

С. Д. Шестаков

*Московский государственный университет технологий и управления,
Москва, ул. Земляной вал, 73, e-mail: sdsh@mail.ru*

Непараметрическое (фазовое) управление кавитацией в сонохимическом реакторе

Получена 23.12.2013, опубликована 08.02.2014

Описывается возможность управления симметричным сонохимическим реактором для физико-химической обработки химически чистой воды, истинных и коллоидных водных растворов, а также дисперсных систем со скоростью звука в них больше чем у воды. Такие реакторы будут эффективны, например, в пищевой промышленности, где обрабатываются растворы NaCl различной концентрации. Показано, что разработка позволяет в любом растворе получить наивысшую рассеиваемую на кавитации акустическую мощность и максимальную производительность обработки без увеличения подводимой электрической мощности путем непараметрического управления кавитацией. Рассмотрен реактор с двумя встречно распространяющимися в обрабатываемом растворе когерентные плоско-упругие волны излучателями, которые герметично закрепленными посредством эластичных прокладок и фланцев в узлах колебательных смещений их акустических трансформаторов к противоположным торцам корпуса. Расстояние между излучающими торцами трансформаторов в реакторе кратно числу полувольт их колебаний этих в химически чистой воде. Эффект достигается за счет того, что фазы излучателей всегда должны быть смещены между собой на заданный угол.

Ключевые слова: сонохимический реактор, непараметрическое управление кавитацией.

ВВЕДЕНИЕ

В статье пойдет речь о сонохимическом реакторе — аппарате для физико-химической обработки ультразвуковой кавитацией воды, истинных и коллоидных водных растворов, а также дисперсных систем со скоростью звука выше, чем у воды. Такая обработка делается с целью изменения их физико-химического состояния для интенсификации идущих химических реакций путем преобразования диполь-дипольных и ион-дипольных взаимодействий в их среде и фазах. В сонохимическом реакторе передача энергии обрабатываемой жидкости имеет «надтепловой» характер и инициирует процессы, свойственные химии высоких энергий, когда она выводится на определенное время из состояния термодинамического равновесия. Это позволяет аккумулировать в воде без нагрева определенное количество энергии и при возврате к равновесному состоянию отдавать ее в виде тепла гидратации растворенных веществ, диспергированных компонентов и самой себя воссозданием молекулярной структуры. В

неравновесном состоянии вода обладает повышенной растворяющей способностью и интенсивно гидратирует молекулы и ионы растворенных в ней веществ, создавая на них плотные гидратные оболочки [1]. Это процесс релаксации неравновесного состояния. Сонохимические реакторы используются, например, в пищевой промышленности, фармацевтике и производстве топлив [2, 3].

1. КРАТКИЙ ОБЗОР ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Существует множество конструкций сонохимических реакторов называемых еще кавитационными, использующих в качестве технологического фактора энергию упругой ультразвуковой волны в воде, которая порождает в ней акустическую кавитацию. В некоторых из них создающую эту волну акустическую ячейку составляют один излучатель ультразвуковых колебаний и один их отражающий элемент (стенка камеры, отражатель, рефлектор) [4]. Но как бы ни был устроен этот рефлектор, в акустической ячейке реактора он рассеивает часть энергии упругой волны, снижая КПД ее преобразования в энергию кавитации, то есть эффективность реактора. Кроме того, из акустической теории известно, что коэффициент отражения волны от рефлектора чаще всего является отрицательным, поскольку материалы, из которых рефлекторы изготовлены, имеют акустические импедансы, как правило, выше, чем у воды.

