

Автоматизация Процесса Установления Режима Развитой Кавитации в Жидких Средах

Владимир Н. Хмелев, Андрей В. Шалунов, Роман В. Барсуков, Алексей Н. Сливин, Сергей Н. Цыганок, Сергей В. Левин, Татьяна А. Демидова.

Аннотация — В работе рассмотрены процессы, происходящие в жидких средах при воздействии на них ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности. На основе теоретического анализа кавитационных явлений выявлены критерии, определяющие состояние среды в режиме развитой кавитации, установлены параметры электронных генераторов, обеспечивающие установление и поддержание этого режима, предложено и разработано специальное электронное устройство для автоматического установления и поддержания режима развитой кавитации в различных технологических средах.

И. ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковая технология относится к тем сравнительно молодым областям техники, которые получили бурное развитие в условиях чрезвычайно резкого расширения номенклатуры технологических процессов. Развитие ультразвуковой технологии позволило решить проблемы экстрагирования животного и растительного сырья, стерилизация жидкостей, мелкодисперсного распыления красителей, лекарственных препаратов, и тяжелых топлив, получения эмульсий и сверх тонких суспензий, мойки и очистки деталей без применения горючих и токсичных растворителей.

Наибольшие распространения среди задач, решаемых при помощи ультразвуковых технологий, получили процессы экстрагирования полезных веществ из животного и растительного сырья, диспергирования и получения эмульсий и сверхтонких суспензий. Применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности в этих случаях позволило повысить скорость протекания процессов в десятки раз, и в случае экстракционных процессов так же увеличить выход готового продукта. Стало возможным получение таких мелких дисперсий и тонких эмульсий, которые невозможно было получить традиционными методами.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эффективность применения ультразвуковых колебаний

высокой интенсивности определяется развитием в обрабатываемой среде кавитационных процессов. Кавитация – это возникновение, под действием ультразвуковых колебаний высокой интенсивности в жидких средах, газовых полостей с последующим их захлопыванием. Кавитация возникает при переходе от ультразвуковых колебаний малой амплитуды к колебаниям с большей амплитудой, при которых сплошность жидкости нарушается, и в ней появляются образующиеся и захлопывающиеся кавитационные пузырьки, обуславливающие эффективность ультразвукового воздействия. При дальнейшем увеличении амплитуды колебаний кавитационные пузырьки увеличиваются в размерах и перестают захлопываться, совершая гармонические колебания с частотой ультразвукового воздействия. Эффективность ультразвукового воздействия при этом стремится к нулю, что схематично иллюстрируется на рис. 1[1].

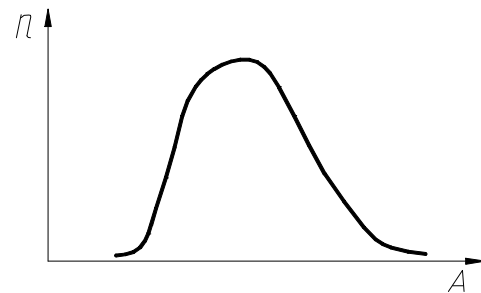


Рис. 1. Эффективность кавитации в жидкости от амплитуды ультразвуковых колебаний

Аналогичные зависимости характерны для большинства технологических процессов. Следовательно, для различных технологических процессов, существует вполне определенная амплитуда ультразвуковых колебаний, при которой эффективность кавитации и, следовательно, эффективность ультразвукового воздействия будет максимальной. Она зависит от ряда факторов: вида излучателя ультразвука, параметров обрабатываемой среды и т. д. Определение этой амплитуды для каждого процесса есть основная задача при осуществлении оптимального ультразвукового воздействия.

В настоящее время, для определения амплитуды ультразвуковых колебаний, при которой наблюдается максимальная эффективность ультразвукового воздействия, используется экспериментальный метод. Он заключается в проведении ряда экспериментов, в ходе которых амплитуду ультразвуковых колебаний увеличивают. В результате, для каждого процесса экспериментально устанавливают ту амплитуду, при которой результаты эксперимента дают наилучший результат (например, минимальное время проведения процесса растворения или эмульгирования).

Используемый метод обладает рядом недостатков: необходимостью дополнительного расхода сырья на проведение опытов, невысокой точностью получаемых результатов, невозможностью учета изменения параметров среды при проведении ультразвукового воздействия (например, изменения температуры), необходимостью повторения опытов при изменении условий ультразвукового воздействия (например, при изменении концентрации получаемой эмульсии).

