

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Хмелёв В.Н., *Senior Member, IEEE*, Левин С.В., *Student Member, IEEE*, Цыганок С.Н., Лебедев А.Н., *Student Member, IEEE*

Аннотация – в статье анализируются причины, ограничивающие возможность повышения производительности ультразвуковых технологических процессов путем увеличения вводимой в жидкие технологические среды, в режиме развитой кавитации, энергии акустических колебаний. Показывается, что решением проблемы является создание специальных ультразвуковых колебательных систем с увеличенной поверхностью излучения многорезонансных рабочих инструментов. Создание практических конструкций и исследование их функциональных возможностей позволило подтвердить возможность существенного увеличения мощности ультразвуковых технологических аппаратов..

1. ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковые технологии находят всё более широкое распространение в различных отраслях промышленности. Особенно они эффективны при реализации процессов в жидких и жидко – дисперсных средах. Причина этого заключается в возникновении кавитационных явлений, являющихся причиной и движущей силой в большинстве физико- механических и химических процессов.

Как известно, основной задачей, решаемой при интенсификации различных технологических процессов [1], таких как экстракция, ультразвуковая очистка, диспергирование и т.д., является обеспечение такой интенсивности ультразвукового излучения, при которой эффективность процесса будет максимальной.

II. ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Максимальная выходная мощность ультразвукового воздействия на жидкие среды ограничена развитием кавитационных процессов в среде вблизи от излучающей поверхности колебательной системы, и площадью излучения рабочего инструмента [2]. Как известно, основу при построении и изготовлении современных колебательных систем составляют пьезоэлектрические элементы, обеспечивающие преобразование энергии электрических колебаний в механические колебания УЗ частоты. Пьезоэлементы изготавливаются из специальных керамических материалов по сложнейшим технологиям и подвергаются предварительной поляризации в электрических полях с высокой напряженностью (до 2000 В/мм). Необходимость обеспечения однородности состава материала и

равномерности поляризации обуславливают ограничения на габаритные размеры изготавливаемых промышленностью пьезоэлементов. Так, максимальный диаметр серийно производимых в нашей стране и за рубежом пьезоэлементов кольцевой формы составляет 50 мм. При построении колебательной системы на базе колец такого размера, излучающая поверхность, например, при применении инструмента грибового типа диаметром 50 мм не превысит 20 см². С учетом двухстороннего излучения площадь инструмента грибового типа составляет 30 см². При обеспечении условия оптимального выхода энергии в режиме развитой кавитации интенсивность выводимых в жидкую технологическую среду УЗ колебаний оставляет 10...15 Вт/см². Выводимая в жидкую технологическую среду энергия не превышает 450 Вт. При обеспечении КПД ультразвуковой колебательной системы, близкого к 50...60% потребляемая электрическая мощность всего ультразвукового технологического аппарата не может превышать 1000 Вт.

В настоящее время ультразвуковое оборудование не используется при реализации технологических процессов в крупных производствах, где необходимо обеспечивать обработку больших объемов ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности в режиме развитой кавитации, т.е. вводить в обрабатываемые среды большие энергии акустических колебаний. Основная причина заключается в том, что, несмотря на эффективность применения ультразвуковых колебаний для интенсификации различных химико-технологических процессов, существующее оборудование позволяет обеспечить введение в обрабатываемые среды небольших энергий (до 500 Вт), достаточных только для лабораторных исследований или для использования в малых производствах.

Очевидно, что одним из наиболее эффективных способов увеличения максимальной мощности вводимых в технологические среды ультразвуковых колебаний является увеличение (развитие) поверхности излучения рабочего инструмента.

III. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

Каждая ультразвуковая колебательная система представляет собой резонансную систему [3] и увеличение длины излучающего инструмента (продольного размера системы) приводит к снижению частоты и выводу её за пределы разрешённого диапазона, что является

недопустимым. При увеличении поперечного размера системы происходит возникновение радиальных и изгибных колебаний, что в свою очередь резко снижает эффективность излучения.

Одним из наиболее эффективных способов решение проблемы является создание ультразвуковой колебательной системы, состоящей из нескольких, последовательно соединённых резонансных полуволновых колебательных систем (рисунок 1).

