, что озвучивание в режиме кавитации интенсифицирует процесс умягчения, снижает карбонатную жесткость. По-видимому, добавление извести повышает центры кристаллизации при обработке пробы ультразвуковыми колебаниями.

Сами ультразвуковые колебания способствуют выпадению CaCO<sub>3</sub> и уменьшают растворимость, а также позволяют снизить дозы извести.

### Заключение

Дальнейшие исследования по использованию ультразвуковых колебаний для снижения жесткости природной воды должны быть продолжены в натуральных условиях.

Ввиду того, что ультразвук обладает окислительно-восстановительным действием, представляется возможным применение его для удаления различных форм железа из природной воды, а физическая картина явления кавитации дает возможность применения ультразвука для удаления растворенных в воде газов.

### Библиографический список

1. Говоров О. Б., Елсуков А. В., Говорова А. О. Исследование технологии двухступенчатого реагентного фильтрования природной воды // Системные технологии. 2021. № 2 (39). С. 6–10.

2. Викулин П. Д. Осветление и обесцвечивание природных вод в ультразвуковом поле // Системные технологии. 2022. № 1 (42). С. 32 – 40.
3. Андрианов А. П., Ефремов Р. В., Хургин Р. Е. Проблемы современного водоснабжения // Системные технологии. 2022. № 3 (44). С. 5 – 13.
4. Хургин Р. Е., Кулагина А. С. Современный взгляд на водопотребление городов // Системные технологии. 2021. № 1 (38). С. 62 – 65.
5. Викулин П. Д. Физико-химические проявления акустического поля в технологиях кондиционирования воды. Москва, М.: издательство АСВ. 2004, 251 с.
6. Zhou, Y., Zhai, L., Simmons, R. and Zhong, P. Measurement of high intensity focused ultrasound fields by a fiber optic probe hydrophone. J. Acoust. Soc. Am. V. 120, № 2. 2006. pp. 676 – 685.
7. Маргулис М. А. Сонолюминесценция. Москва, М.: Успехи физических наук. Т. 170, № 3. 2000. с. 263 – 287.
8. Сиротюк, М. Г. Акустическая кавитация. Москва, М.; Наука. 2008. 271 с.
9. Голямина И. П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия Москва, М.; Советская энциклопедия. 1979. с. 45 – 125.
10. Хилл, К., Бэмбер и Дж., тер Хаар, Г. ред. Ультразвук в медицине. Физические основы применения. Пер. с англ. Москва, М.: Физматлит. 2008. 544 с.
11. Под редакцией Розенберга Л. Д. Физика и техника мощного ультразвука, т. 1–3. Москва, М.; Наука, 1967. 408 с.
12. N. Khan, Y. Adewuyi. (2008) Modeling the Ultrasonic Cavitation-Enhanced Removal of Nitric Oxide from Flue Gases In a Bubble Column Reactor // American Institute of Chemical Engineers, Annual Meeting.
13. Зубрилов С. П. Микрозагрязнители в питьевой воде городов. Вода и экология: проблемы и решения, №3 (75), 2018. с. 9 – 18.
14. Багров, В. В., Графов, Д. Р., Десятов, А. В. Возможность интенсификации окислительно-восстановительных процессов при очистке воды за счет использования эффекта кавитации. Вода: химия и экология, № 12, 2013. с. 35 – 37.
15. Маргулис М. А. Основы звукохимии: химические реакции в акустических полях. М.: Высшая школа, 1984. 272 с.

---

## APPLICATION OF ULTRASOUND FOR NATURAL WATER TREATMENT

**V. B. Vikulina**

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow

---

**Abstract**

The article discusses ultrasonic effects in an aqueous medium that occur in the cavitation mode. The following effects are noted: erosion, chemical reactions, sonoluminescence, acceleration of diffusion, coagulation of aerosols and hydrosols, dispersion, crystallization and degassing. The article indicates the occurrence of active radicals that contribute to the intensification of technological processes of natural water purification. The temporal factors of the ultrasonic field effect on the aquatic environment to obtain the effect of reducing the doses of reagents in the technology of natural water purification are considered. The change in the pH values of water is indicated depending on the intensity of ultrasonic vibrations in the cavitation mode.

**The Keywords**

*ultrasonic field, cavitation, chromaticity, turbidity, coagulation, filtration*

**Date of receipt in edition**

27.11.2023

**Date of acceptance for printing**

30.11.2023

---

**Ссылка для цитирования:**

[В. Б. Викулина. Применение ультразвука для обработки природных вод. — Системные технологии. — 2023. — № 4 \(49\). — С. 76–82.](#)