В связи с этим возникла необходимость в решении проблемы поиска и практической реализации способа автоматической установки и поддержания амплитуды ультразвуковых колебаний, при которой в обрабатываемой среде наблюдается максимальная эффективность кавитационного процесса.

III. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для решения проблемы необходимо проанализировать процессы, происходящие в среде и ультразвуковом аппарате при различных режимах ультразвукового воздействия и выбрать параметр обрабатываемой среды, характеризующийся максимальной корреляцией со степенью эффективности кавитации в обрабатываемой технологической среде. Известно, что эффективность кавитации прямо пропорциональна степени развитости кавитации, которая в свою очередь однозначно определяется индексом кавитации. Индексом кавитации называется отношение [2]:

$$K = \frac{\Delta V}{V} \quad (1)$$

где, V – объем в кавитационной области,

ΔV - объем всех находящихся внутри объема V кавитационных пузырьков в фазе их наибольшего расширения.

Индекс кавитации определяется как отношение суммарного объема газовых кавитационных пузырьков ко всему объему кавитационной области. Величина K лежит в пределах $0 \leq K \leq 1$. Так как размеры отдельных пузырьков и их скоплений оказываются существенно меньше объема кавитационной области, то возможно рассматривать жидкость вместе с имеющимися в ней газовыми вкраплениями, как некую новую среду с эквивалентными акустическими характеристиками, отличными от акустических характеристик жидкости при

отсутствии кавитации. Одной из основных акустических характеристик жидкости является ее волновое сопротивление [3]. Волновое сопротивление жидкости (или любой другой среды) может быть определено по следующей формуле:

$$R = \rho * c \quad (2)$$

где ρ – плотность среды;

c – скорость распространения звуковых волн в среде.

Из определения следует, что волновое сопротивление жидкости будет уменьшаться с увеличением степени развитости кавитации. Для определения степени корреляции между изменением волнового сопротивления жидкости и изменением индекса кавитации был проведен ряд экспериментов. Индекс кавитации определялся при помощи dilatометрического способа описанного в [4]. Изменение волнового сопротивления жидкости проводилось по методике описанной в [3]. Результаты экспериментов представлены на рис. 2.

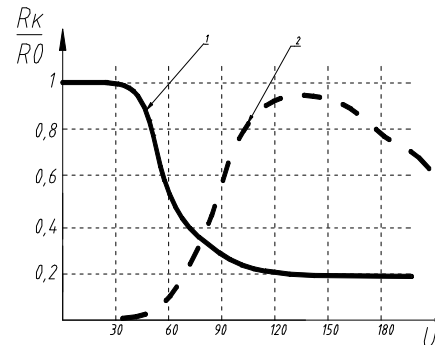


Рис. 2. Зависимость волнового сопротивления воды (1) и индекса кавитации (2) от напряжения питания электроакустического преобразователя.

Данные, характеризующие изменение волнового сопротивления представлены в виде зависимости отношения волнового сопротивления кавитирующей жидкости к волновому сопротивлению жидкости в отсутствии кавитации. Данные для индекса кавитации приведены вне масштабной сетки.

Из рисунка 2 следует, что при увеличении напряжения питания электроакустического преобразователя, индекс кавитации увеличивается, а волновое сопротивление резко уменьшается и при достижении индексом кавитации значений близких к единице, приближаясь к значению волнового сопротивления воздуха. При дальнейшем увеличении напряжения питания электроакустического преобразователя происходило уменьшение индекса кавитации, а значение волнового сопротивления оставалось на прежнем уровне. При этом зависимость волнового сопротивления от индекса кавитации имеет не экстремальный характер. На основании этого зависимость волнового сопротивления жидкости от напряжения питания электроакустического преобразователя можно условно разбить на четыре участка показанных на рисунке

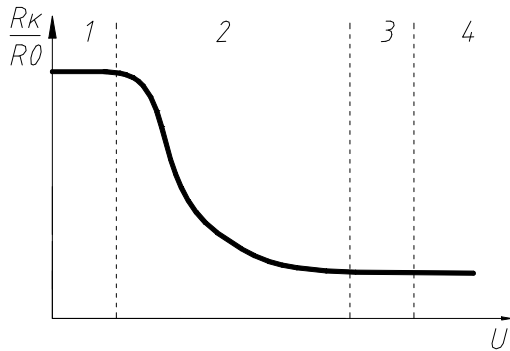


Рис. 3. Зависимость волнового сопротивления жидкости от напряжения питания электроакустического преобразователя

3:

Участок 1 соответствует малым мощностям ультразвукового воздействия и отсутствию в жидкости режима кавитации. На этом участке волновое сопротивление жидкости остается постоянным и соответствует волновому сопротивлению жидкости без УЗ воздействия.