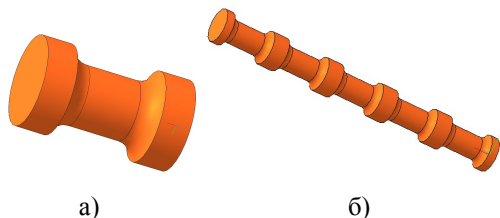


Рисунок 1 – Рабочий инструмент ультразвуковой колебательной системы

Такое построение ультразвуковой колебательной системы позволяет обеспечить излучение УЗ колебаний на заданной частоте при значительном увеличении длины рабочего инструмента без увеличения поперечного размера. При этом торцевая излучающая поверхность (площадь поперечного сечения) остаётся неизменной, но обеспечивается значительное увеличение боковой поверхности. Это достигается за счет формирования в зонах соединения отдельных полуволновых инструментов переходных участков, с увеличенной площадью. Таким образом, обеспечено формирование увеличенной поверхности излучения на участках рабочего инструмента, где амплитуда продольных колебаний максимальна, и преобразование эти колебания в изгибные (контурные) колебания участков увеличенного диаметра.

Наличие взаимодействия между отдельными соединяемыми инструментами, влияние преобразователя колебательной системы и обрабатываемой технологической среды приводят к тому, что обеспечить работу всех звеньев колебательной системы на одной частоте механического резонанса практически невозможно и ультразвуковые колебательные системы, созданные путём соединения в нескольких резонансных (полуволновых) инструментов, становятся многорезонансными.

Конструктивная схема многополуволнового рабочего инструмента с развитой поверхностью излучения показана на рисунке 2.

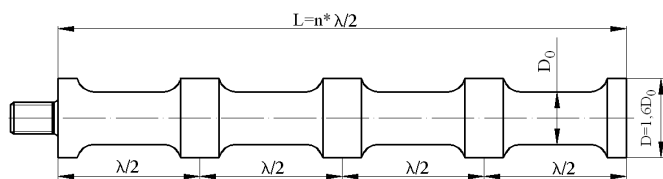


Рисунок 2 – Конструктивная схема рабочего инструмента с увеличенной поверхностью излучения ультразвуковой энергии

Рабочий инструмент представляет собой тело вращения переменного сечения с регулярно повторяющимися большими и малыми цилиндрическими участками. Отношение между диаметрами больших и меньших участков выбираются из условия (1).

$$1,5 \leq \frac{a}{D_2} \leq 1,8 \quad (1)$$

где D_2 – диаметр выходного конца концентратора, м., a – максимальный габаритный размер излучающей поверхности;

Рабочий инструмент содержит в своем составе акустически связанные, соосно расположенные волноводы изгибных колебаний, разделенные участками волноводов продольных колебаний. Волноводы изгибных колебаний расположены в участках, перпендикулярных оси волновода продольных колебаний на расстояниях $\lambda / 2$ друг от друга, где λ - динa волны продольных колебаний. По результатам моделирования (и подтверждено экспериментально), оптимальная толщина волноводов изгибных колебаний, расположенных в пучностях продольных колебаний составляет $\lambda / 15$.

Общая длина активного рабочего инструмента кратна $\lambda / 2$. Рассматриваемый рабочий инструмент позволяет обеспечивать большую площадь излучающей поверхности, и как следствие, высокую мощность ультразвукового излучения, равномерно распределять колебания в протяженных технологических объемах.

Внешний вид разработанного рабочего инструмента с увеличенной излучающей поверхностью показан на рисунке 3. Материал рабочего инструмента – титановый сплав ВТ-5.



Рисунок 3 – Активный рабочий инструмент с увеличенной поверхностью излучения ультразвуковой энергии

Использование активного рабочего инструмента с развитой поверхностью, позволило увеличить вывод энергии ультразвуковых колебаний в технологические среды в кавитационном режиме. Например, при диаметре излучателя $D_0 = 30\text{мм}$ мм, длине $4 \cdot \lambda / 2$ и общей площади излучения порядка 200 см^2 , интенсивности УЗ колебаний $10..15\text{ Вт/см}^2$, появилась возможность выводить в технологические среды ультразвуковые колебания с мощностью $2000..3000\text{ Вт}$.

