

В. Н. Хмелев^{*}, С. Н. Цыганок, Р. В. Барсуков, А. Н. Лебедев

*Бийский Технологический институт ГОУ ВПО АлтГТУ, г. Бийск, 659305, Трофимова, 27
Лаборатория акустических процессов и аппаратов*

Полуволновые пьезоэлектрические ультразвуковые колебательные системы

Получена 01.07.2005, опубликована 19.08.2005

Статья посвящена решению проблемы повышения эффективности ультразвуковых технологических процессов за счет создания условий, обеспечивающих увеличение ввода энергии ультразвуковых колебаний 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 и методика моделирования процесса формирования УЗ колебаний — для определения технических характеристик УЗКС. Полученные результаты позволили создать практические конструкции колебательных систем для различных типов технологических аппаратов.

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 при осуществлении ультразвуковых технологий являются резонансные 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 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

^{*}e-mail: vnh@bti.secna.ru

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, соответственно, максимальный ввод энергии в обрабатываемые среды. Обеспечить идеальное согласование практически невозможно по следующей причине. При вводе УЗ колебаний 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 вводимой в среды энергии. Для исключения рассогласования по частоте в процессе работы, при проектировании и изготовлении колебательных систем обеспечивают предварительное рассогласование преобразователя и концентратора на определенную величину, оптимальную для конкретной технологической среды.

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 достигается применением концентраторов. Для оптимального согласования коэффициент усиления должен составлять 12–17 [1]. Столь высокие коэффициенты усиления можно получить только ступенчатыми концентраторами. Однако 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 этой причине, на практике не используются концентраторы с коэффициентом усиления более 3–5.

Проведенный анализ возможных конструктивных схем преобразователей, концентраторов и рабочих инструментов позволил установить, что большая часть принципиальных ограничений, присущих двухполуволновой конструктивной схеме колебательной системы, может быть устранена применением колебательных систем, объединяющих в полуволновой конструктивной схеме пьезоэлектрический преобразователь, концентратор с высоким коэффициентом усиления и любой по

размерам рабочий инструмент. 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.

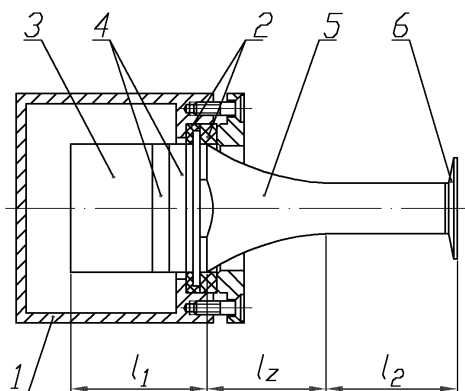


Рис. 1. Конструктивная схема полуволновой пьезоэлектрической УЗКС

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). При этом любые изменения параметров инструментов и обрабатываемых сред ведут к предсказуемым изменениям резонансной частоты колебательной системы и легко компенсируются изменением рабочей частоты электронного генератора.

На основе полуволновой конструктивной схемы возможно 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), различными сечениями цилиндрического участка концентратора, различными рабочими инструментами. В обобщенном виде колебательная система с основными, подлежащими определению, геометрическими размерами показана на рис. 2.

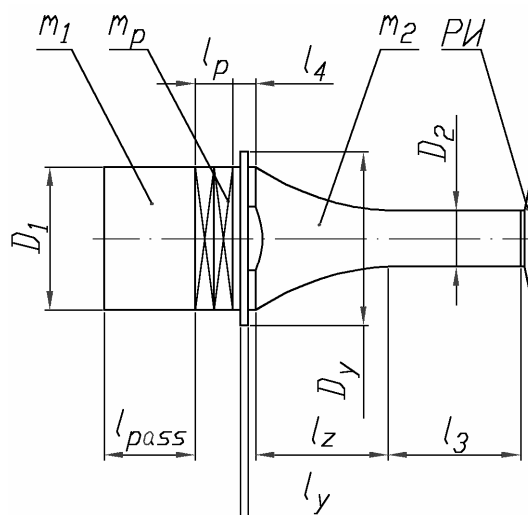


Рис. 2. Полуволновая УЗКС с основными конструктивными размерами:

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, амплитуда колебаний излучающей поверхности инструмента, количество вводимой акустической энергии, необходимой и достаточной для осуществления технологического процесса. По этим параметрам рассчитывается необходимая интенсивность излучения I на поверхности рабочего инструмента. Для эффективного воздействия на различные технологические среды в режиме «развитой» кавитации значение интенсивности должно быть в пределах 10–15 Вт/см².