Участок 2 соответствует зарождению и развитию кавитации в жидкости. При этом происходит образование газовых пузырьков вокруг излучающей поверхности рабочего инструмента, падение плотности обрабатываемой жидкости, и как следствие резкое уменьшения акустического сопротивления среды.

Участок 3 соответствует режиму установившейся, развитой кавитации. При этом акустическое сопротивление жидкости остается постоянным, а вокруг излучающей поверхности рабочего инструмента имеется стационарное кавитационное облако, число воздушных пузырьков в котором близко к максимально возможному. Это является условием наиболее эффективного протекания процессов эмульгирования, диспергирования экстракции и ряда других процессов, осуществляемых при ультразвуковом воздействии.

Участок 4 соответствует режиму чрезмерно развитой кавитации. При этом газовые пузырьки в кавитационном облаке за счет объединения увеличиваются в размерах и перестают захлопываться, происходит их пульсация с частотой ниже частоты ультразвука, на частоте субгармоник. В этом случае эффективность описанных процессов значительно снижается, а потребление

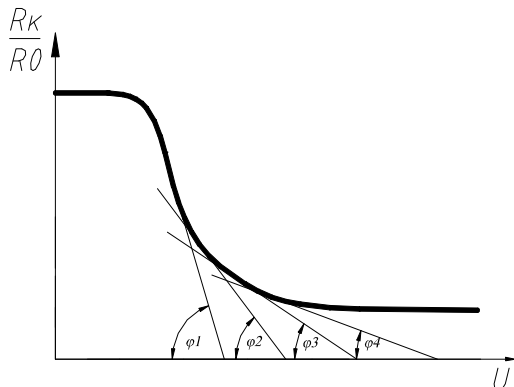


Рис. 4. Касательные к графику изменения волнового сопротивления жидкости

мощности аппарата от электрической сети возрастает.

Из полученных результатов следует что, для поддержания в жидкости режима развитой кавитации необходимо поддерживать волновое сопротивление жидкости в границах третьего участка. Так как зависимость волнового сопротивления жидкости от индекса кавитации имеет не экстремальный характер, то для определения участка перехода зависимости волнового сопротивления жидкости на пологий участок, можно воспользоваться методом касательных. При этом методе отпадает необходимость измерения абсолютных значений волнового сопротивления, и достаточно измерять лишь изменение относительно сопротивления жидкости в отсутствии кавитации. Метод иллюстрируется рисунком 4, на котором показана зависимость изменения волнового сопротивления жидкости и касательные, проведенные к нему.

Из рисунка 4 видно, что угол наклона касательной к кривой зависимости волнового сопротивления жидкости от напряжения питания уменьшится с увеличением напряжения питания колебательной системы. При выходе кривой изменения волнового сопротивления на пологий участок, угол наклона касательной становится равным нулю. Это условие определяет возникновения в жидкости режима развитой кавитации.

IV. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Для практической реализации предложенного способа установления и поддержания режима развитой кавитации в жидкой среде необходим простой и надежный способ измерения волнового сопротивления жидкости. Существующие способы измерения волнового сопротивления жидкости основаны на использовании внешних гидроакустических датчиков. Но это значительно усложняет конструкцию, а в ряде случаев технически нереализуемо. Кроме того, введение датчиков в той или иной степени вносит изменение в протекающий технологический процесс и искажает картину регистрируемого процесса. Кроме того, основное влияние оказывает слой близкий к излучающей поверхности,

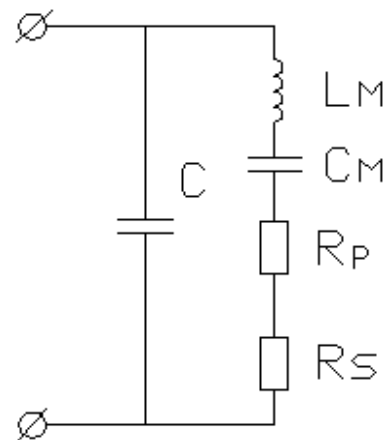


Рис. 5. Эквивалентная схема ультразвуковой колебательной системы

введение в который датчиков невозможно.

