

Лекция 3

Пьезоэлектрические излучатели для создания ультразвуковых колебаний

Уважаемые Студенты, Магистранты, Аспиранты, Коллеги!

(Слайд 1). Предлагаемое Вам сообщение (лекция) посвящено рассмотрению современного состояния ультразвуковых колебательных систем, предназначенных для создания ультразвуковых колебаний при их эксплуатации в составе аппаратов научного и промышленного применения.

В этой лекции, как и предыдущих, изложены не только накопленные за многие годы знания, но и мой взгляд на существующие проблемы в конструкциях, проектировании и применении ультразвуковых пьезоэлектрических колебательных систем, а также мой подход к решению этих проблем.

Раскрыть все особенности современных пьезоэлектрических излучателей (колебательных систем) в одной лекции невозможно, поэтому я не претендуем на всеобъемлющее рассмотрение всех возможных УЗ колебательных систем и на полное решение всех проблем,

Поэтому эта лекция представляется Вам как маленькая частичка моего вклада и вклада моего коллектива, которая позволит Вам понимать возможности применения различных излучателей при решении конкретных задач, возникающих перед Вами при организации новых производств или решении проблем существующих старых технологий.

Как обычно, прежде чем приступить к сути сообщения – кратко о том: кто я и откуда.

(Слайд 2). Я научный руководитель большого коллектива. Это научная школа, это лаборатория акустических процессов и аппаратов в Алтайском государственном техническом университете, это малые инновационные

предприятия, создающие и производящие большое количество разнообразных ультразвуковых аппаратов.

Численно это небольшой, но молодой и дружный коллектив (более 20 человек), официально сформированный 24 мая 1994 года, сегодня реализующий себя как Центр ультразвуковых технологий.

Объединяет коллектив ультразвук. Он создает возможности (и научные и финансовые), он объединяет и направляет нашу деятельность.

В предыдущей лекции я говорил о промышленных аппаратах и их применении. Сегодня мы начинаем рассмотрение и анализ составляющих этих аппаратов.

Предваряя последующие лекции хочу отметить, что далее будут две лекции, посвященные ультразвуковым излучателям (колебательным системам) и электронным генераторам (источникам электрической энергии ультразвуковой частоты) для их питания.

И так (Слайд 3).

Ультразвуковые технологии, основанные на применении ультразвуковых колебаний высокой интенсивности, широко применяются в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве. Об этом мы говорили в рамках предыдущей лекции и я хотел бы напомнить о широчайшем применении ультразвуковых технологий и огромной потребности в аппаратах для реализации таких технологий.

Сегодня растущие потребности промышленного производства и потребителей обуславливают необходимость постоянного совершенствования технологических процессов, т.е. требуют непрерывного создания все новых ультразвуковых аппаратов. Это требует активного развития и совершенствования всех элементов ультразвуковых технологических аппаратов, и в первую очередь, источников ультразвукового воздействия - ультразвуковых колебательных систем. Такие системы являются основой ультразвуковых аппаратов, поскольку именно

они обеспечивают формирование ультразвуковых колебаний и их введение в обрабатываемые среды.

Поэтому, одной из основных задач, решаемых при создании высокоэффективного ультразвукового оборудования, является проектирование и изготовление источников излучения (ультразвуковых колебательных систем), необходимых для реализации конкретных процессов и поэтому, обеспечивающих не только преобразование электрических колебаний в упругие, их усиление, преобразование и введение колебаний в обрабатываемые среды, но и воздействие на технологические среды с максимальной эффективностью.

Перед Вами работа излучателя в жидкой среде – процесс ультразвукового воздействия на жидкость (слайд 4). Здесь показано, что ультразвуковое воздействие при помощи традиционных излучателей осуществляется в очень маленьких объемах. Это одна из многочисленных проблем, подлежащих решению.

Решение этой и множества других задач связано с рядом трудностей, возникающих при выборе конструктивных схем, материалов пьезоэлектрических элементов и элементов колебательной системы из различных металлов, отсутствием достоверных математических моделей, описывающих резонансные свойства сложных волноводных конструкций, отсутствием универсальных методик расчетов и технологий изготовления.