Далее, для обеспечения заданной интенсивности излучения, определяется коэффициент усиления M_p колебательной системы, при условии, что максимальная величина смещения 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 40Х13, 30ХГСА и подобные им стали. Для обработки агрессивных сред используются нержавеющие стали типа 12Х18Н10Т, а также титановые сплавы. Отражающая частотопонижающая накладка выполняется из углеродистых сталей обычного качества типа сталь 45.

Для колебательных систем применяются пьезокерамические материалы с высокими значениями добротности, высокой температурой Кюри, повышенными значениями пьезомодулей, низким значением тангенса угла диэлектрических потерь при высоких напряжениях. Наиболее пригодными для построения колебательных систем 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 определяется отношение диаметров N .

На четвертом этапе определяются длины цилиндрических и экспоненциального участков УЗКС, по следующим формулам [2]:

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

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

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

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); $\omega/2\pi$ — рабочая частота ультразвуковой колебательной системы, (Гц); l_p — толщина пьезоэлектрического элемента, (м).

Для определения параметров плавного экспоненциального перехода (изменения диаметра D_z) используются следующая зависимость

$$D_z = D_1 e^{\frac{2\pi f_z}{c_2}},$$

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 $l_4/2$. По заданным параметрам пояса крепления определяется его эквивалентная длина:

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

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

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

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

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

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

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

В результате последовательного выполнения всех этапов определяются все необходимые для изготовления практической конструкции размеры колебательной системы.

Вместе с тем, предложенная и разработанная методика инженерного расчета не позволяет получить результаты, учитывающие изменения внутренних диаметров пьезокерамических элементов, различия в моментах предварительного сжатия пьезоэлементов, необходимость выполнения различных технологических лысок, крепежных узлов, на различных участках УЗКС, различия в резьбовых соединениях, условиях крепления УЗКС в корпусе или технологической линии. Определение этих параметров в процессе изготовления и отработки практических конструкций сложно и дорого. Поэтому сконструированная колебательная система предварительно исследуется методом математического моделирования, обеспечивающим проверку полученных расчетных результатов. Для этих целей предложено использовать метод конечных элементов, позволяющий получить достоверные результаты с высокой степенью приближения к реальным конструкциям за короткий промежуток времени [4]. Колебательной системы с учетом результатов инженерного расчета создается посредством системы автоматизированного проектирования в виде 3D модели с учетом типов используемых материалов. 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.

Предложенная методика позволила провести расчет различных ультразвуковых колебательных систем при различных диаметрах выходного участка концентратора при замене участка экспоненциального перехода радиальным. Радиус варьировался в пределах от R_0 до $2,5R_0$, где $R_0 = \frac{4l_z^2 + (D_1 - D_2)^2}{4(D_1 - D_2)}$.

