
ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИОННОЙ СТИРКИ

Запропоновано фізичну модель технологічного процесу ультразвукового кавітаційного прання. Наведено аналіз акустичних схем ультразвукових приводів-випромінювачів, що застосовуються в технологічному обладнанні для кавітаційного прання.

The physical technological processes model of ultrasonic cavitation washing. The method of calculation of ultrasonic transducers for providing of the technological process of cavitation washing is represented.

Введение

Явление ультразвуковой кавитации позволяет повысить эффективность целого ряда технологических процессов [1, 2]. Физические процессы, сопровождающие захлопывание кавитационных парогазовых пузырьков, зародившихся в жидкости в результате прохождения ультразвуковой волны высокой интенсивности, обеспечивают возникновение ударных волн и кумулятивных струй при локально высоких давлениях и температурах, способных разрушать твердые поверхности и уничтожать микроорганизмы, а также интенсивных микротечений, обеспечивающих перемешивание компонентов раствора на молекулярном уровне, активное растворение и смывание поверхностных жировых загрязнений [3].

Перечисленные процессы в своей совокупности позволяют пересмотреть существующую традиционную механическую барабанную технологию стирки тканей и предложить новую кавитационную технологию, для которой будут характерны высокое качество стирки, малый расход моющих средств, высокая степень стерильности конечного продукта и обеззараженный технологический раствор. Новая технология ввиду своей экологической безопасности может быть отнесена к категории перспективных.

Для реализации кавитационной стирки необходимо технологическое оборудование, содержащее емкость с моющим раствором и ультразвуковые резонансные приводы-излучатели, обеспечивающие введение в моющий раствор интенсивных ультразвуковых колебаний. Однако эффективность такого оборудования может быть достигнута только при правильном понимании физических процессов, происходящих в объеме технологической камеры.

Целью предлагаемой статьи является составление физической модели технологического процесса ультразвуковой кавитационной стирки и анализ ультразвуковых резонансных приводов-излучателей, способных реализовать данную технологию.

Физическая модель

При создании ультразвукового кавитационного оборудования используют малоамплитудные и высокоамплитудные резонансные приводы-излучатели [4], работающие в частотном диапазоне 18...100 кГц, источником ультразвуковых колебаний в которых являются либо пьезоэлектрические преобразователи Ланжевена, либо магнитострикционные преобразователи. В последнее время наиболее широко применяются ультразвуковые преобразователи на базе пьезоэлектрической керамики, КПД которой в 2,5 раза выше, чем у магнитострикторов.

Малоамплитудные ультразвуковые приводы (рис.1) строятся обычно по полуволновой симметричной или несимметричной акустической схеме (рис.2). Несимметричность схемы возникает при

использовании для частотопонижающих накладок материалов с разными плотностью и скоростью звука. Применение материалов с разным волновым сопротивлением позволяет получить увеличение амплитуды колебаний на излучающем торце накладки с меньшим волновым сопротивлением (рис.2б).



