

Повышение Эффективности Ультразвуковой Кавитационной Обработки Вязких Жидких Сред

Владимир Н. Хмелёв, д.т.н., *Senior Member, IEEE*, Сергей С. Хмелёв, Денис С. Абраменко,
Сергей Н. Цыганок, к.т.н.

Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ им И.И. Ползунова

Аннотация – Статья посвящена проблемам, возникающим при ультразвуковой обработке жидких сред с высоким затуханием ультразвуковых колебаний, показываются недостатки существующего ультразвукового оборудования. Предлагаются новые подходы реализации процессов ультразвуковой кавитационной обработки вязких сред, позволяющие реализовать новые технологические процессы, нереализуемые в обычных условиях без ультразвукового воздействия.

Ключевые слова – Ультразвук, вязкие жидкости, тонкий слой, резонансные промежутки, кавитация.

I. ВВЕДЕНИЕ

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ высокой интенсивности позволяет реализовать или интенсифицировать различные стадии производства, переработки и модификации высокомолекулярных (ВМС) соединений.

Многочисленные лабораторные исследования [1, 2] доказывают, что ультразвуковые колебания позволяют ускорять процессы полимеризации и деполимеризации, смешивания расплавов, получения консистентных смазок, красок, растворения нефтешламных отложений, диспергирования и равномерного распределения твердых веществ в полимерных материалах и технических маслах.

Одним из наиболее перспективных направлений применения ультразвуковых колебаний при создании новых полимерных материалов является диспергирование кластеров и равномерное распределение наночастиц в вязких полимерах и смолах при получении полимерных нанокомпозитивов.

Технология ускорения процессов и получения новых материалов заключается в контактном введении ультразвуковых колебаний непосредственно в создаваемый полимерный материал. Известно, что существует несколько вариантов контактного введения ультразвуковых колебаний в жидкие среды. Самые распространенные – это обработка путем погружения рабочего инстру-

мента ультразвуковой колебательной системы в обрабатываемый объем или обработка в реакторах проточного типа, содержащих проточную камеру и расположенный в ней излучатель ультразвуковых колебаний.

Скорость и качество получаемого материала определяется параметрами вводимых ультразвуковых колебаний и возможностью их распространения в технологическом объеме.

Ультразвуковое воздействие настолько эффективно и уникально, что аналогичных результатов невозможно достичь высокоскоростным перемешиванием и низкочастотной вибрацией. Уникальность воздействия обеспечивается возможностью возникновения в жидких средах кавитации.

Лабораторные и производственные исследования различных технологических процессов позволили установить, что необходимым условием реализации и ускорения процессов в жидких средах под действием ультразвука является создание и поддержание в жидкости кавитационного процесса, возникающего при превышении интенсивностью ультразвуковых колебаний определенных значений [3]. При реализации кавитационного процесса в жидкой или жидкодисперсной средах формируются и схлопываются, с созданием ударных волн и коммулятивных выбросов, парогазовые пузырьки, обеспечивающие в стадии их захлопывания максимальное энергетическое воздействие на окружающую их жидкость.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

К сожалению, широкие возможности ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для интенсификации различных процессов и получения новых полимерных материалов не получили широкого применения из-за отсутствия специализированного оборудования, способного обеспечить кавитационный режим обработки вязких полимерных материалов. Причины отсутствия такого оборудования связаны с принципиальными физическими ограничениями, возникающими

при попытках реализации ультразвуковых технологий в полимерных материалах. Эти ограничения обусловлены аномально высоким затуханием ультразвуковых колебаний в вязких материалах. Такое затухание ультразвуковых колебаний в вязких средах ограничивает область распространения ультразвуковых колебаний и размеры зон, в которых интенсивность колебаний достигает значений, достаточных для реализации кавитационного процесса. Очевидно, что, даже в случае реализации кавитационного процесса в небольшом объеме, вблизи излучающей поверхности и обеспечении интенсивного перемешивания обрабатываемой технологической среды, производительность процесса будет очень малой, не приемлемой для производственного применения и равномерность обработки всего объема среды обеспечить практически невозможно.

В связи с высокой эффективностью ультразвуковой обработки при ускорении процессов и получении новых материалов, невозможностью ее практического применения из-за аномально высокого затухания колебаний в вязких средах и необходимостью обеспечения равномерной обработки увеличенных объемов обрабатываемых сред, необходимо предложить и разработать новые способы введения и распространения ультразвуковых колебаний в средах с высоким затуханием и реализовать предложенные способы в реальных ультразвуковых аппаратах, пригодных для производственного применения в различных отраслях промышленности.

Но прежде необходимо выработать общие требования к мощностным параметрам проектируемых аппаратов, рассмотрев возможности имеющихся.