К сожалению, в последние годы, решению перечисленных задач уделяется слишком мало внимание. Современные исследования, как правило, направлены на решение узкоспециализированных задач создания ультразвуковых колебательных систем для реализации определенных технологических процессов. Общих теорий и фундаментальных исследований практически не проводится.

Предлагаемая Вам лекция призвана обобщить накопленные теоретические, экспериментальные и практические результаты, полученные за последние 30 лет при создании разнообразных технологических аппаратов

и дать рекомендации, которые позволят совершенствовать существующие и создавать новые источники ультразвуковых воздействий - ультразвуковые колебательные системы.

Автор считает, что работа будет полезной для специалистов, поскольку позволит улучшить качество и эффективность производимого универсального и специализированного ультразвукового оборудования, снизить стоимость производства различных типов ультразвуковых колебательных систем за счет уменьшения временных затрат на проектирование, выбора необходимых конструктивных схем и снижения количества брака при производстве.

Что же такое ультразвуковая колебательная система, используемая в качестве источника (излучателя) ультразвуковых колебаний.

Слайд 5.

Ультразвуковая колебательная система (УЗКС) состоит из преобразователя, согласующего элемента (бустера) концентратора и рабочего инструмента с излучающей поверхностью необходимой формы и размера.

В преобразователе (активном элементе УЗКС) осуществляется преобразование энергии электрических колебаний в механические, т.е. создается знакопеременная механическая сила. Согласующий элемент передает акустическую энергию на концентратор или рабочий инструмент и служит для крепления УЗКС в технологических аппаратах, если это регламентируется конструктивными особенностями. Если амплитуды колебаний преобразователя недостаточно для реализации какого либо технологического процесса применяют концентраторы, которые увеличивают амплитуду колебаний до необходимого значения и передают их к рабочему инструменту. Рабочий инструмент, совершая колебания, через свою излучающую поверхность осуществляет ультразвуковое воздействие на обрабатываемую среду.

Слайд 6.

Основой пьезоэлектрического излучателя для создания ультразвуковых колебаний являются элементы из специальных материалов, обладающих пьезоэлектрическим эффектом. Что такое пьезоэффект - мы рассматривали на первой лекции. Напоминаю, что это изменение геометрических размеров специальных материалов под действием электрического поля. Из таких пьезоэлектрических материалов изготавливают изделия различной формы и назначения с большим выбором типоразмеров. Такие изделия называются пьезоэлектрическими элементами. Пьезоэлектрические элементы являются базовыми элементом (основой) любых пьезоэлектрических преобразователей, поскольку именно они обеспечивают преобразование электрических колебаний в механические.

Существует общепринятое в нашей и зарубежной практике условное деление типовых пьезоэлементов в зависимости от их конфигурации: пластина (plate), диск (disc), кольцо (ring), брусок (bar), стержень (rod), цилиндр (cylinder). Примеры производимых промышленностью пьезоэлектрических элементов представлены на слайде 6.

Основными поставщиками пьезоэлектрических материалов в России являются фирмы Аврора-Элма (г. Волгоград) и ЭЛПА (г. Зеленоград). За рубежом аналогичную продукцию выпускают такие фирмы как APC Intrnational Ltd (США). В КНР успешно работают как самостоятельные производства, так и филиалы американских и европейских производителей.

Для создания ультразвуковых преобразователей самыми распространенными типоразмерами пьезоэлектрических колец являются размеры 50x20x6мм и 38x16x5 мм.

Пьезоэлектрический элемент характеризуется рядом технических характеристик, определяющих его функциональное назначение. Одним из основных параметров пьезоэлектрических элементов является его собственная резонансная частота, определяемая геометрическими размерами и скоростью распространения ультразвуковых колебаний в пьезоматериале.

Поскольку особенности технологии изготовления (необходимость обеспечения однородности материала и поляризации элемента напряжением до 2000 В/мм) не позволяет изготавливать пьезоэлементы толщиной более 20–30 мм и диаметром более 50–70 мм возникает необходимость создания на основе высокочастотных пьезоэлектрических элементов специальных ультразвуковых колебательных систем, собственные резонансные частоты которых лежат в диапазоне 18–44 кГц.