Плоско-упругая волна, рассеивая часть своей энергии в воде на внутренне трение и кавитацию, затухает по лучу от поверхности излучения [5]. Практически приемлемый закон этого затухания описан в [6, 7]. Поэтому более эффективными являются сонохимические реакторы с симметричными акустическими ячейками, составленными из двух излучателей, испускающих когерентные волны, распространяемые по одной оси навстречу друг другу [8]. Суперпозиция этих волн дает общую рабочую волну в реакторе. В этом случае суммарная волна тоже имеет затухание амплитуды к геометрическому центру реактора. Но объемная плотность эрозионной мощности кавитации при этом, чаще всего, в реакторах с длиной луча до трех полуволн все же имеет в геометрическом центре максимальное значение. Это объясняется эффектом непараметрического усиления кавитации [9]. Этот эффект направленно используется для усиления кавитации без произвольного изменения акустических параметров жидкости и растворенного в ней газа [10] в конструкциях реакторов с несколькими независимыми волнами в одном объеме жидкости. Это делается двумя путями: за счет специального взаимного размещения источников когерентных волн, либо за счет управления фазами волн этих источников. Второе известно только для реакторов, где отсутствует суперпозиция инициирующих кавитацию волн. Поэтому в реакторе с двумя встречно направленными излучателями на одной оси, если обрабатывается жидкость, скорость звука в которой отличается от скорости звука в жидкости, на которую он рассчитан, теряется часть энергии. А удельное акустическое сопротивление, например, воды и насыщенного раствора поваренной соли отличается на 36%. При обработке последнего для получения такой же амплитуды звукового давления как в воде, от которой зависит энергия кавитации, потребуется соответствующее увеличение мощности излучения.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Реактор симметричен относительно центра масс и состоит из несущего корпуса рабочей камеры с напорным и сливным патрубками, двух излучателей когерентных плоско-упругих волн, герметично с помощью эластичных прокладок и фланцев закрепленных с каждой стороны корпуса в узлах колебательных смещений акустических трансформаторов. Фланцы стянуты между собой стяжками, образуя с корпусом и трансформаторами герметичный рабочий объем для пропускания через реактор обрабатываемой жидкости. Источники колебаний – электроакустические преобразователи присоединены к трансформаторам посредством шпилек. При расстоянии между излучающими плоскостями трансформаторов равному нечетному числу полувольт излучатели работают в фазе, четному – в противофазе (Рис. 1).



Рис. 1. Фото симметричного реактора на штативе

Ясно, чтобы настроить реактор под скорость звука в обрабатываемой жидкости, так чтобы амплитуда результирующей волны была бы всегда максимальной без увеличения подводимой мощности можно, например, каким-либо образом изменить расстояние между излучающими плоскостями акустических трансформаторов или изменить частоту излучения так, чтобы фазы встречных волн совпадали. Но это технически непростые

задачи. Проще установить смещение фаз этих колебаний у их источников, оставив неизменной их частоту, то есть, оставив их когерентными. Для этого понадобится одна линия задержки в схеме управления, как в [9].

Путем проведения исследований модели многопузырьковой кавитации и критерия подобия сонохимических реакторов было установлено, что получения наивысшей мощности кавитации и максимальной производительности реактора за счет оптимальной суперпозиции встречно излучаемых волн следует задавать смещение фаз излучения между источниками излучения. При этом не следует допускать, чтобы кавитационные области прилегающие к излучающим поверхностям соприкасались с ними дабы не вызывать их эрозии. Был найден угол, который удовлетворяет этим

условиям. Он выражается аддитивной функцией $\frac{20}{3} \lambda \pi + \frac{1}{2} \pi + 2 \left\lfloor \frac{1}{2} N \right\rfloor \pi - N\pi$, где:

λ – длина волны ультразвука в обрабатываемой жидкости в м; N – количество полуволн колебаний на оси камеры реактора между излучающими поверхностями акустической ячейки в химически чистой воде; $\left\lfloor \quad \right\rfloor$ – нижняя целая часть числа. При таких условиях образуемые вблизи пучностей давления результирующей волны кавитационные области будут занимать наибольший общий объем. Это сделает реактор более производительным.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Был поставлен компьютерный эксперимент с математической моделью кавитационного реактора и принципом подобия кавитационных процессов, для которого выбран реактор, с конструкцией подобной описанной в работе [8]. Число полуволн ультразвука в воде между излучающими встречно поверхностями $N = 3$. В результате сравнения был вычислен суммарный объем кавитационных областей. В реакторе без смещения фаз он составил 331 мл, со смещением – 369 мл. Средняя объемная плотность эрозионной мощности кавитации в камере реактора при смещении фаз увеличилась в 1,18 раза (рис. 2, 3).