Создание конструкций, подобных описанной выше и активных рабочих инструментов с увеличенной поверхностью излучения позволяющих вводить в

образовываемую среду ультразвуковые колебания с мощностью более 3000 Вт, потребовало разработки соответствующих колебательных систем. При этом, с учетом к.п.д. существующих пьезоэлектрических ультразвуковых преобразователей (приблизительно 70%) возникает необходимость использовать в составе ультразвуковой колебательной системы ультразвуковые преобразователи, способные обеспечить формирование УЗ колебаний при подаче электрических колебаний, мощностью не менее 4000 - 6000 Вт. Очевидно, что поверхность формирования ультразвуковых колебаний в преобразователе должна быть не меньше поверхности излучения и должно выполняться условие обеспечения работы пьезоэлектрического преобразователя в режимах, не превышающих предела механической прочности керамики (то есть амплитуда колебаний не должна превышать 5 мкм). Именно необходимость выполнения этого условия обуславливает необходимость увеличения площади поверхности формирования ультразвуковых колебаний не менее чем в 4 - 5 раз по сравнению с площадью излучения, то есть до значения, превышающего 1000 см². Следовательно, преобразователь должен иметь поперечные размеры, превосходящие половину длины УЗ колебаний в материале на рабочей частоте.

При таких габаритных размерах преобразователя возникают низкочастотные радиальные и контурные колебания, обуславливающие снижение к.п.д., ухудшаются механические свойства (прочность, жесткость) конструкции, снижается эффективность охлаждения внутренних областей пьезопреобразователя. Применение пьезоэлектрических элементов при построении подобных ультразвуковых колебательных систем малоэффективно, из-за ограниченных размеров, выпускаемых промышленностью пьезоэлектрических элементов (не более 50 мм в диаметре). Кроме того, вызванное значительной площадью, снижение (в 2..3 раза) эффективности преобразования электрических колебаний в ультразвуковые и разрушение пьезокерамических элементов делают изготовление и использование преобразователей большой площади технически неосуществимой задачей.

Для решения этой задачи было предложено применить пьезоэлектрический преобразователь, позволяющий суммировать мощности ультразвуковых колебаний, генерируемых набором пакетов пьезоэлектрических элементов малых размеров. Это позволяет обеспечить генерацию ультразвуковых колебаний достаточной для обеспечения кавитационного режима мощности без превышения предельно допустимых параметров пьезоэлектрических элементов.

Для более наглядного представления разработанной конструкции ультразвуковой колебательной системы на рисунке 4 показан аксонометрический вид двух типов ультразвуковых преобразователей. На рисунке а – с тремя пакетами пьезоэлектрических элементов (средней мощности, до 2000 Вт), на рисунке б – с семью пакетами

пьезоэлектрических элементов (большой мощности, более 4000 Вт).

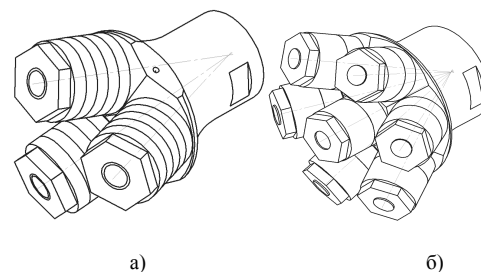


Рисунок 4 – Аксонометрический вид разработанных ультразвуковых колебательных систем а – средней мощности, б – большой мощности

Соответственно на рисунке 5 представлен аксонометрический вид рабочих частотнопонижающих накладок ультразвуковых преобразователей. На рисунке а – с тремя гранями (средней мощности), на б – с семью гранями (большой мощности).

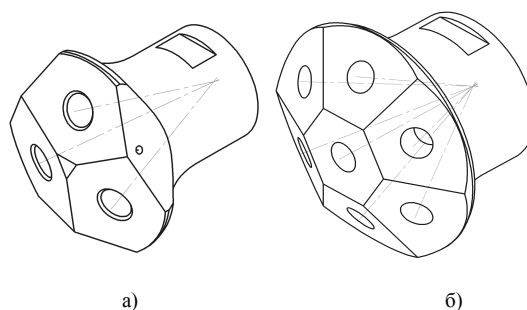


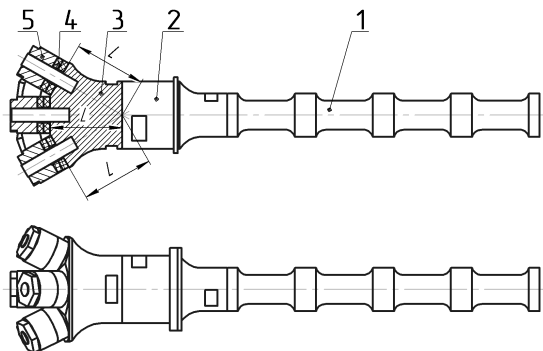
Рисунок 5 – Частотнопонижающие накладки а – с тремя гранями, б – с семью гранями