Это так называемые преобразователи Ланжевена (Слайд 7), в которых пьезоэлектрические элементы размещаются между частотнопонижающими металлическими накладками.

Для прямой передачи ультразвуковых колебаний от преобразователя на необходимые расстояния применяются резонансные (кратные половине длину волны УЗ колебаний в используемом материале) проставки – согласующие волноводы или бустерные звенья.

Таким образом, в преобразователе (активном элементе УЗКС) создается знакопеременная механическая сила. Согласующий элемент передает акустическую энергию на рабочий инструмент и служит для крепления УЗКС в технологических аппаратах, если это регламентируется конструктивными особенностями.

Рабочие инструменты (Слайд 8) обеспечивают вывод ультразвуковых колебаний из преобразователя и обеспечивают необходимое воздействие на обрабатываемые среды. В зависимости от решаемой задачи и необходимых параметров воздействия используются различные инструменты.

Различные по форме и размерам рабочие инструменты, совершая колебания, осуществляет различное по силе (эффективности) ультразвуковое воздействие на обрабатываемую среду через свою излучающую поверхность

Более того, даже инструмент одного типа, для примера на слайде представлен инструмент грибкового типа, обеспечивает введение в жидкие среды различных по мощности колебаний. Обратите внимание, грибковый

инструмент с углом раскрытия в 120 градусов способен обеспечить выведение максимальной энергии при равной излучающей поверхности.

Более подробно различные инструменты будет рассмотрены далее.

Слайд 9.

Если амплитуды колебаний преобразователя недостаточно для реализации нужного нам технологического процесса применяют концентраторы, которые увеличивают амплитуду колебаний до необходимого значения и передают их к рабочему инструменту. Назначение концентраторов – обеспечение необходимого коэффициента усиления. Этот коэффициент определяется формой перехода и отношением входного и выходного диаметров волноводного звена.

Концентраторы выполняют роль звеньев резонансной длины, усиливающих амплитуду колебаний и передающих энергию колебаний от преобразователя к рабочему инструменту. Концентраторы представляют собой стержни переменного сечения, в которых усиление амплитуды колебаний происходит благодаря уменьшению колебательной скорости при переходе от большего сечения к меньшему. В зависимости от вида перехода различают ступенчатый, экспоненциальный, катеноидальный, конический и ампульный (концентратор Фурье) концентраторы. Все концентраторы характеризуются различными коэффициентами усиления, разными распределениями механических напряжений и коэффициентами согласования с технологической средой. Уменьшение механических напряжений в узле колебаний ступенчатых и составных концентраторов достигается плавными переходами (галтелями). Наиболее выгодными в отношении возможности получения значительных амплитуд колебаний на излучающей поверхности при малой нагрузке являются ступенчатые концентраторы, у которых коэффициент усиления равен отношению площади входного и выходного сечений. Но в отношении способности передачи колебательной энергии в нагрузку такие концентраторы значительно уступают коническим и экспоненциальным. Обусловлено это

тем, что УЗКС со ступенчатыми концентраторами характеризуются узкой полосой рабочих частот и, следовательно, весьма ограниченной возможностью перестройки по частоте при изменении нагрузки. Большие напряжения, возникающие в зоне перехода между ступенями при работе с амплитудами свыше 20 мкм, обуславливают сильный нагрев и, как следствие, значительное изменение частоты колебаний в системе. Ступенчатые концентраторы из-за высоких механических напряжений быстро выходят из строя, вследствие появления усталостных трещин.

Таки образом, использование концентраторов с высоким коэффициентом усиления не всегда возможно, поскольку уменьшение диаметра выходной части значительно снижает прочностные характеристики, при этом значительно снижается площадь излучающей поверхности, что в некоторых случаях недопустимо.

Поэтому наиболее эффективное на сегодня решение – объединение различных переходов, в частности выполнение ступенчатого концентратора с радиальным переходом.