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

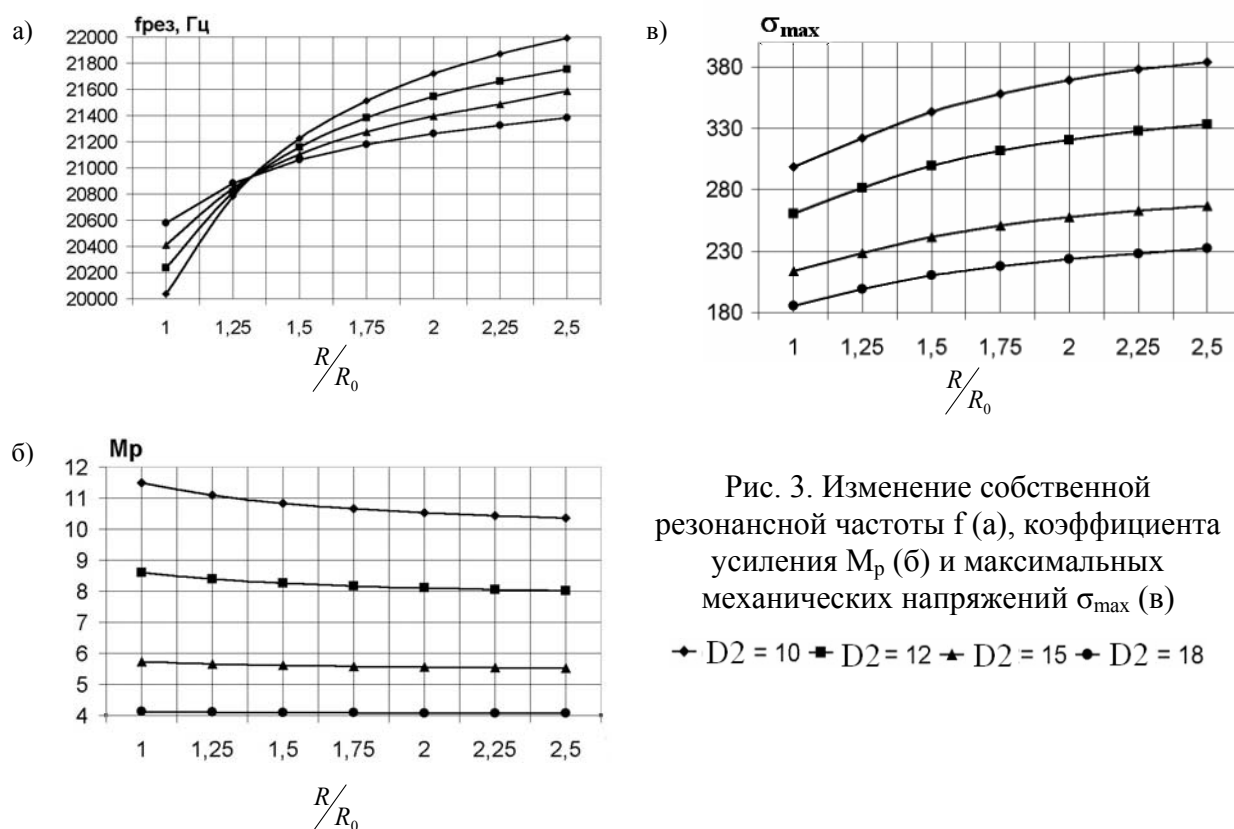


Рис. 3. Изменение собственной резонансной частоты f (а), коэффициента усиления M_p (б) и максимальных механических напряжений σ_{max} (в)

◆ $D_2 = 10$ ■ $D_2 = 12$ ▲ $D_2 = 15$ ♦ $D_2 = 18$

Анализ результатов моделирования позволил установить, что оптимальный радиус плавного перехода должен соответствовать $1,25 - 1,3R_0$. 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 .

Необходимость ввода УЗ колебаний в обрабатываемые среды через различные по площади и форме излучающие поверхности требует проектирования различных рабочих инструментов для созданных полуволновых колебательных систем.

Рабочий инструмент по отношению к колебательной системе рассматривается как дополнительная масса, присоединенная к выходному торцу и понижающая резонансную частоту всей системы. 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 [5]:

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

где $a = L^2 C^2 (AS - 4U_1)$, $b = AS(C^2 R^2 - 2LC) + 4LCU_1^2$, $c = AS - U_1^2$, $A = I/k$; C — емкость 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 [5].

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.