III. ТЕОРИЯ

Как было показано, аномально высокое затухание УЗ колебаний в полимерных материалах, ограничивает возможности обработки больших объемов. Очевидным путем обработки вязких жидких сред является их обработка в реакторах проточного типа содержащих проточную камеру и расположенный в ней излучатель ультразвуковых колебаний. Отличительной особенностью является то, что расстояние от излучателя до отражающей стенки проточной камеры не превышает расстояния, на котором распространяющиеся в объеме ультразвуковые колебания затухнут до амплитуды, недостаточной для возникновения кавитации в данной жидкости. Такой подход условно можно назвать обработкой в «тонких слоях».

Однако, даже маленькие объемы вязких жидкостей в «тонких слоях» невозможно обрабатывать, применяя современные ультразвуковые

аппараты. Необходимость создания в вязких жидкостях ультразвуковых колебаний с интенсивностью более 20 Вт/см^2 , для реализации кавитационного режима, обуславливает необходимость работы используемых на практике ультразвуковых аппаратов в недопустимых мощностных режимах. Почему это происходит?

Практически все используемые в настоящее время ультразвуковые аппараты выполнены по аналогичным конструктивным схемам, имеют одинаковые функциональные возможности при одинаковых мощностных параметрах. Рассмотрим возможность применения типичного аппарата мощностью 1000 Вт (аппарат серии «Волна-М» модель УЗГА-1/22-ОМ). Такой аппарат использует двухполуволновую колебательную систему с рабочим окончанием грибковой формы диаметром 40 мм, совершающим поршневые колебания. При площади излучения в 25 см^2 для реализации кавитационного режима необходимо излучать в обрабатываемую вязкую жидкость не менее 500 Вт акустической энергии. При общем коэффициенте полезного действия аппарата, не превышающем 30%, при введении колебаний в вязкие среды, потребляемая мощность ультразвукового аппарата должна превышать 1500 Вт, что превышает возможности имеющегося аппарата. По этой причине, при создании и использовании аппаратов для обработки вязких сред, при прочих равных условиях, необходимо уменьшать площадь излучающей поверхности рабочего инструмента. При диаметре излучателя грибкового типа в 30 мм (площадь излучения 15 см^2) и заданной интенсивности, потребляемая мощность аппарата должна быть не более 1000 Вт. Однако, это влечет за собой уменьшение объема одновременно обрабатываемой жидкости.

Для увеличения объема одновременно обрабатываемых объемов вязкой жидкости необходимо увеличение площади излучающей поверхности. Очевидным путем решения этой проблемы является одновременное использование нескольких ультразвуковых аппаратов. Для практической реализации такого подхода разработан и широко используется ультразвуковой аппарат «Поток-3» модель УЗАП-2,5/22-ОП, в котором вязкая жидкость в одном технологическом объеме обрабатывается одновременно тремя параллельно работающими ультразвуковыми колебательными системами. Схематичный вид и эскиз технологического объема аппарата «Поток-3» представлен на Рис.1 и Рис.2 соответственно.

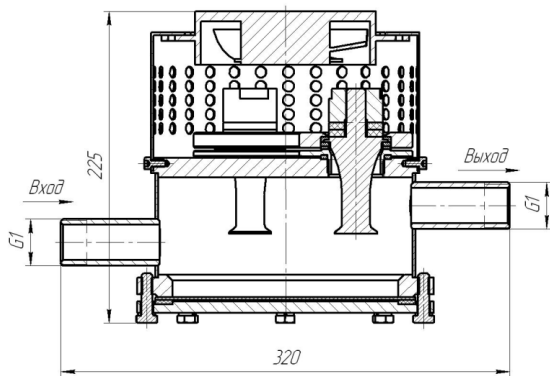


Рис.1. Схематичный вид технологического объема аппарата «Поток-3»

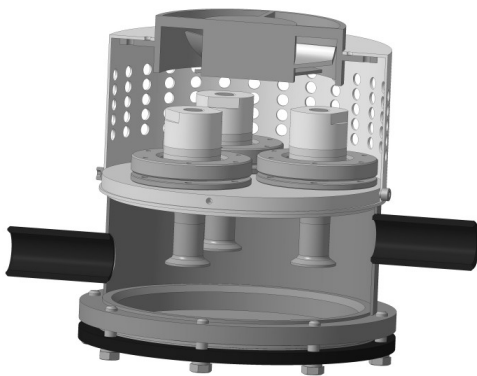


Рис.2. Эскиз технологического объема аппарата «Поток-3»

Поскольку изготовление идентичных колебательных систем невозможно, питание параллельно работающих систем приходится осуществлять от трех отдельных генераторов.