Исследование различных областей применения ультразвуковых колебаний, а также развитие новых направлений развития ультразвуковой техники значительно расширило номенклатуру разрабатываемых и изготавливаемых УЗКС. Разнообразие и все более нарастающая сложность технологических процессов, требуют от разработчиков ультразвукового оборудования все большей гибкости в части конструирования УЗКС. Это приводит также к все более возрастающему числу различных вариантов и появлению новых конструкций источников ультразвукового воздействия на различные технологические среды.

В связи с этим возникает необходимость классификации используемых и создаваемых УЗКС по присущим им основным признакам.

В общем случае можно представить следующую классификацию.

1) По способу воздействия на объект технологической обработки УЗКС различаются:

- УЗКС для обработки объекта через промежуточную технологическую среду (очистка, диспергирование);

- УЗКС для непосредственного воздействия на объект (УЗ сварка, размерная обработка);

- УЗКС для комбинированного воздействия (очистка изделий при их контактном возбуждении ультразвуком).

2) По областям применения подразделяются на:

- УЗКС для кавитационной обработки жидких сред;

- УЗКС для сварки и резки полимерных материалов;

- УЗКС для воздействия на газовые среды;

- УЗКС медицинского назначения;

- УЗКС для размерной обработки хрупких материалов и резания металлов;

- УЗКС для мелкодисперсного распыления жидкостей;

- УЗКС специализированного промышленного назначения.

3) По величине продольного размера резонансные УЗКС различаются по количеству формируемых вдоль системы длин полуволн

- однополуволновые

- двухполуволновые;

- трех- и более полуволновые (многополуволновые).

4) По положению пакетов пьезокерамики относительно акустической оси:

- на акустической оси;

- под углом к акустической оси.

5) По использованию специальных материалов для изготовления деталей УЗКС:

- из материалов, подверженных коррозии;

- из коррозионно-стойких материалов.

6) По условиям работы УЗКС разделяются на:

- УЗКС с принудительным воздушным или водяным охлаждением;

- УЗКС без охлаждения;
- УЗКС погружного исполнения.

Таким образом, ультразвуковые колебательные системы характеризуются электрическими и неэлектрическими параметрами (характеристиками).

К электрическим параметрам относятся: рабочая частота, подводимая к УЗКС мощность, добротность, электроакустический КПД.

К неэлектрическим относятся значения механической амплитуды колебаний, добротность, конструктивные размеры УЗКС, определяемые процессом, характеристики естественного или принудительного теплоотвода, герметичности и др.

Кратко про электрические характеристики. Рабочая частота УЗКС устанавливается в зависимости от назначения ультразвукового аппарата. Например, для интенсификации процессов в жидких средах (очистка, диспергирование, растворение) используют частоты в $18 \pm 1,35$ кГц и $22 \pm 1,65$ кГц. Для УЗ сварки термопластичных материалов могут использовать частоты как в 22 кГц, так и в 27 и 30 кГц, для УЗ распыления – частоты в 44 и 66 кГц.

Под подводимой к УЗКС мощностью понимают мощность электрических колебаний ультразвуковой частоты, подводимую к электроакустическому преобразователю. Подводимая мощность выбирается исходя из реализуемого процесса, а также из требуемой производительности.

Добротность – это отношение накопленной в резонансной системе энергии к затратам ее за период. Добротность определяет остроту пиков и вид амплитудно-частотной зависимости, ширину рабочего частотного диапазона, если система работает при изменяемой частоте (возбуждения или собственной), например, вследствие изменения нагрузки, размеров инструмента и др.

К неэлектрическим характеристикам можно отнести:

- производительность УЗКС, которая в зависимости от технологического процесса, выражается в различных величинах.

- конструктивные требования к колебательной системе определяются исходя из ее назначения и условий эксплуатации. В некоторых случаях, к УЗКС могут быть предъявлены специальные требования, определяемые условиями работы, а именно: требования выполнения УЗКС в герметичном исполнении для работы в условиях полного погружения, с особыми системами крепления в технологических установках, требования изготовления элементов УЗКС из коррозионо-стойких материалов и т.п.

Стоит отметить, что электрические и неэлектрические характеристики тесно взаимосвязаны между собой и при конструировании УЗКС это необходимо учитывать для обеспечения максимальных эксплуатационных, энергетических и экономических показателей, а также высокой надежности УЗКС и УЗ аппарата в целом.