В натурном эксперименте было выполнено сравнительное диспергирование полистирольного латекса. При обработке латекса кавитационными импульсами давления совершается работа против циклической прочности полистирольных частиц пропорциональная мощности кавитации. Изменение дисперсности латекса может служить мерой этой работы. В эксперименте контрольные образцы латексов обрабатывали в режиме синфазной работы излучателей. Опытные образцы при такой же начальной температуре обрабатывали в течение такого же времени при смещении фаз между излучателями на угол равный $0,127\pi$. Методом Геллера находили диаметры полистирольных частиц, которые у контрольных образцов составили 150 ± 10 нм, а у опытных 120 ± 10 нм.

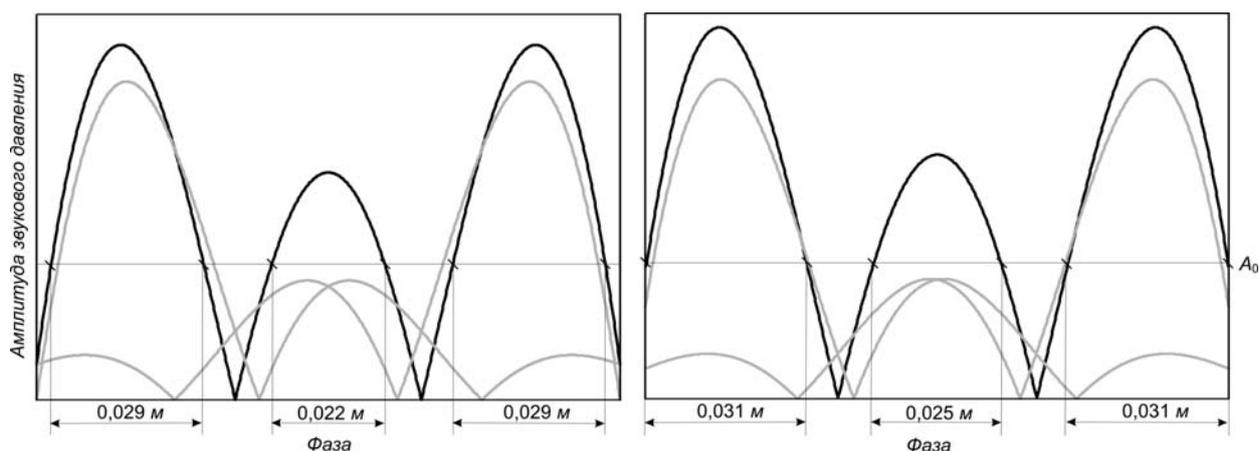


Рис. 2. Графики амплитуды звукового давления на оси реактора в обрабатываемом полистирольном латексе: — для каждого излучателя; — суммарное звуковое давление. Слева без фазового смещения, справа – со смещением. Цифрами на оси абсцисс показываются длины отрезков, на которых действует кавитация

