

Ультразвуковой Проточный Реактор Для Интенсивной Ультразвуковой Обработки Жидких Сред в Тонком Слое

Денис С. Абраменко, *Student Member*, IEEE, Сергей В. Левин, *Student Member*, IEEE,
Сергей С. Хмелёв, *Student Member*, IEEE, Юрий М. Кузовников
Бийский технологический институт (филиал)

ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Аннотация – В статье представлена информация об ультразвуковом проточном реакторе позволяющем производить высокоинтенсивную кавитационную обработку жидких и жидкодисперсных сред в тонком слое. Такой способ значительно повышает эффективность и производительность обработки, что позволяет использовать его в производственных условиях.

Ключевые слова – ультразвук, реактор, обработка, тонкий слой, проточная обработка, УЗКС, проточная камера, акустическая энергия, жидкая технологическая среда, молоко, кавитация, звукохимия, сонохимия, ультразвуковая обработка.

I. ВВЕДЕНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ, ОСНОВАННЫЕ НА ПРИМЕНЕНИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ колебаний высокой интенсивности, в значительной степени способствуют развитию наиболее перспективных направлений в различных областях промышленности. Обусловлено это тем, что современный этап развития ультразвуковой техники характеризуется не только эффективным совершенствованием ранее разработанных способов, но и значительным расширением областей применения ультразвуковых технологий. Это развитие базируется на совершенствовании существующих и создании новых ультразвуковых технологических аппаратов, к которым относятся и ультразвуковые реакторы.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Производственная реализация различных технологических процессов, таких как диспергирование (измельчение) материалов под действием ультразвуковых колебаний [1], получение устойчивых эмульсий [2] (масла или нефтепродуктов в воде), экстрагирование, перемешивание, выщелачивание, стерилизация и другие показала, что все перечисленные процессы эффективно реализуются только в условиях создания и поддержания в жидкости кавитационного процесса в

стадии «развитой кавитации». При реализации такого процесса, формируемые в жидкой или жидкодисперсной среде кавитационные пузырьки (в стадии их захлопывания) обеспечивают максимальное энергетическое воздействие на окружающую их жидкость. Для обеспечения режима развитой кавитации в различных средах необходимо вводить ультразвуковые колебания различной интенсивности. Согласно [3, 4], для реализации большинства технологических процессов в воде необходимо обеспечить интенсивность ультразвуковых колебаний более $5 \dots 15 \text{ Вт/см}^2$, а в случае реализации процесса стерилизации – до 500 Вт/см^2 . В вязких жидкостях (маслах, нефти и других) режим развитой кавитации может быть реализован только при интенсивностях более $15 \dots 50 \text{ Вт/см}^2$.

В реальных условиях обеспечение требуемой интенсивности УЗ колебаний равномерно по всему объему обрабатываемой жидкости представляет значительную сложность по следующим причинам:

1. Зона распространения УЗ колебаний высокой интенсивности ограничена малыми расстояниями (не более десятков миллиметров) от излучающей поверхности. Обусловлено это тем, что кавитационные паргазовые пузырьки, образующиеся в жидкости вблизи излучающей поверхности, формируют вместе с этой жидкостью новую среду, волновое сопротивление которой близко к волновому сопротивлению газовой среды. Среда с малым волновым сопротивлением, образуемая вблизи излучающей поверхности, ограничивает выход УЗ колебаний высокой интенсивности в обрабатываемую среду;

2. В процессе распространения ультразвуковых колебаний в среде происходит их затухание, что так же ограничивает зону эффективной обработки. Особенно быстро ультразвуковые колебания затухают в вязких средах.

Таким образом, в режиме высокоинтенсивного кавитационного воздействия на жидкие среды, возможно обеспечить эффективную обработку

только тонких слоев жидкости. Для обеспечения обработки жидких сред в тонком слое, вблизи от излучающей поверхности разработаны и используются специальные ультразвуковые реакторы [5]. Поскольку высокоинтенсивная обработка жидкостей осуществляется только в тонком слое, а размер излучающей поверхности рабочего окончатия (инструмента) всегда ограничен необходимостью обеспечения поршневых колебаний, одновременно можно обрабатывать только малые объемы жидкости, периодически меняя обрабатываемую среду. Малый объем одновременно обрабатываемых технологических сред не позволяет реализовывать УЗ обработку в производственных условиях.

III. КОНСТРУКЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРОТОЧНЫХ РЕАКТОРОВ

Для повышения производительности обработки жидких сред в тонких слоях при реализации различных процессов и химических реакций используют проточную схему обработки. Коллективом лаборатории акустических процессов и аппаратов ранее была разработана конструкция ультразвукового проточного реактора [6], позволяющего реализовать высокоинтенсивную ультразвуковую обработку в тонком слое в проточном режиме. Проточный реактор содержит пьезоэлектрическую колебательную систему, заканчивающуюся рабочим инструментом и технологический объем с патрубками ввода-вывода обрабатываемых сред. Рабочий инструмент размещен в корпусе технологического объема. Корпус технологического объема выполнен в виде двух последовательно установленных и осесимметрично размещенных объемов, разделенных мембраной. Первый из объемов (Рис. 1), представляющий собой пространство между мембраной и излучающей поверхностью предназначен для обеспечения проточной обработки жидкостей в тонком слое. Мембрана может перемещаться относительно излучающей поверхности рабочего инструмента, изменяя при этом толщину слоя обрабатываемой жидкости. Мембрана выполняется из звукопрозрачного материала для обеспечения возможности обработки во втором технологическом объеме химически активных жидкостей, непосредственный контакт которых с рабочим инструментом недопустим.

Такая конструкция частично устраняет указанные выше ограничения, но в тоже время ей присущи следующие недостатки:

1. Максимальная производительность реактора увеличена незначительно, поскольку зона эффективной обработки технологической жидкости ограничена площадью излучающей поверхности рабочего инструмента, который не может быть

увеличен значительно. Обусловлено это тем, что площадь излучения рабочего инструмента должна быть достаточна для обеспечения интенсивности колебаний более $10...50 \text{ Вт/см}^2$. Обеспечить подобную интенсивность излучения возможно только за счет применения специальных концентраторов, увеличивающих амплитуду колебаний пьезокерамических элементов. Размеры серийно производимых промышленностью пьезоэлементов не превышают 50 мм в диаметре. Поэтому площадь излучающей поверхности колебательной системы обычно не может превышать площади пьезоэлемента, т.е. 20 см^2 . При толщине обрабатываемого слоя в 10 мм, одновременно обрабатываемый объем жидкости не превысит 20 см^3 . Этого недостаточно для промышленного применения УЗ проточного реактора;

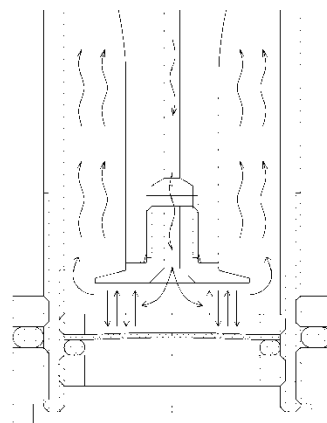


Рис. 1. Фрагмент эскиза рабочего объема, проточного реактора, для реализации обработки жидкостей в тонком слое

2. Один из возможных путей увеличения интенсивности УЗ колебаний – это использование в колебательной системе большого числа пьезоэлементов, установленных параллельно. Но в этом случае максимальные допустимые размеры излучающей поверхности ограничиваются возникновением изгибных колебаний рабочего инструмента, что приводит к резкому снижению интенсивности УЗ колебаний, создаваемых в среде;

3. Наличие звукопрозрачной мембраны (колеблющейся стенки технологического объема) приводит к возникновению ее паразитных колебаний, что искажает распределение колебаний в технологическом объеме и ограничивает интенсивность ультразвуковых колебаний.

Таким образом, для увеличения производительности и эффективности непрерывной обработки технологических сред в ультразвуковых аппаратах (реакторах) необходимо увеличивать поверхность излучения.

Для решения проблемы была предложена новая конструкция проточного реактора. УЗ про-

точный реактор содержит соединенный с источником УЗ колебаний излучатель и проточную камеру. Проточная камера имеет внутреннюю цилиндрическую поверхность, внутри камеры вдоль ее оси размещен излучатель, выполненный в виде стержня, состоящего из последовательно расположенных цилиндрических участков двух диаметров, соединенных между собой плавными переходами. Суммарные длины цилиндрических участков излучателя малого диаметра вместе с половиной длины участка большего диаметра соответствуют половине длины волны УЗ колебаний в материале излучателя, а размер и форма плавных переходов выбраны из условия обеспечения заданного распределения плотности акустической энергии между излучателем и внутренней цилиндрической поверхностью проточной камеры.

Кроме того, на внутренней поверхности проточной камеры, на расстояниях, соответствующих половине длины волны УЗ колебаний в материале проточной камеры выполнены выступы. Габаритный размер выступов меньше максимального диаметра излучателя. Выступы выполнены на участках, расположенных напротив участков малого диаметра излучателя, симметрично относительно участков излучателя большего диаметра, а проточная камера соединена с источником УЗ колебаний.