Отличительной особенностью рассмотренных аппаратов является обработка вязких жидкостей в тонких слоях. Главный недостаток такого подхода заключается в том, что при достаточно большом перечне обрабатываемых жидкостей, значительно различающихся по своим свойствам необходимо создавать различные аппараты и проточные камеры, устанавливая для каждой из жидкостей величину необходимого и достаточного для обработки слоя.

Решением проблемы может стать обработка жидких вязких сред через резонансные промежутки, таким образом, что в момент возникновения колебаний на поверхности рабочего излучающего инструмента расстояние от этой поверхности до отражающей стенки реактора кратко $\lambda/4$ в жидкости, заполняющей реактор. Когда в жидкости создается ультразвуковое поле, амплитуда давления которого превышает порог возникновения кавитации P_m , в ней возникает кавитационное облако. При этом в обрабатываемом объеме под излучающей поверхностью существенно меняются акустические свойства сре-

ды, следовательно, меняются резонансные условия. В данном случае необходимо путем перемещения рабочего излучающего инструмента менять расстояние от отражающей стенки, устанавливая резонансный размер в режиме кавитации. При такой обработке возможно достижение резонансных явлений в различных жидких средах при расстояниях, превышающих несколько $\lambda/4$.

Кроме параллельного соединения отдельных колебательных систем возможно построение колебательной системы с многополуполновым излучателем, представляющим собой систему из последовательно состыкованных единичных полуполновых элементов [4].

Примером использования таких систем могут служить аппараты серии «Булава-П» модель УЗАП-3/22-ОП. Отличительной особенностью их УЗ колебательных систем является то, что рабочий излучающий инструмент выполнен в виде стержня, состоящего из последовательно расположенных участков цилиндрической формы различного диаметра. Излучение УЗ колебаний осуществляют с поверхности излучателя в зонах переходов между цилиндрическими участками различного диаметра. УЗКС закрепляется на оси проточной камеры реактора вдоль направления потока движения жидкости. Развитая поверхность излучения позволяет проводить обработку большого объема жидкости в единицу времени, а использование многопакетного пьезоэлектрического преобразователя [5], в котором энергия нескольких пьезопреобразователей суммируется в излучающем инструменте и позволяет достичь интенсивности ультразвуковых колебаний до 20 Вт/см^2 . Сознание такой конструкции, имеющей площадь излучающей поверхности до 200 см^2 позволяет вводить в образующую среду ультразвуковые колебания с мощностью более 3000 Вт , при подаче электрических колебаний, мощностью не менее 8000 Вт .

При реализации на базе такого излучателя ультразвукового проточного реактора эффективная обработка всего объема вязкой жидкости в реакторе возможна только в случае обеспечения непрерывной смены жидкости в объемах, между соседними участками излучателя большего сечения. Обеспечить такую смену в цилиндрическом объеме невозможно, даже при малой скорости протока, с учетом перемешивающего воздействия ультразвуковых колебаний и распространения колебаний за счет многократных отражений. В этом случае обработке подвергаются маленькие объемы жидкости, находящиеся между участками большего диаметра, а основной объем протекающей жидкости практически не подвергается ультразвуковому воздействию.

Устранение указанных недостатков возможно при реализации следующего технического решения, когда ультразвуковые колебания направляются непосредственно в объем камеры, обеспечивая многократные отражения УЗ колебаний от внутренней поверхности проточной камеры и участков излучателя и создания условий распространения колебаний, обеспечивающих резонансное усиление УЗ колебаний. Конструкция и принцип работы предлагаемого УЗ проточного реактора поясняются соответственно Рис.3 и Рис.4.

