

# ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПОЛУВОЛНОВЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В.Н. Хмелев, С.Н. Цыганок, А.Н. Лебедев

*Статья посвящена решению проблемы повышения эффективности ультразвуковых технологических процессов за счет создания условий, обеспечивающих увеличение выхода энергии ультразвуковых колебаний (УЗ) в обрабатываемые технологические среды. Рассматривается один из возможных путей решения проблемы – разработка и применение ультразвуковых колебательных систем (УЗКС), объединяющих в полуволновой конструктивной схеме пьезоэлектрический преобразователь и ступенчато-радиальный концентратор с грибовидным рабочим инструментом. Для создания практических конструкций таких УЗКС предложены и реализованы: методика инженерного расчета – для определения основных параметров; методика моделирования процесса формирования УЗ колебаний – для определения технических характеристик УЗКС.*

Необходимость повышения эффективности технологических процессов, осуществляемых за счет ультразвуковых колебаний высокой интенсивности, требует ввода в обрабатываемые среды оптимальной и достаточной для реализации различных технологических процессов энергии ультразвуковых колебаний.

Источником ультразвуковых колебаний для реализации ультразвуковых технологий являются резонансные ультразвуковые колебательные системы (УЗКС), состоящие из одного или нескольких электромеханических преобразователей, усилителей упругих механических колебаний (концентраторов) и рабочих инструментов различной формы, площади излучающей поверхности и назначения. Выбор типа и конструктивной схемы построения колебательной системы определяется реализуемой технологией, а также параметрами ультразвукового воздействия (частота, интенсивность, зона ультразвукового воздействия и т.д.).

Несмотря на наличие большого количества работ, посвященных вопросам проектирования и разработки колебательных систем, все они, до настоящего времени, выполняются по классической двухполуволновой конструктивной схеме, объединяющей полуволновой преобразователь и полуволновой концентратор. Ее основной недостаток заключается в том, что электромеханический преобразователь и концентратор с рабочим инструментом, являются резонансными системами, характеризующимися собственными частотами механических резонансов. При условии обеспечения равенства частот механических резонансов обеспечивается максимальная амплитуда колебаний рабочего инструмента и, соответ-

венно, максимальный вывод энергии в обрабатываемые среды. Обеспечить идеальное согласование практически невозможно по следующим причинам:

1. При УЗ воздействии рабочий инструмент и часть концентратора погружаются в различные технологические среды. В зависимости от площади излучающей поверхности рабочего инструмента и свойств обрабатываемых сред (плотности и вязкости) изменяется собственная резонансная частота концентратора. Рассогласование ультразвукового преобразователя и концентратора по частоте приводит к уменьшению амплитуды колебаний рабочего инструмента и уменьшению выводимой в среды энергии. Для исключения рассогласования по частоте при проектировании и изготовлении колебательных систем создают предварительное рассогласование преобразователя и концентратора на определенную величину, оптимальную для конкретной технологической среды.

2. Предварительное рассогласование не решает проблемы, поскольку в ходе реализации технологических процессов происходит изменение свойств обрабатываемых сред (изменение величины акустической нагрузки, температуры, вязкости, состава), что вызывает такие изменения резонансных характеристик колебательных систем, которые невозможно предусмотреть на этапе проектирования. Это существенно ограничивает области применения ультразвуковых технологий и снижает их эффективность.

Проблема усугубляется необходимостью обеспечения оптимальных условий согласования волновых сопротивлений технологических сред с твердыми пьезокерамическими материалами преобразователей. Это обеспечивается применением концентраторов. Для оптимального согласования коэффициент усиления должен

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПОЛУВОЛНОВЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

составлять 12-17 [1]. Столь высокие коэффициенты усиления можно получить только ступенчатыми концентраторами. При таких коэффициентах усиления увеличивается зависимость собственной резонансной частоты от нагрузки, что требует малого по диаметру выходного сечения при значительной длине (соответствующей четверти длины волны ультразвуковых колебаний в материале концентратора). Это приводит к потере динамической устойчивости и появлению изгибных колебаний. По этим причинам, на практике не используются колебательные системы с коэффициентом усиления более 3-5.