Эскиз предлагаемой конструкции УЗ проточного реактора представлен на Рис. 2.

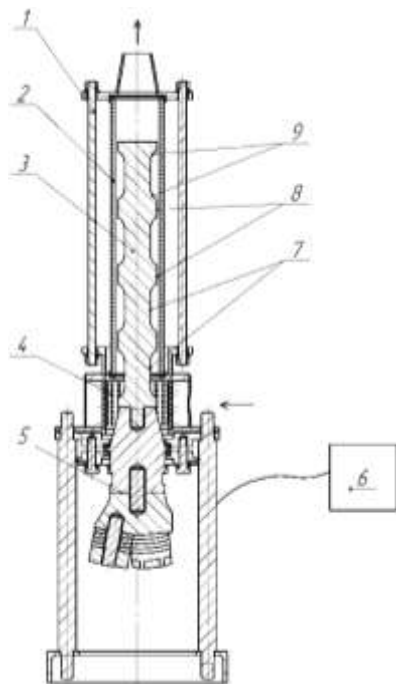


Рис. 2. Конструкция УЗ проточного реактора

Ультразвуковой проточный реактор содержит расположенные в корпусе 1 проточную камеру 2

и излучатель 3, соединенный с источником УЗ колебаний 5. Источник УЗ колебаний 5 представляет собой пьезоэлектрический преобразователь электрической энергии ультразвуковой частоты в механические ультразвуковые колебания. Для питания источника УЗ колебаний (пьезоэлектрического преобразователя) служит ультразвуковой генератор 6, преобразующий электрические колебания промышленной частоты в электрические колебания ультразвуковой частоты. Излучатель представляет собой цельный стержень, состоящий из последовательно расположенных цилиндрических участков двух диаметров 7 и 8, соединенных между собой плавными переходами 9, причем суммарные длины цилиндрических участков излучателя малого диаметра 7, вместе с половиной длины участка большего диаметра 8 соответствуют половине длины волны УЗ колебаний в материале излучателя. Размер и форма плавных переходов 9 выбираются из условия обеспечения заданного распределения плотности акустической энергии между излучателем 3 и внутренней цилиндрической поверхностью проточной камеры 2. Проточная камера 2 представляет собой полый цилиндр, к одной стороне которого присоединена система крепления источника ультразвуковых колебаний, а так же система подачи жидкости, включающая цилиндрический решетчатый элемент 4. На противоположном конце закреплена система вывода обработанной жидкости из реактора. На внутренней поверхности проточной камеры, на расстояниях, соответствующих половине длины волны УЗ колебаний в материале проточной камеры, выполнены выступы 10, габаритный размер которых меньше максимального диаметра излучателя, выступы выполнены на участках, расположенных напротив участков 7 малого диаметра излучателя, симметрично относительно участков излучателя большего диаметра 8. Проточная камера соединена с источником УЗ колебаний 5.

Ультразвуковой проточный реактор работает следующим образом. Обрабатываемая жидкость поступает в полость с цилиндрическим решетчатым элементом 4, прохождение через который обеспечивает равномерное распределение и скорость потока жидкости по всей площади поперечного сечения проточной камеры. В процессе работы колебательной системы между излучателем 3 и стенками проточной камеры 2, создается ультразвуковое поле, с интенсивностью, необходимой и достаточной для образований и поддержания режима развитой кавитации во всем объеме пространства между стенками проточной камеры и поверхностью излучателя. В результате кавитационного воздействия в обрабатываемой жидкости создаются условия для протекания

различных процессов, таких как стерилизация, эмульгирование, пастеризация, разжижение и другие, в зависимости от интенсивности колебаний, скорости потока, типа и вязкости обрабатываемой жидкости. Максимальная интенсивность УЗ воздействия обеспечивается в зонах 11 (см. Рис. 3), между излучателем и внутренней стенкой камеры. Повышению эффективности ультразвукового воздействия способствуют синхронные, с колебаниями излучателя, ультразвуковые колебания стенки проточной камеры, которая соединена с источником УЗ колебаний.

Для предотвращения застаивания обрабатываемой жидкости около стенок на внутренней поверхности проточной камеры, на расстояниях, соответствующих половине длины волны УЗ колебаний в материале проточной камеры выполнены выступы 10, габаритный размер которых меньше максимального диаметра излучателя, выступы выполнены на участках, расположенных напротив участков малого диаметра излучателя, симметрично относительно участков излучателя большего диаметра.