Это исходные характеристики систем. Но они существенно меняются в процессе эксплуатации.

Слайд 10.

Несмотря на большое количество работ, посвященных вопросам проектирования и разработки колебательных, большинство УЗКС выполняются по классической двухполуволновой конструктивной схеме, объединяющей полуволновые преобразователь и концентратор. Ее основным недостатком заключается в том, что электромеханический преобразователь и концентратор с рабочим инструментом являются резонансными системами, характеризующимися собственными частотами механических резонансов. При условии обеспечения равенства частот их механических резонансов достигается максимальная амплитуда колебаний рабочего инструмента и, соответственно, максимальный вывод энергии в обрабатываемые среды. Однако обеспечить согласование таких систем практически невозможно по целому ряду причин. Различные внешние и внутренние процессы приводят к существенному изменению электрических и механических характеристик систем и это

необходимо учитывать при их использовании. В частности, на слайде показано, что эксплуатации излучателя в различных режимах требуются различные параметры работы электронного генератора.

Таким образом, применение излучателей, состоящих из нескольких резонансных звеньев (например, преобразователя и концентратора) приводит к рассогласованию резонансных частот звеньев. Как должно быть в идеале, показано на слайде. Так происходит реально. Увеличение числа звеньев усугубляет проблему.

Слайд 11.

Большая часть принципиальных ограничений, присущих двухполуволновой конструктивной схеме, может быть устранена применением колебательных систем, объединяющих в полуволновой конструктивной схеме пьезоэлектрический преобразователь и концентратор с высоким коэффициентом усиления и любым по форме рабочим инструментом

Поэтому (слайд 12) наиболее простейшим и красивейшим решением является объединение пьезопреобразователя и концентратора с инструментом в одну полуволновую резонансную конструкцию.

На слайде 13 представлена конструктивная схема такого излучателя и исходные параметры для ее расчетов. Полуволновая УЗКС представляет собой тело вращения, образующая которого является кусочно-непрерывной кривой, состоящей из трех основных участков: двух цилиндрических (длиной l_1 и l_2) и одного экспоненциального (длиной l_3). Пьезоэлементы расположены между экспоненциальным участком и торцом отражающей накладки. Выбор конструктивной схемы обусловлен необходимостью получения максимального коэффициента усиления (как у ступенчатого концентратора) и наилучшего согласования со средой (как у экспоненциального концентратора).

Слайд 14. В настоящее время при исследовании характеристик применяется метод электромеханических аналогий, т.е. модель пьезоэлектрического излучателя в виде электрических аналогий.

В представленной схеме замещения индуктивность L_M – эквивалентна колеблющейся массе системы, емкость C_M – величине обратной упругости материала системы, активное сопротивление $R_{МП}$ – сопротивлению механических потерь, C_K – электрической емкости пьезокерамических элементов, R_D – диэлектрическим потерям. Сопротивление механических потерь $R_{МП}$ обусловлено внутренним трением частиц материала при колебаниях. Кроме того, в местах закрепления УЗКС также имеются потери механической энергии. Силы трения пропорциональны колебательным скоростям, коэффициент пропорциональности между ними есть активное механическое сопротивление, в котором выделяется мощность потерь. Электрическая емкость C_K обусловлена геометрическими размерами и диэлектрической проницаемостью ϵ_d пьезоматериала преобразователя УЗКС. Индуктивность L_{CP} эквивалентна массе слоя распыляемой жидкости, на излучающей поверхности УЗКС, емкость C_{CP} эквивалентна величине обратной упругости жидкости, активный элемент R_{CP} определяет выход акустической энергии в среду. Элементы L_M , C_M , $R_{МП}$ образуют так называемую собственную механическую ветвь эквивалентной электрической схемы пьезоэлектрической колебательной системы с комплексным сопротивлением $Z_{КЭ}$. Элементы L_{CP} , C_{CP} , R_{CP} образуют так называемую механическую ветвь нагрузки эквивалентной электрической схемы пьезоэлектрической колебательной системы с комплексным сопротивлением $Z_{НЭ}$.