Таким образом, частотнопонижающая накладка, выполнена в виде тела вращения сужающегося по длине сечения, ограниченную со стороны акустического соединения с согласующим акустическим трансформатором плоской торцевой поверхностью. С противоположенной стороны частотнопонижающая накладка ограничена поверхностью, образованной плоскими гранями, расположенными симметрично относительно продольной акустической оси на равных расстояниях от центра плоской торцевой поверхности L , кратных нечетному числу четвертей длины продольной акустической волны в материале частотнопонижающей накладки на рабочей частоте ультразвуковой колебательной системы.

С каждой гранью поверхности рабочей частотнопонижающей накладки акустически связана одна торцевая поверхность пакета, состоящего из четного количества пьезоэлектрических элементов, причем число пакетов пьезоэлектрических элементов равно числу плоских граней. Другая торцевая поверхность каждого пакета пьезоэлектрических элементов, акустически связана с отражательной частотнопонижающей накладкой, число которых равно числу пакетов пьезоэлектрических элементов. Акустическая длина каждого пакета

пьезоэлементов и связанной с ним отражающей частотнопонижающей накладки соответствует четверти длины продольной акустической волны в материале рабочей частотнопонижающей накладке.

Конструктивная схема разработанной ультразвуковой колебательной системы показана на рисунке 6.



1 – активный рабочий инструмент с увеличенной поверхностью излучения, 2 – согласующий акустический трансформатор (концентратор), 3 – рабочая частотнопонижающая накладка, 4 – пьезоэлектрические элементы, 5 – отражающие частотнопонижающие накладки.

Рисунок 6 – Схема ультразвуковой колебательной системы

Для различных объёмов производств, с различными требованиями к мощности излучения, производительности, возможны различные варианты ультразвуковых колебательных систем.

Ультразвуковая колебательная система имеет три пакета преобразователей (рисунок 7). Каждый пакет состоит из четырёх пьезоэлектрических элементов. Бустер имеет диаметры 70мм и 45мм соответственно и выполнен из алюминия Д-16. Длина ультразвукового излучателя составляет 338мм, и составляет $4 \cdot \lambda/2$. Диаметр 45мм. Такая система позволяет обеспечить ввод ультразвуковых колебаний мощностью до 1500 Вт.

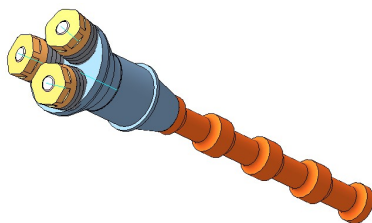


Рисунок 7 – Ультразвуковая колебательная система с тремя пакетами преобразователей, длиной $4 \cdot \lambda/2$

Распределение амплитуды колебаний на основных резонансных частотах представлены в таблице Т 1.

Для ультразвуковой колебательной системы, представленной на рисунке 7 и для ультразвуковых колебательных систем, представленных далее, измерения производились начиная с торца излучающего инструмента в направлении к пьезоэлектрическому преобразователю. Распределение амплитуд колебаний представлено в некоторых единицах относительно амплитуды колебаний на торце ультразвуковой колебательной системы представленной на рисунке 7.

Т 1 – распределение амплитуды колебаний на основной резонансной частоте.

Фрез, кГц	Распределение амплитуд, В							
22,3	1	1	1	1	1	1	1	1

Следующая ультразвуковая колебательная система представленная на рисунке 8, так же имеет три пакета преобразователей, каждый из которых так же состоит из четырёх пьезоэлектрических элементов, что обеспечивает большую амплитуду колебаний при неизменном напряжении подаваемом на пьезоэлемент. Система имеет длину 486мм и диаметр 45мм и обеспечивает мощность 2000 Вт.