Проведенный анализ различных конструктивных схем преобразователей, концентраторов и рабочих инструментов позволил установить, что большая часть принципиальных ограничений, присущих двухполупериодной конструктивной схеме колебательной системы, может быть устранена применением колебательных систем, объединяющих в полуволновой конструктивной схеме пьезоэлектрический преобразователь и концентратор с высоким коэффициентом усиления и любым по размерам рабочим инструментом. Для интенсификации технологических процессов, протекающих в жидких и жидкодисперсных средах, предложена конструктивная схема (рис. 1) полуволновой ультразвуковой колебательной системы [2]. Она позволяет совмещать электромеханический преобразователь, трансформатор упругих колебаний (концентратор) и рабочий инструмент с излучающей поверхностью, определенной формы и площади.

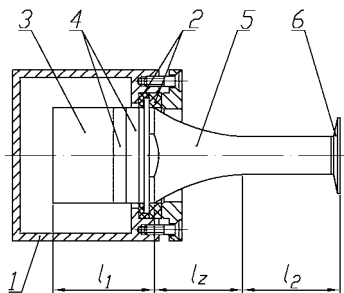


Рисунок 1 – Конструктивная схема полуволновой пьезоэлектрической УЗКС

Предложенная и разработанная УЗКС содержит корпус 1, в котором посредством крепежных элементов через опору 2, выполняющую функцию акустической развязки, в узле смещений закреплена ультразвуковая колебательная система, состоящая из отражающей металлической накладки 3, пьезоэлектрических элементов 4, к электродам которых через соединительный кабель подается

электрическое возбуждающее напряжение, излучающей концентрирующей накладки 5. К ней присоединяется рабочий инструмент 6, который обычно выполняется сменным.

Ультразвуковая колебательная система представляет собой ступенчато - экспоненциальную конструкцию, состоящую из трех основных участков: двух цилиндрических (длиной  $l_1$  и  $l_2$ ) и одного экспоненциального (длиной  $l_z$ ). Пьезоэлектрические элементы расположены между экспоненциальным участком и торцом отражающей накладки. Выбор такой конструктивной схемы обусловлен необходимостью получения большого коэффициента усиления (как у ступенчатого концентратора) и приемлемого согласования с обрабатываемой средой (близкого к параметрам экспоненциального концентратора).

На основе полуволновой конструктивной схемы необходимо разрабатывать и создавать практические конструкции ультразвуковых колебательных систем для комплектации разнообразных аппаратов. Используемые на практике колебательные системы различаются пьезокерамическими элементами (внутренний и внешний диаметр, толщина, тип пьезоматериала), разными сечениями цилиндрического участка концентратора, разными рабочими инструментами. В обобщенном виде колебательная система с основными, подлежащими определению, геометрическими размерами показана на рис. 2.

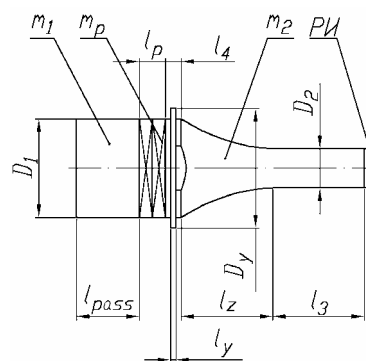


Рисунок 2 – Полуволновая УЗКС с основными конструктивными размерами:  $l_3$  – длина цилиндрического участка диаметром  $D_2$  (материал  $m_2$ );  $l_4$  – ширина узла крепления колебательной системы в корпусе;  $D_y$  – диаметр пояса крепления;  $l_y$  – ширина пояса крепления;  $l_{pass}$  – длина отражающей пассивной накладки (материал  $m_1$ ) диаметром  $D_1$ ;  $l_p$  – толщина пакета пьезоэлектрических элементов (материал  $m_p$ );  $l_z$  – длина экспоненциального участка; РИ – сменный рабочий инструмент

Проектирование ультразвуковых колебательных систем должно осуществляться в несколько этапов.