Ультразвуковые колебательные системы изменяют свою резонансную частоту при изменении величины и характера внешней нагрузки (среды, ее свойств, температуры, давления и тп.), нагреве преобразователя и других внешних воздействиях

На слайде 15 представлены изменения рабочей частоты излучателя УЗ колебаний в виде диска, соединенного с пьезопреобразователем при изменении температуры этого диска. Обратите внимание – изменение

температуры на 200 градусов приводит УК изменению резонансной частоты излучателя на 500 Гц. При реализуемой добротности системы (1000) это очень много.

Поэтому необходимость учета влияния температуры требует рассмотрения более тонких процессов в модели работы колебательной системы, как это показано на слайде 16.

Эти данные на следующем слайде 17, где представлены данные об изменениях импедансных параметров колебательной системы от температуры.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что применение излучателя полуволновой конструктивной схемы позволяет адекватно реагировать на изменение параметров обрабатываемой технологической среды и параметров самой системы (изменения резонансной частоты и добротности) за счет изменения частоты и амплитуды подаваемого электрического напряжения от электронного генератора. Тем самым, с одной стороны, обеспечивается постоянная работа колебательной системы на резонансной частоте с заданной амплитудой при любых изменениях характеристик обрабатываемой среды и свойств материалов системы, а с другой стороны, появляется возможность непрерывного контроля параметров среды, на которую осуществляется воздействие.

Простейшая система контроля может быть построена, как показано на слайде 19.

Слайд 20. Важнейшим параметром, характеризующим возможности той или иной колебательной системы – излучателя ультразвуковых колебаний, являются ее мощностные характеристики, т.е. количество акустической энергии (энергии механических колебаний), которые могут быть введены в обрабатываемые среды.

Эта величина определяется, в конечном счете, амплитудой механических колебаний рабочего инструмента и размерами этого инструмента. При введении колебаний в жидкие среды определяющее значение имеет

интенсивность ультразвуковых колебаний – количество энергии выводимой через единицу излучающей поверхности колеблющегося инструмента ($\text{Вт}/\text{см}^2$) и величина полной объемной энергии ($\text{Вт}/\text{см}^3$), вводимой в обрабатываемый объем.

Количество полезной акустической энергии определяется размерами и формой излучателя, типом, количеством и размерами пьезоэлементов, коэффициентом преобразования, коэффициентом полезного действия излучателя и другими параметрами излучателя и обрабатываемой среды.

Амплитуда механических колебаний излучателя имеет ограничения, определяемые физическими свойствами используемых в составе излучателя материалов и конструктивной схемой системы.

На слайде 21 представлены предельные значения амплитуды колебаний. При достижении максимальных значений, возникающие механические напряжения в материалах просто разрушают элементы колебательной системы. Рабочие значения амплитуд не могут превышать 50...70% от предельных.

Слайд 22. Что бы не превышать предельных значений амплитуды колебаний и обеспечивать ее необходимые значения в процессе реализации воздействия, ее необходимо измерять. Самые распространенные методы – это наблюдение величины амплитуды через микроскоп, используя различные варианты подсветки. На слайде представлена модельная установка, позволяющая производить такие измерения, не только при колебаниях в воздухе, но и при наличии нагрузки – прижимаемой опоры.

Слайд 23. К сожалению, наблюдать колеблющуюся поверхность не всегда возможно, вернее обычно невозможно при работе в непрозрачных средах, объемах, расплавах и т.п. В этом случае возникает необходимость применения косвенных методов контроля, в частности по измерению электрических параметров колебательной системы. Т.е. используя на практике модели электромеханических аналогий.

По электрическим параметрам пьезопреобразователя можно измерять также частоту системы и ее температуру.

Слайд 24. Эти измерения основываются на измерении тока механической ветви пьезоэлектрического преобразователя. Измеряется полный ток и из него вычисляется емкостная составляющая тока, обусловленного статической емкостью пьезоэлементов. Такой подход позволяет контролировать мощностные характеристики излучателя при его работе в любых условиях.