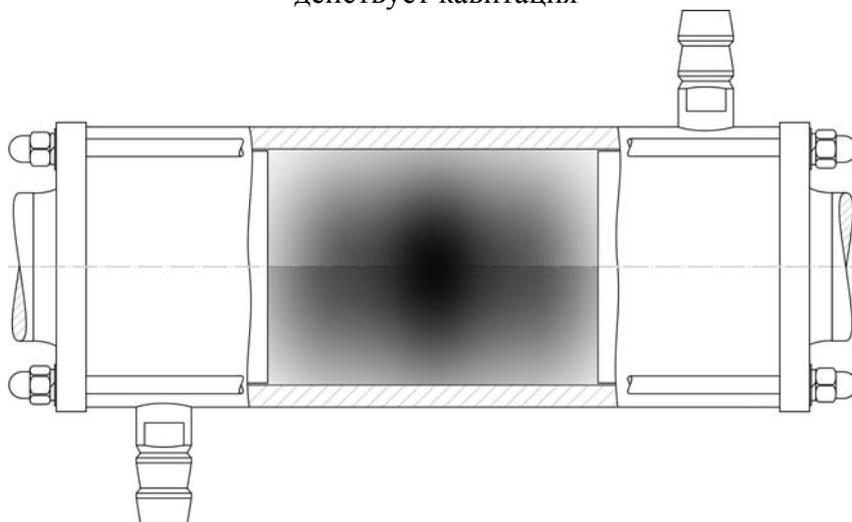


Рис. 3. Общий вид с разрезом по диаметру рабочей камеры сонохимического реактора, посредством которого были выполнены сравнительные эксперименты. В плоскости разреза тоновым рисунком показано распределение объемной плотности эрозионной мощности кавитации (в верхней части разреза без смещения фаз, в нижней – со смещением)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фазовое управление излучателями реактора с симметричной акустической ячейкой позволяет в любом растворе получать наивысшую рассеиваемую на кавитации акустическую мощность и максимальную производительность обработки без увеличения подводимой электрической мощности. Такое непараметрическое управление кавитацией дает возможность строить системы управления сонохимическими реакторами, в которых расстояние между излучающими торцами трансформаторов в реакторе кратно числу полувольт их колебаний в химически чистой воде, а наивысшая производительность обработки поддерживается путем задания

фазового сдвига волн излучателей в зависимости от акустических параметров обрабатываемой жидкости.

Такой реактор работает следующим образом. В пропускаемую через штуцеры обрабатываемую жидкость с плоских поверхностей акустических трансформаторов распространяются плоско-упругие колебания. В ней устанавливается результирующая стоячая волна, в которой, там где амплитуда превышает кавитационный порог, образуются кавитационные области, пульсирующие пузырьки которых совершают полезную работу. Если в реакторе фазы волн колебаний излучателей смещены на установленный угол, то они складываются в результирующую волну с максимальной амплитудой, а размеры кавитационных областей увеличиваются. В результате средняя объемная плотность эрозионной мощности кавитации в камере реактора и его производительность становятся максимально возможными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shestakov S. et al. Sonochemistry of Foods and Medicaments – a New Developing Area of High Energy Chemistry // *Transnational Journal of Science and Technology*, V3, 1, 2013, pp. 1-12.
2. Ashokkumar M. et al. A New Look at Cavitation and the Applications of Its Liquid-Phase Effects in the Processing of Food and Fuel // *Applied Physics Research*, V4, 1, 2012, pp. 19-29.
3. Шестаков С. Пищевая сонохимия: концепция, теоретические аспекты и практические приложения. - Саарбрюккен: LAMBERT Academic Publishing, 2012. - 152 с.: ил.
4. Шестаков С. Д., Краснов А. Е., Городищенский П. А. Математическая модель и критерий подобия кавитации в сонореакторах // *Прикладная физика*, 2012, 1, С. 31-39.
5. Физика и техника мощного ультразвука. Мощные ультразвуковые поля // под ред. Л. Д. Розенберга. - М: Наука, 1968.
6. Shestakov S. Mathematical Model for the Spatial Distributing of Erosive Power Density of Multibubble Cavitation // *Abstracts Book of 1th Asia-Oceania Sonochemical Society Meeting*. - Melbourne, 2013, pp. 111-112.
7. Шестаков С. Д., Бефус А. П. Формулирование критерия подобия сонохимических реакторов при обработке сред, не обеспечивающих акустического резонанса. - М: Деп. в ВИНТИ РАН, №840-В2008.
8. Ринк Р., Шестаков С. Д. Кавитационный реактор с симметричной немонолитной колебательной системой акустической ячейки для процессов пищевой сонохимии // *Электронный журнал «Техническая акустика»*, <http://www.ejta.org>, 2012, 2
9. Шестаков С. Д. Исследование возможности непараметрического усиления многопузырьковой кавитации // *Прикладная физика*. - 2008. - №6. - С. 18-24.
10. Flannigan D., Suslik K. Plasma formation and temperature measurement during single-bubble cavitation. *Letters to Nature*, 434, 2005, pp. 52-55.