На первом этапе, исходя из требований реализации определенного технологического процесса, определяются необходимые параметры УЗ воздействия: резонансная частота  $f$  и амплитуда колебаний излучающей поверхности, количество вводимой акустической энергии, необходимой и достаточной для осуществления технологического процесса. По этим параметрам рассчитываются: необходимая интенсивность излучения  $I$  на поверхности рабочего инструмента, причем для эффективного воздействия на различные технологические среды в режиме «развитой» кавитации, значение интенсивности должно быть в пределах 10-15 Вт/см<sup>2</sup>.

Далее, для обеспечения заданной интенсивности излучения, определяется коэффициент усиления  $M_p$  колебательной системы, при условии, что максимальная величина смещений поверхности пьезокерамических элементов в предварительно напряженном состоянии, ограниченная прочностью материала, не может превышать 5-7 мкм.

На втором этапе, с учетом характеристик обрабатываемой среды выбираются материалы: концентратора и рабочего инструмента. Для слабоагрессивных сред применяются сплавы 40X13, 30XГСА и подобные им стали. Для обработки агрессивных сред применяются нержавеющие стали типа 12X18H10T, а также титановые сплавы. Отражающая частотнопонижающая накладка выполняется из сталей типа сталь 45.

Для колебательных системы применяются пьезокерамические материалы с высокими значениями добротности, высокой температурой Кюри, повышенными значениями пьезомодулей, и также низким значением тангенса диэлектрических потерь при высоких напряжениях. Наиболее пригодными для построения колебательных системы являются пьезоматериалы типа ПКР-8М, ЦТС-23 и АРС-841.

На третьем этапе определяются размеры колебательной системы – диаметры цилиндрических участков. Значение  $D_2$  зависит от мощности вводимой в обрабатываемую среду и лежит в пределах 10-20 мм. Значение  $D_1$  определяется с учетом коэффициента усиления, рассчитанного по методике, предложенной в работе [3]. По полученному значению  $D_1$  выбираются пьезоэлектрические элементы (толщина  $l_p$  и тип материала  $m_p$ ).

Далее определяются отношения диаметров  $N$  (безразмерные коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$ ).

На четвертом этапе определяются длины цилиндрических и экспоненциального участков УЗКС, а именно:

$$l_1 = k_1 [c_1 / \omega - 2l_p (c_1 / c_p + 1)],$$

$$l_z = c_2 / \omega \ln(N),$$

$$l_2 = k_2 c_2 / \omega,$$

где  $c_1, c_2$  - скорости распространения ультразвуковых колебаний в материалах накладок, (м/с),  $c_p$  - скорость распространения ультразвуковых колебаний в материале пьезоэлектрического элемента, (м/с);  $\frac{\omega}{2\pi}$  - рабочая частота ультразвуковой колебательной системы, (Гц),  $l_p$  - толщина пьезоэлектрического элемента, (м).

Для получения плавного экспоненциального перехода изменение диаметра  $D_z$  определяется выражение

$$D_z = D_1 \cdot e^{-\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot z}{c_2}},$$

где  $z$  изменяется в пределах от 0 до  $l_z$ .

На пятом этапе определяются геометрические размеры узла крепления УЗКС в корпусе. Размер  $l_y$  зависит от величины осевой нагрузки на излучающую поверхность рабочего инструмента. Он принимается равным  $l_d/2$ . По заданным параметрам пояса крепления определяется его эквивалентная длина

$$l_y^3 = \frac{D_y^2 \cdot l_y}{D_1^2}.$$

На этом же этапе определяется размер задней отражающей накладки  $l_{pass}$  из материала  $m_2$

$$l_{pass}^3 = l_1 - (l_4 - l_y + l_y^3),$$

$$l_{pass} = \frac{l_{pass}^3 \cdot c_2}{c_1}.$$

На шестом этапе определяется значение выходного цилиндрического участка  $l_3$  концентратора ультразвуковой колебательной системы с учетом геометрических размеров и типа рабочего инструмента

$$l_3 = l_2 - \frac{4V}{\pi \cdot K_{изг} \cdot D_2^2},$$

где  $V$  – объем рабочего инструмента,  $K_{изг}$  – коэффициент изгибных колебаний, определяемый геометрическими размерами и формой рабочего инструмента.