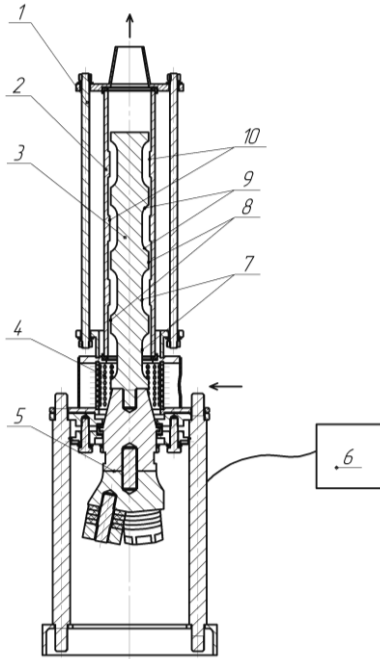


Рис.3. Конструкция УЗ проточного реактора

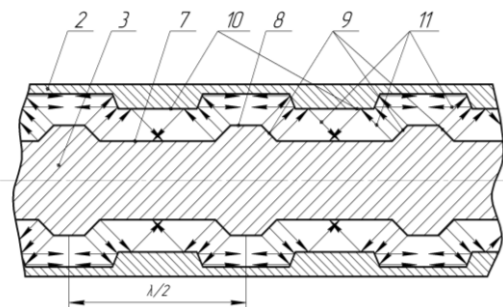


Рис.4. Принцип работы УЗ проточного реактора

Ультразвуковой проточный реактор, выполненный по предложенной схеме, работает следующим образом. Обработываемая жидкость поступает в полость через цилиндрический решетчатый элемент 4, который обеспечивает равномерное распределение и скорость протока жидкости по всей площади поперечного сечения проточной камеры. В процессе работы происходит формирование УЗ колебаний 11 за счет поршневых движений, совершаемых поверхностями плавных переходов 9. Направление рас-

пространения УЗ колебаний - перпендикулярно к поверхностям плавных переходов. Таким образом, форма переходов определяет направление распространения УЗ колебаний 11, что позволяет изменять направление излучаемых колебаний в объеме реактора. Форма плавных переходов 9 обеспечивает направление УЗ колебаний во внутренний объем проточной камеры и уменьшение сопротивления потоку. Радиальная и экспоненциальная форма плавных переходов могут обеспечивать, кроме распространения в заданном направлении, фокусировку ультразвуковых колебаний 11. Отражатели ультразвука 10 расположены таким образом, что обеспечивают отражение УЗ колебаний в направлении участков излучателя меньшего сечения, а так же в объеме камеры между отражателями ультразвука. Таким образом, обеспечивается равномерное распределение УЗ колебаний во всем внутреннем объеме проточной камеры. Форма излучателя и внутренняя поверхность проточной камеры обеспечивают создание последовательности камер, в каждой из которых создаются условия для резонансного усиления распространяющихся УЗ колебаний. Таким образом, во внутреннем объеме 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.

Таким образом, предлагаемое техническое решение обеспечивает увеличение производительности процесса обработки жидких сред при обеспечении равномерной обработки всего объема жидкости

IV. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что существующее ультразвуковое оборудование не пригодно для кавитационной обработки вязких жидких сред, в силу необходимости работы в недопустимых мощностных режимах и малой производительности процесса.

Предложен новый подход к ультразвуковой обработке вязких жидких сред в проточных реакторах с излучателем протяженного типа, и проточной камерой, с внутренней поверхностью, создающей условия для резонансного усиления распространяющихся колебаний.

Использование полученных результатов, позволит создать и внедрить ультразвуковое технологическое оборудование в промышленных условиях, что обеспечит повышение эффективности процессов обработки вязких сред, но и позволит реализовать новые технологические

процессы, нереализуемые в обычных условиях без УЗ воздействия.

- [1] Хмелев В.Н. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве/ БТИ АлтГТУ. – Бийск, 2007. – 400 с.
- [2] Хмелев В.Н. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве/ В.Н. Хмелев, О.В. Попова. – Барнаул: АлтГТУ, 1997. – 160 с.
- [3] Ультразвуковая технология [Текст] / под ред. Б.А. Аграната. – М.: Металлургия, 1974. – 505 с.
- [4] Khmelev, V.N. High Power Ultrasonic Oscillatory Systems [Текст] / V.N. Khmelev [и др.] // International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007 / NSTU. – Novosibirsk, 2007.
- [5] Ультразвуковая колебательная система [Текст]: пат. 2332266 Российская Федерация: Хмелев В.Н., Савин И.И., Цыганок С.Н., Барсуков Р.В., Лебедев А.Н.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».



Сергей Н. Цыганок родился в Новосибирске, Россия, 1975. Кандидат технических наук, доцент. Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых. Областью научных интересов является разработка высокоэффективных пьезоэлектрических колебательных систем для ультразвуковых технологических аппаратов.



Владимир Н. Хмелев (М'00, SM'04)— заместитель директора Бийского технологического института по НИР, профессор, доктор технических наук. Заслуженный изобретатель России. Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых. Область научных интересов – ультразвуковая техника и технологии, применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для интенсификации технологических процессов и изменения свойств веществ и материалов.



Сергей С. Хмелев родился в г. Прокопьевске, Россия, 1985. Аспирант Бийского технологического института. Область научных интересов – разработка и создание ультразвуковых колебательных систем.



Денис С. Абраменко родился в 1982 году, в г. Бийске. В 2005 закончил БТИ по специальности «Информационно-измерительная техника и технологии». Инженер БТИ. Область научных интересов: контроль, управление и измерение параметров ультразвукового оборудования.