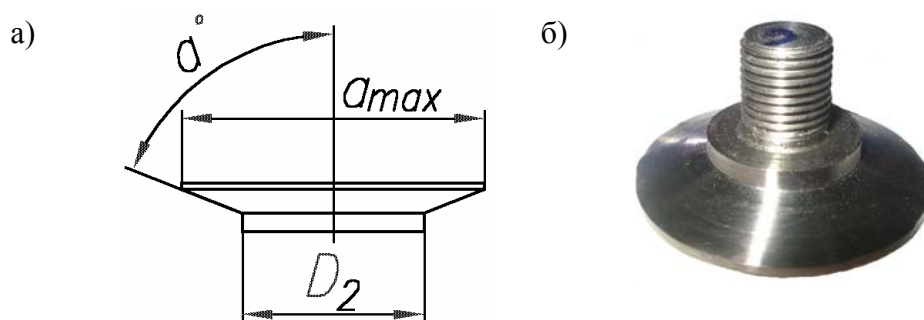


Рис. 4. Грибовидный рабочий инструмент для воздействия на жидкие и жидкодисперсные среды: а — конструкция, б — внешний вид

Диаметр излучающей поверхности и форма обратного конуса выбирается из необходимости обеспечения равномерного поршневого движения на излучающей поверхности. Для определения оптимального угла раскрытия конуса α , при котором обеспечивается максимальный ввод ультразвуковой энергии при наибольшем

электроакустическом КПД ультразвуковой колебательной системы, был проведен ряд экспериментов, результаты которых представлены на рис. 5.

В качестве объектов исследования выступали различные полуволновые колебательные системы с грибовидными рабочими инструментами. Рабочие инструменты отличались диаметрами a_m , и различными углами раскрытия α .

Полученные результаты позволили установить оптимальное значение угла α для различных диаметров выходного торца концентратора, а именно:

- для диаметра 12 мм оптимальный угол составляет 75° при a_m 20 мм;
- для диаметра 15 мм оптимальный угол составляет 73° при a_m 25 мм;
- для диаметра 18 мм оптимальный угол составляет 71° при a_m 30 мм;
- для диаметра 20 мм оптимальный угол составляет 69° при a_m 35 мм.

Интенсивность ультразвукового воздействия была равна от 5 до 30 Вт/см². Критерий оптимальности — это выполнение условия: $\max(P_{ак} \cdot КПД)$, где $P_{ак}$ — мощность УЗ колебаний, вводимых в обрабатываемые среды.