Для устранения указанных недостатков был предложен метод измерения электрических параметров ультразвуковой колебательной системы, используемой для создания акустического поля в технологической среде. Таким образом, сама рабочая УЗКС выступает в качестве датчика параметров технологической среды.

Для пояснения предложенного способа измерения волнового сопротивления жидкости проанализируем эквивалентную схему (см. рис. 5) ультразвуковой колебательной системы на основе пьезоэлектрических элементов [5]. Все дальнейшие выводы сделанные для пьезоэлектрического преобразователя могут быть использованы для магнитострикционного преобразователя при замене эквивалентной схемы пьезоэлектрического преобразователя, схемой магнитострикционного преобразователя.

где, C_k – собственная электрическая емкость колебательной системы;

L_m – индуктивность эквивалентная массе материала колебательной системы;

C_m – емкость эквивалентная упругости материала колебательной системы;

R_p – сопротивление потерь в материале колебательной системы;

R_s – сопротивление излучению колебательной системы.

Сопротивление R_s пропорционально волновому сопротивлению среды с коэффициентом пропорциональности K . Коэффициент пропорциональности зависит от конструкции колебательной системы (коэффициента усиления) и площади излучающей накладки.

Работа колебательной системы имеет смысл только при соответствии рабочей частоты генератора собственной механической частоте колебательной системы. На резонансной частоте колебательной системы, т. е. на частоте резонанса элементов L_m и C_m , их сопротивление уменьшается до нуля, и эквивалентная схема колебательной системы может быть представлена в виде, показанном на рисунке 6.

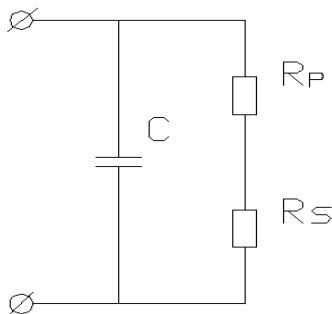


Рис. 6. Эквивалентная схема ультразвуковой колебательной системы в режиме резонанса

Из рисунка 6 следует, что для измерения волнового сопротивления среды необходимо измерять ток,

протекающий через сопротивление излучению колебательной системы R_s и регистрировать падение напряжения на нем. Так как необходимо контролировать зависимость волнового сопротивления среды от напряжения питания колебательной системы, а не измерять его точное численное значение, то нет необходимости в определении коэффициента пропорциональности сопротивления излучению – волновому сопротивлению среды. Кроме того, можно ограничиться измерениями напряжения на колебательной системе.

Для измерения напряжения на электродах пьезоэлементов колебательной системы и тока протекающего через элементы R_p и R_s предложено устройство, электрическая схема которого показана на рисунке 7.

Устройство работает следующим образом. При равенстве параметров токовых трансформаторов TR_1 и TR_2 , емкостей $C_{эл}$ и C , коэффициентов усиления усилителей K_1 и K_2 на выходе дифференциального усилителя U_1 появляется напряжение, амплитуда которого прямо пропорциональна амплитуде тока протекающего через элементы R_p и R_s . Сигнал на выходе дифференциального усилителя при этом определяется следующим выражением:

$$U = K_2 K_{T2} (I_{el} + I_M) - K_1 K_{T1} I_K \quad (3)$$

При условиях $K_1 = K_2$, $K_{T1} = K_{T2}$, $I_{el1} + I_{el2} = I_k$, следует:

$$U = K_1 K_{T2} I_M.$$

Так как собственная электрическая емкость пьезокерамических элементов изменяется в процессе работы из-за изменения температуры возникает необходимость периодической балансировки дифференциальной схемы, которая заключается в подборе коэффициентов усиления усилителей K_1 , K_2 , при которых разность сигналов поступающих на входы дифференциального усилителя U_1 , при отсутствии тока через элементы R_p и R_s , равна нулю. Таким образом, при использовании предложенного устройства ультразвуковой аппарат должен работать в двух режимах: режиме балансировки и рабочем режиме