В результате последовательного выполнения всех этапов определяются размеры колебательной системы.

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПОЛУВОЛНОВЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Вместе с тем, предложенная и разработанная методика инженерного расчета, позволяет получить результаты, не учитывающие изменений внутренних диаметров пьезо-керамических элементов, различий в моментах предварительного сжатия пьезоэлементов, необходимости выполнения различных технологических лысок, крепежных узлов, на различных участках УЗКС; различий в резьбовых соединениях, а также условий крепления УЗКС в корпусе или технологической линии. Определение этих параметров в процессе изготовления и практической отработки практических конструкций сложно и дорого. Поэтому, сконструированная и рассчитанная колебательная система предварительно исследуется методом математического моделирования, обеспечивающим проверку полученных расчетных результатов. Для этих целей предложено использовать метод конечных элементов, реализуемый прикладным программным продуктом ANSYS 8.1 [4]. Модель колебательной системы с учетом результатов инженерного расчета создается посредством системы автоматизированного проектирования, например КОМПАС 6. Далее производится расчет методом конечных элементов с учетом влияния всех факторов. Определяются основные параметры УЗКС: собственная резонансная частота, коэффициент усиления, значение и распределение внутренних механических напряжений, распределение колебаний излучающей поверхности рабочего инструмента. С учетом результатов в первоначальную модель при необходимости вносятся соответствующие изменения и поправки.

Проведен расчет различных ультразвуковых колебательных систем при разном диаметре выходного участка концентратора при замене экспоненциального перехода радиальным. Радиус варьировался в пределах от  $R$  до  $2,5R$ , где

$$R = \frac{4l_z^2 + (D_1 - D_2)^2}{4(D_1 - D_2)}$$

Такая замена обусловлена не только технологической простотой изготовления плавного радиального перехода, но и улучшением основных параметров УЗКС. Полученные результаты исследований представлены в виде зависимостей коэффициента усиления, собственной резонансной частоты и максимальных механических напряжений на рис. 3.

Анализ результатов моделирования позволил установить, что оптимальный радиус

плавного перехода должен соответствовать  $1,1-1,2R$ . Наблюдаемое при этом уменьшение частоты (при расчетном значении 21 кГц) обуславливается погрешностью моделирования (не менее 2-5 %) и компенсируется путем введения поправочных коэффициентов на четвертом этапе инженерного расчета при вычислении длин  $l_1, l_2, l_z$ .

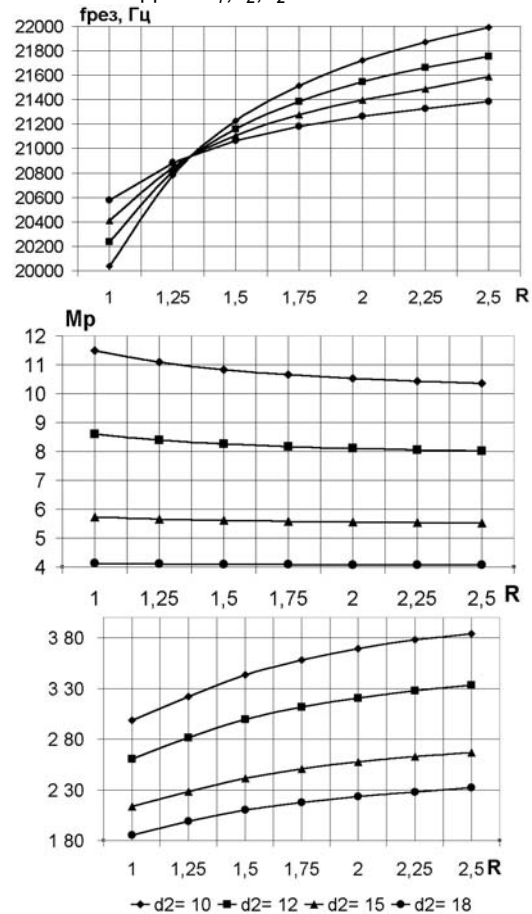


Рисунок 3 – Изменение коэффициента усиления  $M_p$  (б), собственной резонансной частоты  $f$  (а) и максимальных механических напряжений  $\sigma_{max}$  (в)