Слайд 25. Такой подход позволяет измерять характеристики излучателей и выбирать лучшие варианты при проектировании и создании новых излучателей. На слайде, в качестве примера приведены характеристики двух излучателей, выполняемых на основе кольцевых и дисковых пьезоэлементов. Такой анализ позволяет выбрать наилучшую конструктивную схему излучателя

Слайд 26. Непрерывный контроль параметров пьезоэлектрического излучателя позволяет определять множество различных характеристик. На этом слайде демонстрируется возможность контроля качества присоединения рабочего инструмента к пьезопреобразователю.

Слайд 27. Таким образом, работа излучателей ультразвуковых колебаний связана с наличием различных ограничений. Эти ограничения и определяют их возможности в создании колебаний в различных средах.

Перед Вами система для излучения колебаний в газовые среды. Это продольно колеблющийся пьезопреобразователь, соединенный с изгибно колеблющимся диском. Возникающие при колебаниях механические напряжения ограничивают амплитудные характеристики.

Слайд 28. Кроме ограничений по мощности для пьезоэлектрических излучателей огромное значение имеют тепловые ограничения. Внутренние потери в излучателях приводят к нагреву пьезопреобразователей. Это не только ухудшает свойства пьезокерамических элементов, но и легко выводит их из рабочего состояния. Как Вам известно, превышение температуры

Кюри приводит к разрушению доменной структуры пьезоэлектрического материала (его разполяризации).

Таким образом, можно сформулировать три основные проблемы, ограничивающие возможности применения ультразвуковых колебательных систем:

- ограниченная поверхность излучения (ограничение по выводимой энергии);
- плохое согласование с обрабатываемой средой (малый выход энергии);
- нагрев излучателей за счет внутренних потерь.

Поэтому – возникает необходимость решения этих проблем за счет создания новых конструкций. На этом слайде, в качестве основного решения проблемы, показаны многоэлементные пьезоэлектрические преобразователи.

Слайд 29. За счет суммирования мощности отдельных пьезопреобразователей удастся увеличить мощность преобразователей. Увеличение достигается за счет суммирования колебаний отдельных пьезопреобразователей на общей продольно колеблющейся накладке.

Как только увеличиваем мощность преобразователей – возникает возможность полученную энергию выводить через большие по размерам поверхности. Так появились многополуволновые рабочие инструменты. Что это такое?

Слайд 30. Полуволновые элементы соединяются последовательно. С учетом некоторых особенностей. Эта особенность обусловлена тем, что каждый последующий элемент оказывает влияние на предыдущий. Это необходимо корректировать.

Таким образом, удастся создать излучатели с мощностью до 7...10 кВА, имеющие рабочие инструменты с поверхностью излучения до 350 см².

Слайд 31. Дальнейшее увеличение эффективности воздействия на объекты, например на жидкие среды обеспечивается за счет резонансных явлений (т.е. за счет обеспечения режимов стоячей волны).

Слайд 32. Вот такие системы удается создавать за счет суммирования колебаний отдельных пьезопреобразователей на общей продольно колеблющейся накладке. Таким образом, удалось существенно увеличить мощность низкочастотных излучателей. К сожалению - только низкочастотных

Увеличение рабочей частоты в таких конструктивных схемах выше 25...30 кГц принципиально невозможно из-за возникновения паразитных радиальных колебаний.

Слайд 33. Одно из красивых решений этой проблемы представлено следующем слайде. В такой конструкции суммирование высокочастотных колебаний отдельных преобразователей Ланжевена осуществляется на объемно колеблющейся цилиндрической накладке. Такая накладка является одновременно сумматором и преобразователем радиальных колебаний в продольные.

Рассмотрев особенности различных конструктивных схем колебательных систем (излучателей ультразвуковых колебаний) переходим к рассмотрению особенностей построения практических конструкций.

На следующем слайде 34 представлены, некоторые практические конструкции ультразвуковых излучателей, выполненных по классической конструктивной схеме, объединяющей пьезоэлектрический преобразователь, промежуточное бустерное (полуволновое) звено, концентратор и рабочее окончание (инструмент). Это излучатели для размерной обработки (резки), распыления, сварки и обработки жидких сред под давлением.

На слайде 35 аналогичная конструкция, но с водяным охлаждением пьезопреобразователя. Такая система может работать при температурах до 500...900 градусов Цельсия.