В режиме балансировки управляющий модуль CPU вырабатывает сигнал для задающего генератора G , в результате чего частота электрического напряжения питающего колебательную систему становится равной F_1 . Частота F_1 не равна собственной резонансной частоте колебательной системы $f_{рез}$. На нерезонансной частоте F_1 ультразвуковой преобразователь имеет чисто емкостное сопротивление (определяемое собственной электрической емкостью пьезокерамических элементов). После рассогласования по частоте электрического генератора и колебательной системы, при помощи управляемых усилителей, путем подбора коэффициентов усиления K_1 и K_2 добиваются равенства нулю сигнала на выходе дифференциального усилителя U_1 (равенство сигнала нулю контролируется аналого-цифровым

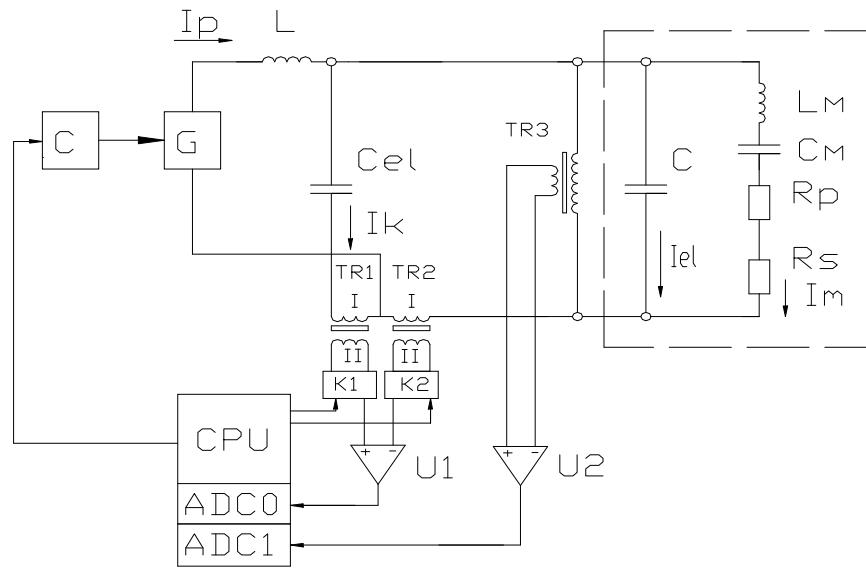


Рис. 7. Принципиальная схема блока для измерения волнового сопротивления среды

преобразователем ADC1). При равенстве сигнала на выходе U1 нулевому значению, ультразвуковой генератор переводится в рабочий режим (питание колебательной системы осуществляется электрическим напряжением с частотой, равной резонансной частоте $f_{рез}$ колебательной системы).

Таким образом, на входе ADC1 аналого-цифрового преобразователя присутствует напряжение прямо пропорциональное току через элементы R_p и R_s .

Для измерения напряжения на колебательной системе применен трансформатор напряжения TR3. Сигнал с его выхода усиливается усилителем U2 и подается на вход ADC2 аналого-цифрового преобразователя.

В результате получена информация обо всех величинах необходимых для контроля изменения волнового сопротивления среды.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы получены теоретические и экспериментальные результаты, позволяющие устанавливать и поддерживать в обрабатываемой технологической среде режим развитой кавитации, повышая тем самым эффективность ультразвукового воздействия. Предложенный способ управления процессом кавитации и реализующее его устройство были изготовлены и экспериментально исследованы при ультразвуковой интенсификации таких процессов как эмульгирование, диспергирование, экстракция. В результате проведенных исследований была подтверждена возможность применения данного метода для управления кавитационными процессами в технологической среде.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мощные ультразвуковые поля. / Под ред. Л. Д. Розенберга - М., Наука, 1968.
- [2] В. А. Акуличев, Л. Д. Розенберг. О некоторых соотношениях в кавитационной области. – Акуст. ж. 2, 287, 1965
- [3] Y. Kikuchi, H. Shimizu. On the variation of acoustic radiation resistance in water under ultrasonic cavitation. – JASA 1969.
- [4] Ю. Я. Богуславский. К вопросу о возникновении и развитии кавитационной волны разрежения. – Акуст. ж. 2, 185, 1968.
- [5] А. В. Донской, О. К. Келлер, Г. С. Кратыш. Ультразвуковые электротехнологические установки. Л.: Энергоиздат, 1982.