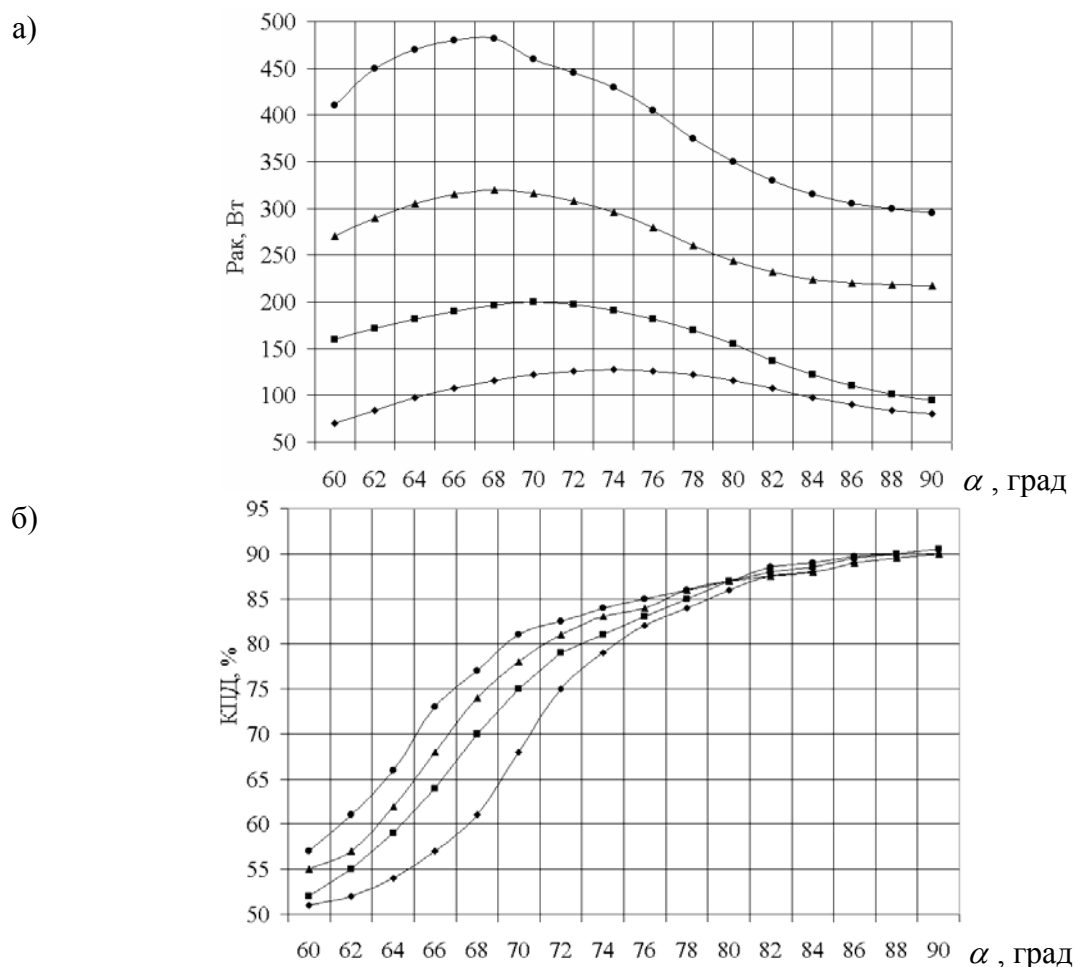


Рис. 5. Зависимость акустической мощности, вводимой в обрабатываемую среду (а), и электроакустического КПД (б) от угла раскрытия обратного конуса α

—♦— 20 мм —■— 25 мм —▲— 30 мм —●— 35 мм

Высокое значение электроакустического КПД (не менее 80%) объясняется перемещением парогазового облака от излучающей поверхности рабочего инструмента вглубь обрабатываемого технологического объема. Это обусловлено распределением колебаний излучающей поверхности (рис. 6).