Рис.1 Ультразвуковые малоамплитудные резонансные приводы-излучатели

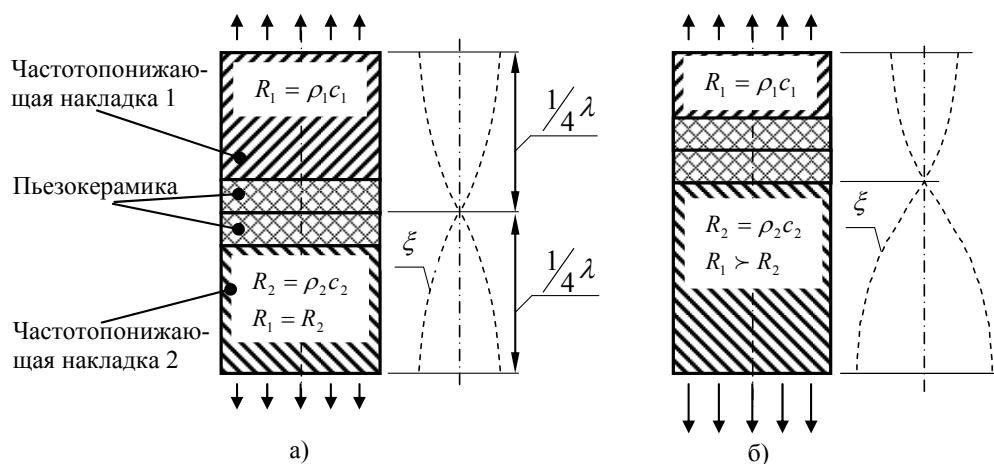


Рис.2 Акустические схемы малоамплитудных полуволновых ультразвуковых резонансных приводов-излучателей. (а – симметричная схема; б – несимметричная схема); (R_1, ρ_1, c_1 и R_2, ρ_2, c_2 – волновое сопротивление, плотность и скорость звука материала частотопонижающих накладок, соответственно, 1 и 2; ξ – кривая распределения деформации)

Такие приводы создают колебания рабочей излучающей поверхности на уровне 5 мкм и позволяют, благодаря большой площади излучающей поверхности, обеспечить хорошее согласование с нагрузкой и с максимальной эффективностью ввести в жидкость ультразвуковую энергию. Интенсивность ультразвуковых колебаний при этом обычно лежит в пределах 5...10 Вт/см². Создаваемые ультразвуковой волной такой интенсивности, кавитационные пузырьки захлопываются на протяжении одного или нескольких периодов растяжения-сжатия. Большое количество захлопывающихся пузырьков обеспечивает образующейся кавитационной среде высокую эрозионную активность и приводит к интенсификации химических процессов в жидкости. При этом существенно активизируется действие добавляемых в жидкость моющих средств. Это позволяет сократить время технологического процесса стирки и уменьшить количество расходуемых моющих средств. Одновременное подключение нескольких малоамплитудных приводов-излучателей позволяет достичь в технологической емкости с моющим раствором уровня развитой кавитации. В этом случае

преобладающими в технологическом процессе кавитационной стирки будут механизмы эрозионного и химического разрушения загрязнений.

С течением времени количество кавитационных пузырьков, образующихся в технологическом объеме жидкости, начинает уменьшаться, что приводит к угасанию рассмотренных механизмов кавитационной стирки. Вызвано это тем, что в жидкости постепенно уменьшается количество зародышей кавитации, в качестве которых выступают в основном самостоятельно существующие в жидкости парогазовые микропузырьки, а также парогазовые пузырьки, находящиеся в микротрещинах твердых поверхностей технологического оборудования и, присутствующих в жидкости, различных примесей [5-8]. Для поддержания стабильным количества зародышей кавитации в жидкости и, соответственно, эффективности кавитационной стирки применяют искусственное насыщение жидкости зародышами кавитации, например, путем постоянной аэрации технологического объема.

Малая амплитуда колебаний излучающей поверхности приводов, малое количество переколебаний кавитационных пузырьков и, соответственно, их малые размеры не позволяют создать интенсивные микротечения во всем объеме технологической емкости и поэтому, в данном случае, роль микротечений в процессе кавитационной стирки незначительна.

Физические процессы, сопровождающие схлопывание кавитационных пузырьков, обеспечивают технологическому процессу стирки новое качество, связанное с ультразвуковым кавитационным обеззараживанием тканей и сливаемого отработанного моющего раствора. Процесс ультразвукового кавитационного обеззараживания реализуется в соответствии со следующими механизмами:

- разрушительное действие кумулятивной струи, образующейся при схлопывании кавитационного пузырька, находящегося в непосредственной близости от микроорганизма;
- ударное действие сферических волн давления, образующихся при схлопывании кавитационного пузырька, удаленного от поверхностей и соседних пузырьков;
- термическое воздействие на микроорганизмы за счет локального повышения температуры при схлопывании кавитационных пузырьков;
- уничтожение микроорганизмов за счет перепада давлений по длине ультразвуковой волны;
- активизация окислительных процессов в кавитационной области.