Переходы между участками большого и малого диаметра излучателя могут иметь различную форму (рис. 2), в зависимости от требуемого распределения плотности акустической энергии между излучателем и внутренней цилиндрической поверхностью проточной камеры. В свою очередь, форма распределения плотности акустической энергии зависит от интенсивности ультразвуковых колебаний, размеров излучателя и проточной камеры, профиля переходов, профиля выступов на внутренней поверхности проточной камеры и свойств обрабатываемой жидкости.

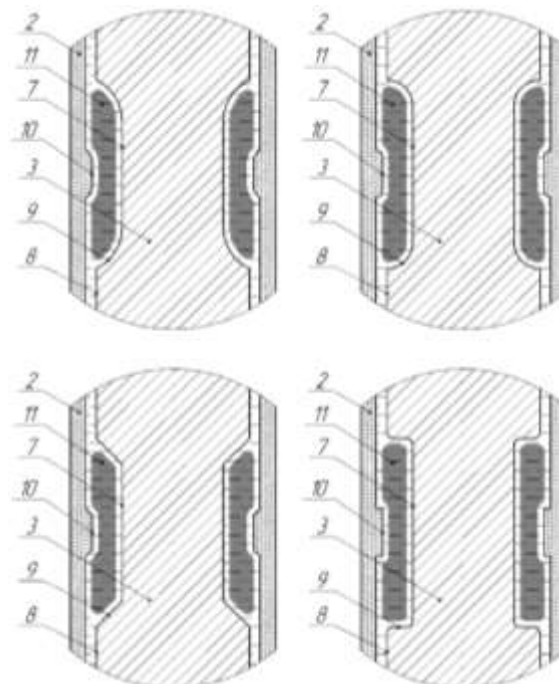


Рис. 3. Формы переходов между участками большого и малого диаметра излучателя.

Площадь излучающей поверхности проточной камеры увеличена в 10...15 раз, по сравнению с предыдущей конструкцией проточного реактора. Так, при большом диаметре излучателя 45 мм, а малом 30 мм и длине излучателя в пять длин волн УЗ колебаний только поверхность излучения, соответствующая плавным переходам, соответствует 150 см². При большом диаметре излучателя 70 мм, а малом 50 мм и длине излучателя в пять длин волн УЗ колебаний поверхность излучения, соответствующая плавным переходам, превышает 300 см². Одновременно обрабатываемый объем жидкости может составлять несколько литров, что позволяет использовать предложенный реактор для решения производственных задач.

Преимуществами предложенной конструкции ультразвукового проточного реактора являются.

1. Обработка жидкости производится в тонком слое, что предоставляет возможность создания ультразвукового поля высокой интенсивности (до 500 Вт/см²).

2. Обеспечивается равномерная обработка всего объема протекающей жидкости, т.к. между излучателем и камерой формируется объем с развитой кавитацией.

3. В случае, если требуется меньшая интенсивность ультразвуковых колебаний, можно увеличить скорость потока обрабатываемой жидкости, и, соответственно, производительность.

IV. ВЫВОДЫ

Основной техничеcкий результат предложенной конструкции это увеличение производительности процесса при условии обеспечения требуемой повышенной интенсивности и равномерности ультразвуковой обработки жидких технологических сред. Особенно эффективным является применение предложенного УЗ проточного реактора для высокоскоростной обработки вязких (нефти, масел, мазутов, глицерина, густых соков, сливок, экстрактов и т.п.) жидкостей и жидкостей с высокой степенью наполнения твердыми веществами (густые суспензии, нефтяные отходы с высоким содержанием песка, мазуты с механическими включениями и т.п.).

Для проверки эффективности были проведены эксперименты по стерилизации и гомогенизации молока, в результате которых была достигнута производительность более 1 м³/ч при потребляемой электрической мощности не более 3000 ВА. Обсемененность молока при этом снижалась не менее чем в 100 раз, а число жировых шариков размером менее 2 мкм в молоке превышало 80%. При этом снижение содержания витамина С не превышало 5...12%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Косолапов А.Т. – «Применение ультразвука к исследованию вещества». (МОПИ), 1957.
- [2] Б.А. Агранат, В.И. Башкиров, Ю.И. Китайгородский, Н.Н. Хавский «Ультразвуковая технология» М., «Металлургия», 1974.
- [3] Розенберг Л.Д. «Физика и техника мощного ультразвука, том III. Физические основы ультразвуковой технологии» М., 1970.
- [4] Гершгал Д.А., Фридман В.М. «Ультразвуковая технологическая аппаратура» М., «Энергия» 1976.
- [5] Кардашев Г.А., Михайлов П.Е. «Тепломассообменные акустические процессы и аппараты» М., «Машиностроение», 1973.
- [6] Патент РФ №2272670 «Ультразвуковой химический реактор».