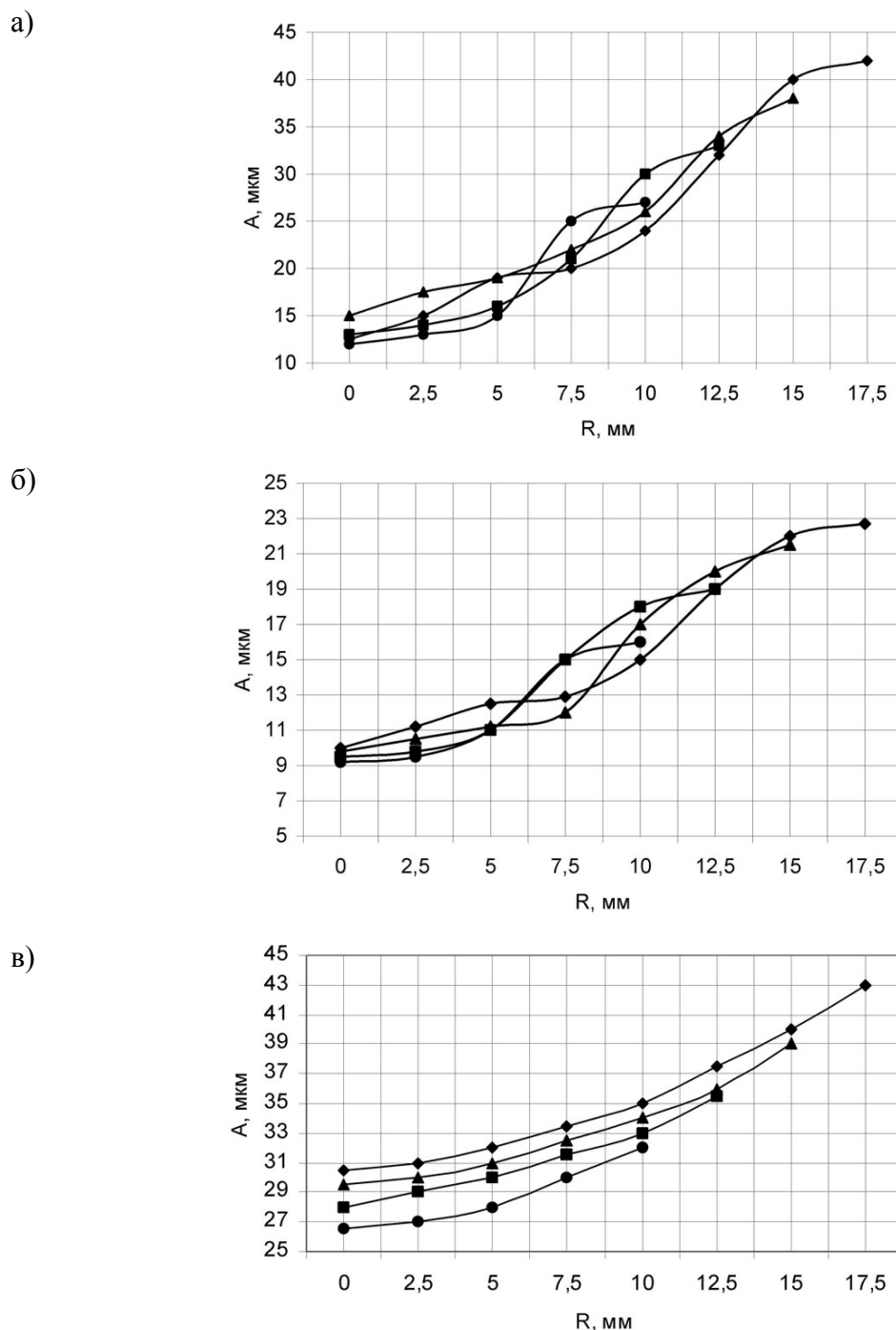


Рис. 6. Распределение колебаний излучающей поверхности грибовидного рабочего инструмента: а — индустриальное масло, б — водопроводная вода, в — воздух

—◆— 35 мм —▲— 30 мм —■— 25 мм —●— 20 мм

В случаях а) и б) проводились измерения 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 [6].

Результаты измерений, проведенных для различных обрабатываемых сред на разных колебательных системах, показывают, что амплитуда колебаний к периферии грибовидного рабочего инструмента относительно его центра увеличивается в 2–3 раза. Такое распределение свидетельствует о нарушении поршневого движения излучающей поверхности, однако при УЗ воздействии в кавитационном режиме играет положительную роль.

«Махательные» движения периферийной части рабочего инструмента препятствуют формированию парогазового облака на излучающей поверхности и способствуют распространению кавитационного облака вглубь обрабатываемого технологического объема. Это позволяет увеличить ввод ультразвуковой энергии в среды и, соответственно, увеличивать эффективность воздействия.

Таким образом, созданная методика инженерного расчета и разработанная методика моделирования позволили создать практические конструкции колебательных систем для различных 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 с 30–35% до 70–74%.

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 полуволновой ультразвуковой колебательной системы, способная обеспечить коэффициент усиления 12–17 и амплитуду колебаний до 100–200 мкм.
2. Предложена и практически апробирована методика инженерного расчета, позволившая увеличить точность определения параметров колебательных систем, 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%).

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



Рис. 7. Ультразвуковые колебательные системы различного технологического назначения

ЛИТЕРАТУРА

1. Ультразвуковая технология. Под ред. Б. А. Аграната. М.: Металлургия, 1974.
2. Ультразвуковая колебательная система. Патент РФ № 2141386. Хмелев В. Н., Барсуков Р. В., Цыганок С. Н.
3. Хмелев В. Н., Попова О. В. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве. Барнаул, АлтГТУ, 1997, 168 с.
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.
5. Способ управления ультразвуковой размерной обработкой. Патент РФ № 2131794. Хмелев В. Н., Барсуков Р. В., Цыганок С. Н.
6. Хмелев В. Н., Абраменко Д. С., Савин И. И. Способ измерения амплитуды колебаний излучающей поверхности ультразвуковой колебательной системы. Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях. Межвузовский сборник. Под редакцией Г. В. Леонова. Бийск, АлтГТУ, 2004, 230–235.