Анализ процесса ввода энергии УЗ колебаний в обрабатываемые среды через различные по площади и форме рабочие инструменты требует проектирования различных рабочих инструментов для созданных полуволновых колебательных систем.

Рабочий инструмент по отношению к концентратору рассматривается как дополнительная масса, присоединенная к выходному торцу и понижающая резонансную частоту концентратора. Используя различные по массе рабочие инструменты, можно расширить функциональные возможности разрабатываемого УЗ оборудования, т.е. интенсифицировать различные процессы: экстракция,

диспергирование, эмульгирование посредством одной ультразвуковой колебательной системы.

Для проектирования разных по массе рабочих инструментов получена аналитическую зависимость между рабочей частотой ультразвуковой колебательной системы и площадью рабочей поверхности используемого инструмента

$$\omega = \sqrt{\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}},$$

где  $a = L^2 C^2 (AS - 4U_1^2)$ ,  $c = AS - U_1^2$ ,  
 $b = AS(C^2 R^2 - 2LC) + 4LCU_1^2$ ,  $A = \frac{I}{k}$ ,  $C$  – ем-

кость пьезоэлементов,  $L$  – индуктивность дросселя,  $R$  – активное сопротивление корректирующего фильтра, включающего УЗКС,  $S$  – площадь излучающей поверхности инструмента,  $U_1$  – напряжение питания,  $I$  – интенсивность УЗ колебаний,  $k$  – постоянная величина, определяемая параметрами пьезоэлементов колебательной системы.

Как известно, оптимальным по форме инструментом для воздействия на жидкие и жидкодисперсные среды является рабочий инструмент грибовидной формы. Поэтому для высокоинтенсивного ультразвукового воздействия на жидкие и жидкодисперсные среды предложен и разработан рабочий излучающий инструмент грибовидной формы. Он представляет собой усеченный конус, схематично показанный на рис. 4.

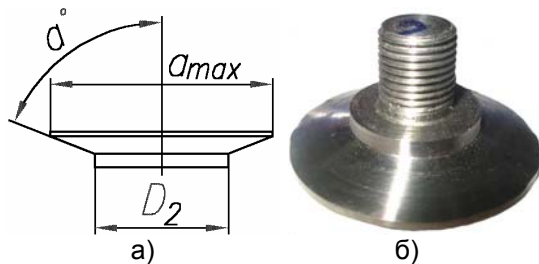


Рисунок 4 – Грибовидный рабочий инструмент для воздействия на жидкие и жидкодисперсные среды: а – конструкция, б – внешний вид

Диаметр излучающей поверхности выбирается из соображения обеспечения равномерного поршневого движения на излучающей поверхности. Для определения оптимального угла раскрытия конуса  $\alpha$ , при котором обеспечивается максимальный вывод ультразвуковой энергии при наибольшем электроакустическом КПД ультразвуковой ко-

лебательной системы, был проведен ряд экспериментов. Результаты показаны на рис. 5.

В качестве объектов исследования выступали различные полуволновые колебательные системы с грибовидными рабочими инструментами. Рабочие инструменты отличались разными диаметрами  $a_m$ , и различным углом раскрытия  $\alpha$ .