В высокоамплитудных резонансных приводах-излучателях для получения больших значений амплитуд перемещения излучающей поверхности используют стержневые концентраторы или акустические трансформаторы скорости, обеспечивающие увеличение амплитуды колебательного смещения частиц (рис.3).



Рис.3 Ультразвуковые высокоамплитудные резонансные приводы-излучатели

Концентраторы являются резонансными системами и могут иметь, например, ступенчатый, конический, экспоненциальный, катеноидальный или ампульный профиль [9]. Концентраторы различных профилей отличаются, прежде всего, коэффициентом трансформации, чувствительностью к нагрузке, степенью дисперсии скорости звука и технологичностью изготовления.

Наибольшее развитие получили полуволновая (рис.4а) и волновая (рис.4б) акустические схемы высокоамплитудных приводов. Полуволновая схема позволяет существенно уменьшить габаритные размеры привода, однако желание увеличить мощность привода или интенсивность звука за счет увеличения количества пьезоэлементов часто приводит к вырождению схемы.

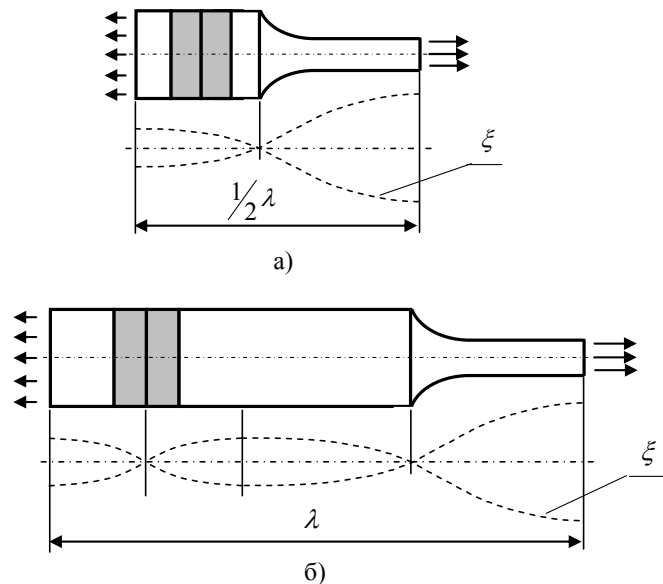


Рис.4 Акустические схемы высокоамплитудных резонансных приводов-излучателей (а - полуволновая схема; б – волновая схема)

Излучающий торец трансформатора скорости в высокоамплитудных приводах колеблется с амплитудой до 50 мкм. Уровень достигаемой амплитуды ограничивается в основном прочностными характеристиками материала, из которого изготовлен трансформатор скорости. Учитывая высокий уровень эрозионной активности рассматриваемой технологической среды, наиболее предпочтительными материалами для трансформаторов скорости являются титан и его сплавы, а также нержавеющие стали.