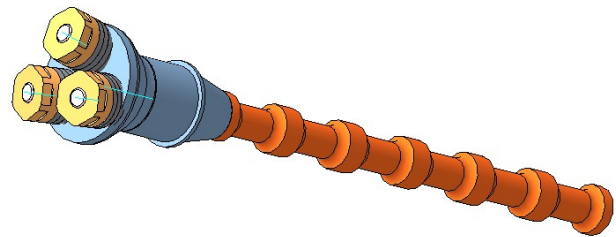


Рисунок 8 – Ультразвуковая колебательная система с тремя пакетами преобразователей, длиной $6 \cdot \lambda/2$

Распределение амплитуды колебаний и основные резонансные частоты представлены в таблице Т 2.

Т 2 – распределение амплитуды колебаний на основных резонансных частотах

Фрез, кГц	Распределение амплитуд, В							
22,4	3	3	2,9	2,7	2,5	2,5	2,7	
	2,8	2,9	3	3	3	3	2,8	

Система имеет длину рабочего инструмента $6 \cdot \lambda/2$, что в свою очередь позволяет получить большую мощность и производительность по сравнению с предыдущей системой.

Для обеспечения большей амплитуды колебаний и соответственно большей мощности, применён пьезоэлектрический преобразователь, позволяющий суммировать мощности ультразвуковых колебаний, генерируемых набором семи пакетов пьезоэлектрических элементов (рисунок 9). Это позволяет обеспечить генерацию ультразвуковых колебаний большей интенсивности, достаточной для обеспечения кавитационного режима без превышения предельно допустимых параметров пьезоэлектрических элементов.

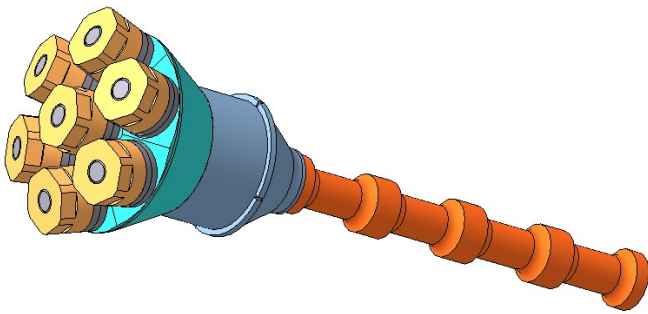


Рисунок 9 – Ультразвуковая колебательная система с семью пакетами преобразователей, длиной $4 \cdot \lambda/2$

Длина ультразвукового излучателя составляет 338мм, и составляет $4 \cdot \lambda/2$. Диаметр 45мм. Система позволяет выводить в среду до 3000Вт.

Распределение амплитуды колебаний и основные резонансные частоты представлены в таблице Т 3.

Т 3 – распределение амплитуды колебаний на основных резонансных частотах.

Фрез, кГц	Распределение амплитуд, В								
21,39	3	3	2,8	2	2	2	2,8	2,8	3

Ультразвуковая колебательная система представленная на рисунке 10, имеет больший по длине рабочий инструмент. Длина рабочего инструмента составляет $6 \cdot \lambda/2$, что позволяет обеспечить наиболее высокую производительность

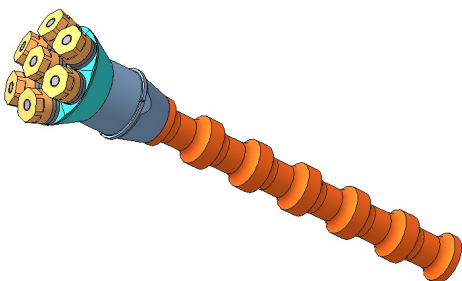


Рисунок 10 – Ультразвуковая колебательная система с семью пакетами преобразователей, длиной $6 \cdot \lambda/2$

Система имеет длину 486мм и диаметр 50мм Мощность системы составляет до 6000 Вт.

Распределение амплитуды колебаний и основные резонансные частоты представлены в таблице Т 4.

Т 4 – распределение амплитуды колебаний на основных резонансных частотах.

Фрез, кГц	Распределение амплитуд, В							
20,27	2,2	2,2	1,7	1,6	1,6	1,4	2	
	1,7	2	1,7	1,7	2,2	2	1,7	

Ультразвуковая колебательная система представленная на рисунке 11, имеет длину рабочего инструмента 648мм и соответственно $8 \cdot \lambda/2$ при соотношении больших и меньших диаметров поперечного сечения 70мм и 50мм

соответственно. Как и у приведённых ранее разработанных ультразвуковых колебательных систем, рабочий инструмент выполнен из титанового сплава BT-5. Бустер выполнен из алюминия Д-16. Ультразвуковая колебательная система позволяет обеспечить наиболее эффективное воздействие на технологические среды. Мощность такой системы составляет 8000 Вт.