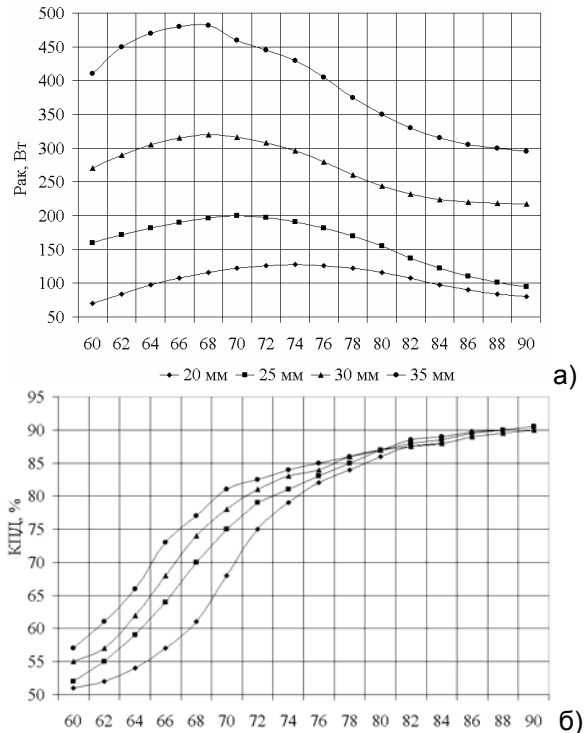


Рисунок 5 – Зависимость акустической мощности (а), вводимой в обрабатываемую среду, и электроакустического КПД (б) от угла раскрытия  $\alpha$

Полученные результаты позволили установить оптимальное значение угла  $\alpha$  для различных диаметров выходного торца концентратора, а именно: для диаметра 12 мм оптимальный угол составляет  $75^\circ$  при  $a_{max}$  равным 20 мм; для диаметра 15 мм оптимальный угол составляет  $73^\circ$  при  $a_{max}$  равным 25 мм; для диаметра 18 мм оптимальный угол составляет  $71^\circ$  при  $a_{max}$  равным 30 мм; для диаметра 20 мм оптимальный угол составляет  $69^\circ$  при  $a_{max}$  равным 35 мм. Интенсивность ультразвукового воздействия была равна  $24,85 - 29,8$  Вт/см<sup>2</sup>.

Критерий оптимальности – это выполнение условия  $\max(P_{ак} \cdot КПД)$ .

Высокое значение (не менее 80 %) электроакустического КПД объясняется перемещением парогазового облака от излучающей поверхности рабочего инструмента вглубь

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПОЛУВОЛНОВЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

обрабатываемого технологического объема. Это обусловлено распределением колебаний излучающей поверхности (рис. 6).

В случаях а) и б) проводилось измерение пьезоэлектрическим измерительным преобразователем с точечным контактом при питании полуволновой ультразвуковой колебательной системы напряжением 15 В от низковольтного генератора. В случае в) измерения осуществлялись посредством стробоскопического метода при питании колебательной системы напряжением 1,2-1,4 кВ непосредственно от генератора электрических колебаний, входящего в состав УЗ технологического оборудования.