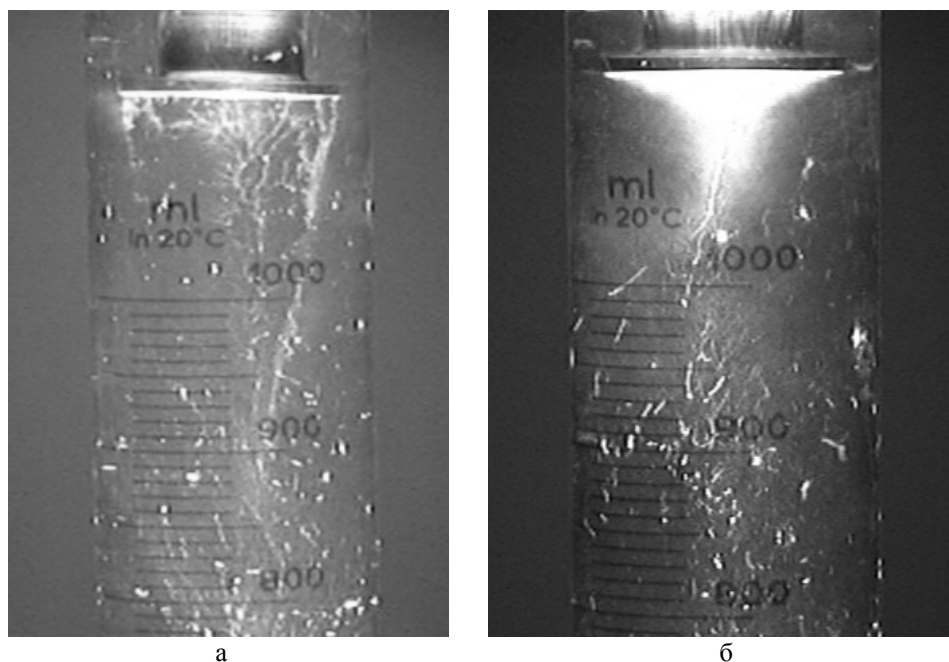


Рис.5 Процесс излучения ультразвуковой энергии в жидкость высокоамплитудным резонансным приводом (а - интенсивность ультразвука 18 Вт/см², б - интенсивность ультразвука 28 Вт/см²)

Высокоамплитудные приводы-излучатели способны обеспечить на своей излучающей поверхности интенсивность звука порядка 100 Вт/см^2 . Однако эффективно ввести в жидкость ультразвуковую волну такой интенсивности не представляется возможным. При интенсивности звука до $15...20 \text{ Вт/см}^2$ эффективность ввода ультразвуковой энергии в жидкость еще достаточно велика (рис.5а). При дальнейшем повышении интенсивности на излучающей поверхности привода образуется ярковыраженная двухфазная парогазовая прослойка (рис.5б), которая за счет поглощения и рассеивания ультразвуковой энергии выполняет роль экрана, препятствующего прохождению в жидкость ультразвуковых колебаний. Резко уменьшившееся сопротивление нагрузки приводит к рассогласованию системы «ультразвуковой резонансный привод – технологическая жидкая среда» и к падению эффективности введения в жидкость ультразвуковых колебаний.

Выводы

Повышенная по сравнению с малоамплитудными резонансными приводами интенсивность ультразвуковых колебаний приводит к увеличению амплитудного значения давления и превращению кавитационных пузырьков в пульсирующие. Пульсирующие пузырьки успевают увеличиться до видимых размеров, что позволяет визуально наблюдать отходящие от излучающей поверхности в объем жидкости кавитационные течи (рис.5а).

Колеблущаяся с высокой амплитудой излучающая поверхность привода и крупные пульсирующие кавитационные пузырьки создают в объеме жидкости интенсивные микротечения. В этом случае преобладающим в технологическом процессе кавитационной стирки является механизм размывания и растворения загрязнений, а механизм кавитационной эрозии загрязнений становится малоэффективным. Эффективность механизма кавитационной активации химических процессов в моющем растворе поддерживается высокой теперь в основном за счет интенсивной турбулизации микротечениями объема жидкости.

Очевидно, что для достижения максимальной эффективности технологического процесса ультразвуковой кавитационной стирки необходимо обеспечить надежное функционирование всех перечисленных механизмов разрушения и удаления загрязнений. Это возможно при одновременном излучении в технологическую емкость с моющим раствором ультразвуковых колебаний малоамплитудными и высокоамплитудными резонансными приводами. Однако такое техническое решение приведет к значительному усложнению и удорожанию технологического оборудования, поскольку указанные приводы, имея существенно различные добротности и резонансные характеристики, требуют различной схемной реализации генераторов возбуждения. Использование одного общего электрического генератора не позволит обеспечить эффективную работу всех приводов.