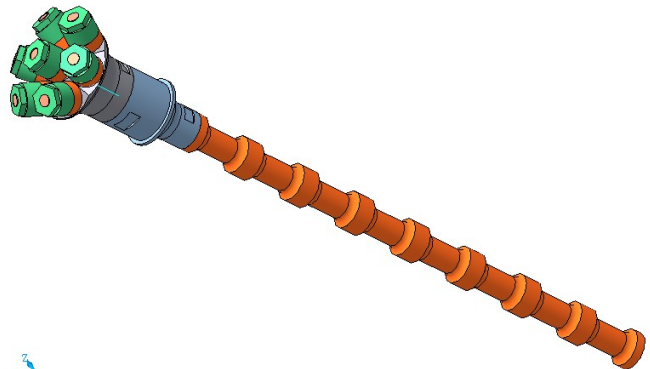


Рисунок 11 - Ультразвуковая колебательная система с рабочим инструментом длиной $8 \cdot \lambda/2$

Распределение амплитуды колебаний и основные резонансные частоты представлены в таблице Т 5.

Т 5 – распределение амплитуды колебаний на основных резонансных частотах.

Фрез, кГц	Распределение амплитуд, В								
21,6	4	4	4	4	3,95	3,95	3,9	3,7	3,7
	3,9	3,9	3,95	3,95	4	4	4	4	3,9

Внешний вид ультразвуковой колебательной системы, содержащей в своем составе ультразвуковой преобразователь, состоящий из семи пакетов пьезоэлектрических элементов, показан на рисунке 12.



Рисунок 12 – Внешний вид разработанной ультразвуковой колебательной системы а) - без корпуса, б) – в корпусе

Форма разработанного рабочего инструмента обеспечивает одинаковую объемную плотность энергии ультразвуковых колебаний во всей обрабатываемой технологической среде (рисунок 13).



Рисунок 13 – Распределение ультразвукового воздействия в технологическом объёме

В лаборатории акустических процессов и аппаратов был спроектирован и разработан ультразвуковой технологический аппарат «Булава», представленный на рисунке 14. Ультразвуковой технологический аппарат «Булава» состоит из ультразвуковой колебательной системы и генератора, для её питания. Рабочий инструмент ультразвуковой колебательной системы выполнен из титанового сплава ВТ-5. Аппарат снабжен фланцем, выполненным из стали 45 для обеспечения возможности встраивания в производственную линию и возможности обеспечения работы при избыточном давлении до 15 атмосфер.



Рисунок 14 – Внешний вид ультразвукового технологического оборудования «Булава»

Технические характеристики разработанного оборудования, представлены в таблице Т 6.

Напряжение питающей сети, В	220 ±10%
Потребляемая мощность, Вт	3000
Рабочая частота, кГц	21,6
Длина рабочего инструмента, мм	500

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы выявлены причины, ограничивающие возможность дальнейшего повышения мощности ультразвуковых технологических аппаратов с целью повышения эффективности (увеличения скорости

протекания процессов и увеличения производительности) процессов показана необходимость создания пьезоэлектрических колебательных систем с увеличенной поверхностью излучения.

Проведенные исследования позволили предложить и разработать многополуволновые рабочие инструменты с увеличенной (более чем в 10 раз по сравнению с используемыми) поверхностью излучения и специальные пьезоэлектрические преобразователи с увеличенной поверхностью формирования УЗ колебаний.

Предложенные технические решения позволили решить проблему повышения энергии акустических колебаний, вводимых в технологические среды за счет увеличения мощности ультразвуковых технологических аппаратов.

Разработанные в лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета ультразвуковые колебательные системы прошли лабораторные и технические испытания, и были реализованы в составе технологических установок для выполнения различных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Заяс Ю.Ф. Интенсификация технологических процессов при помощи ультразвука // Пищевая промышленность. – М.: ЦИНТИпищепром, 1960. - С. 21-28.
- [2] Донской А.В., Келлер О.К., Кратыш Г.С. Ультразвуковые электротехнические установки Л.: Энергоатомиздат 1982.
- [3] Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – 266 с.