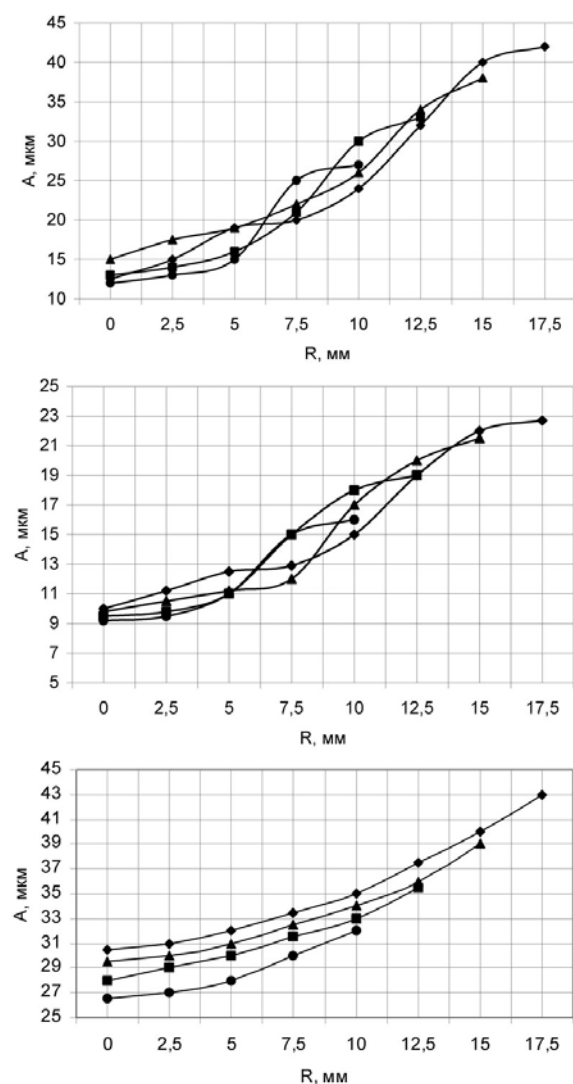


Рисунок 6 – Распределение колебаний излучающей поверхности грибовидного рабочего инструмента: а – индустриальное масло, б – водопроводная вода, в – воздух

Результаты измерений, проведенные для различных обрабатываемых сред на раз-

ных колебательных системах, показывают, что амплитуда колебаний к периферии грибовидного рабочего инструмента относительно его центра увеличивается в два–три раза. Такое распределение свидетельствует о нарушении поршневого движения излучающей поверхности, однако, при кавитационном УЗ воздействии играет положительную роль.

«Махательные» движения периферийной части рабочего инструмента препятствуют образованию парогазового облака на излучающей поверхности и способствуют распространению кавитационного облака вглубь обрабатываемого технологического объема. Это позволяет выводить в среду большую ультразвуковую энергию, и, соответственно, увеличивать эффективность воздействия.

Таким образом, созданная методика инженерного расчета и разработанная методика моделирования позволили создать практические конструкции колебательных систем для всех типов технологических аппаратов. В результате исследований и измерений было подтверждено значительное повышение эффективности ультразвуковых технологических аппаратов за счет применения созданных колебательных систем и инструментов. Так максимальный электроакустический КПД при воздействии на водную среду был увеличен с 50-65 % до 82-85 %, а при воздействии на масляные среды был увеличен с 30-35 % до 70-74 %.

Практически реализованные методики и результаты исследований позволили создать практические конструкции ультразвуковых колебательных систем для УЗ аппаратов и повысить эффективность ультразвукового воздействия при реализации технологических процессов в жидких и жидко – дисперсных средах.

Таким образом, в результате исследований.

1. Разработана новая конструктивная схема ультразвуковой колебательной системы, способная обеспечить коэффициент усиления 12-17 и амплитуду колебаний до 100...200 мкм.

2. Предложена и практически апробирована методика инженерного расчета, позволяющая увеличить точность расчета, учесть изгибные колебания, учесть влияние рабочего инструмента, пьезоэлементов, материала концентратора и отражательной накладки на характеристики УЗКС, определить параметры всех составных частей ультразвуковой колебательной системы.

3. Для исследования технических характеристик без изготовления практических конструкций, разработана методика математического моделирования, позволившая рассчитать основные параметры УЗКС с точностью 2-5 %.

4. Разработаны и исследованы рабочие инструменты грибовидной формы, обеспечившие увеличение вводимой в обрабатываемые среды акустической энергии (максимальный электроакустический КПД увеличен до 82-85 %).

Создан ряд практических конструкций для различных технологических аппаратов (рис. 7), подтвердивших правильность методики инженерного расчета и соответствие результатов моделирования измеренным параметрам УЗКС.



Рисунок 7 – Ультразвуковые колебательные системы различного технологического назначения

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ультразвуковая технология. Под ред. Б.А. Аграната. - М.: Металлургия, 1974.
2. Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н. Ультразвуковая колебательная система Патент РФ № 2141386.
3. Хмелев В.Н., Попова О.В. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве. Барнаул, Изд-во АлтГТУ, 1997.
4. Stewart Sherrit, Benjamin P. Dolgin, Yoseph Bar-Cohen, Dhermendra Pal, Jason Kroh, Tom Peterson Modeling of Horns for Sonic/Ultrasonic Applications IEEE Ultrasonic Symposium, 1999.