На слайде 36 представлены две системы с отличительными особенностями. У первой специальный рабочий инструмент, имеющий окончание специальной формы (для очистки каналов в форсунках), у второй инструмент для очистки глубоких каналов, но для ручного использования.

На слайде 37 показан комплект ультразвукового аппарата для проведения хирургических операций через проколы в коже человека. Посмотрите - какое многообразие ультразвуковых инструментов требуется хирургу для выполнения различных действий внутри человека. В этом случае решается проблема обеспечения эффективной работы большого количества инструментов с одним преобразователем, причем работы на очень высоких амплитудах (150 мкм).

На следующем слайде 38 показано решение аналогичной задачи. Это аппарат для ультразвуковой липосакции (удаление подкожного жира). Нам удалось разработать инструменты различной резонансной длины и с разными по форме окончаниями для решения разнообразных задач пластической хирургии.

Слайд 39 начинает демонстрацию большого количества разнообразнейших излучателей для ультразвуковой сварки. На этом слайде излучатели для сварки контейнеров с кровью. Удалось создать очень маленькие по размерам системы с мощностью, достаточной для сварки трубки гемоконтейнера, причем для сварки по крови внутри трубки.

Слайд 40. Излучатели для формирования протяженных швов. Сегодня мы делаем системы для формирования шва длиной до 360 мм.

Слайд 41. Такие системы выполняются по различным конструктивным схемам – полуволновой, волновой, трехполуволновой, с однопакетными и многопакетными преобразователями. Это позволяет обеспечить различные мощностные характеристики и различные возможности для сварки.

Слайд 42. Излучающая поверхность таких систем может быть также различной. На слайде показан инструмент для выполнения двух параллельных швов и инструмент для резки.

Слайд 43. Еще инструмент для пропитки с поверхностью излучения 70 см².

Слайд 44. Казалось бы простейшие конструкции. Но их расчеты и проектирование очень сложная задача, поскольку необходимо решать

одновременно множество проблем – обеспечения требуемой амплитуды, ее равномерности вдоль излучающей поверхности. Поэтому появляются пазы, сложная форма поверхностей, толщины и материалы с определенными свойствами.

Слайд 45. Системы для формирования кольцевых швов. Максимальное достижение на сегодня это кольцевая сварки диаметром 100 мм.

Слайд 46. Если возникает необходимость сварки больших по диаметру или сложных по форму кольцевых сварок такая задача решается последовательным перемещением систем по заданному контуру.

Слайд 47. Отдельная проблема возникает при необходимости создания излучателей с инструментами ступенчато переменной длины. Такое выполнение инструментов обуславливает их многорезонансность и требуется настройка на резонанс, ответственный за выполнение шва на нужном размере инструмента.

Слайд 48. Часто возникает необходимость решения при создании излучателя множества различных проблем. Перед вами излучатель для осуществления воздействия на керн. Здесь реализуется работа при высоких давлениях и температурах

Слайд 49. Всегда увеличение поверхности излучения требует увеличения мощности пьезоэлектрического излучателя. На это слайде это еще раз показано для излучателей, предназначенных для обработки газовых сред.

Слайд 50. Вот так выглядят такие излучатели

Слайд 51. Еще один класс излучателей – излучатели для распыления жидких сред. Их многообразие по размерам, форме, частоте, мощности обусловлено необходимостью формирования различных факелов распыла частиц с различным распределением по размерам.

Слайд 52. Пример того – как различные по классу излучатели используются при решении различных задач. Перед вам излучатели для газовых сред оказавшиеся очень эффективными для распыления жидкостей.

Таким образом, подводя итоги лекции можно сказать следующее. Создание и применение излучателей ультразвука это огромная проблема. При решении уже найдено множество интересных решений. Но развитие технологий требует непрерывного развития УЗ техники и, в первую очередь, колебательных систем. Это огромное поле для деятельности. Надеюсь, что кто то из вас обеспечит дальнейшее развитие.

Для тех, кто будет заниматься этими вопросами более углубленно могу рекомендовать специальную литературу.

На последнем слайде 53 представлена одна из книг автора лекции, посвященная колебательным системам.

Спасибо за внимание.