Рис.6 Ультразвуковой резонансный привод с развитой поверхностью излучения

Более эффективным решением является применение в технологическом оборудовании для ультразвуковой кавитационной стирки высокоамплитудных резонансных приводов с развитой поверхностью излучения (рис.6). Такие приводы обычно содержат ступенчатый трансформатор скорости, ступень малого диаметра которого имеет длину кратную нечетному числу четвертей длины волны деформации (рис.7). В пучностях волны выполняются дисковые элементы, диаметры которых меньше половины длины волны деформации. При таком исполнении дисковые элементы совершают поршневые колебания, обеспечивая излучение в жидкость волн с большой поверхности. Это позволяет применить в приводе более мощный пьезоэлектрический преобразователь, а за счет дисперсии звука по длине трансформатора скорости и возможности варьирования местами установки дисковых элементов обеспечить различные амплитуды колебаний дисков. Такие резонансные приводы сочетают в себе особенности как малоамплитудных, так и высокоамплитудных приводов.

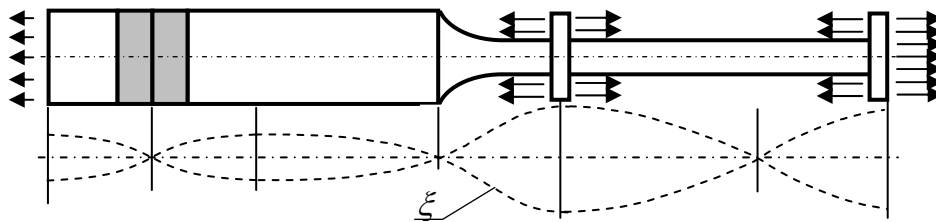


Рис.7 Акустическая схема ультразвукового резонансного привода с развитой излучающей поверхностью

Выводы

Представлена физическая модель технологического процесса ультразвуковой кавитационной стирки, включающая три механизма кавитационного воздействия на загрязнения – эрозионное разрушение затвердевших загрязнений, активное растворение и смывание за счет интенсивных микротечений, а также разрушение загрязнений путем интенсификации в кавитационной среде химических процессов. Обеззараживающее действие ультразвуковой кавитации в физической модели представлено как механизм воздействия на микроорганизмы кумулятивных струй, ударных волн, перепадов давлений по длине звуковой волны, локально высоких температур и окислительных химических реакций. Рассмотренные механизмы обеспечивают представленной технологии экологическую безопасность. Рассмотрены принципы построения ультразвуковых резонансных пьезоэлектрических приводов, способных в составе технологического оборудования реализовать указанные механизмы.

Список литературы

1. Луговской А.Ф., Чухраев Н.В. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях.-К. Видавнично-поліграфічний центр «Київський університет», 2007-244с.
2. Эльпинер И.Е. Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие. - М., Физматиз, 1963 -430с.
3. Луговской А.Ф., Мовчанюк А.В., Гришко И.А. Оценка методов обеззараживания воды. – Вестник НТУУ «КПИ», Серия машиностроение, Вып.52. – Київ, 2008, с.103-111.
4. пп.
5. Акуличев В.А. Гидратация ионов и кавитационная прочность воды // Акустический журнал. – 1966. - 12, 2. - С.160-166.
6. Александров Ю.А., Воронков Г.С., Горбунков В.М., Делоне Н.Б., Нечаев Ю.И. Пузырьковые камеры.- М.: Госатомиздат, 1963. – 340 с.
7. Перник А.Д. Проблемы кавитации. – Л.: Судостроение, 1988. – 438 с.
8. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хеммит Ф. Кавитация. – М.: Мир, 1974. – 688 с.
9. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Глав. ред. И. П. Голямина. - М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.