

Лекция 7

Ультразвуковые аппараты для работы в аномальных условиях температур и давлений (в космосе)

Уважаемые Студенты, Магистранты, Аспиранты, Коллеги!

(Слайд 1). Предлагаемое Вам сообщение (Лекция) посвящено рассмотрению современного состояния проблем эксплуатации ультразвуковых приборов (аппаратов) в аномальных условиях.

Т.е., в этой лекции, мы рассматриваем особенности построения, применения, принципы и алгоритмы управления ультразвуковыми приборами (аппаратами), предназначенными для реализации ультразвуковых воздействий в условиях, отличных от нормальных.

В своей Лекции я основываюсь на том, что аномальных условия эксплуатации могут быть реализованы в земных условиях и обусловлены они существенными отличиями от номинальных по давлению, температуре, химической агрессивности и т.п.

Вместе с тем, особенно ярко эти аномальные условия могут проявляться во внеземных условиях, при работе комических аппаратов в условиях глубокого космоса, на поверхности астероидов или планет.

В Лекции будут изложены выявленные проблемы и подходы к решению существующих задач эксплуатации аппаратов в таких условиях, а также показаны пути решения проблем на стадиях создания и применении аппаратов.

(Слайд 2). Как обычно, в начале каждой Лекции я напоминаю о том, кто я и откуда.

И так - я представляю большой научный коллектив, занимающийся разработкой и применением ультразвуковых аппаратов различного назначения для разнообразных областей науки и техники. Работаем мы в городе Бийске Алтайского края в Российской Федерации.

Это научная школа, это лаборатория акустических процессов и аппаратов в 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. Это доктора и кандидаты технических наук, профессора и доценты Университета.

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

(Слайд 3). Высокoэнергетические воздействия на различные вещества и продукты – это основа реализации современных технологических процессов, позволяющих получать новые вещества и материалы или придавать известным материалам новых уникальные свойства. На сегодня одно из наиболее эффективных энергетических воздействий на различные процессы в жидких и твердых средах основано на применении механических (упругих) колебаний ультразвуковой (УЗ) частоты.

УЗ технологии сегодня решают множество проблем современных производств, таких как создание нанодисперсных, эмульсионных и стерильных материалов, получение высокооктановых бензинов, биодизелей, биологически активных веществ, размерную обработку твердых материалов, бурение грунтов, сварку полимеров и металлов, резку и многое другое.

Сегодня уже не вызывает никаких сомнений, что реализация оптимального УЗ воздействия в каждой реализуемой технологии обеспечивает максимальную производительность получения конечных продуктов с требуемым качеством или позволяет осуществлять новые процессы и получать такие материалы, которые не могут быть получены без УЗ воздействия.

Возможность обеспечения максимального по эффективности воздействия обусловлена рядом уникальных свойств УЗ колебаний, проявляющихся при их распространении в средах.

Наряду со способностью вносить в область воздействия значительной по величине энергии (обеспечение интенсивности вводимых колебаний до 100 Вт/см^2 и более), ультразвуковое воздействие может осуществлять локальные разрывы жидкости с образованием кавитационных пузырьков, которые при формировании (расширении) запасают энергию (внутри пузырька создаются давления и температуры, достаточные для реализации термоядерных реакций), а при сжатии высвобождают ее в виде ударных волн или кумулятивных струй.

(Слайд 4). При реализации ультразвуковых технологий решаются задачи формирования ультразвуковых колебаний и их введение в обрабатываемые среды

УЗ колебания вводятся в различные среды, изделия, объекты при помощи рабочих инструментов, соединенных, с одной стороны, с колебательной системой, а с другой стороны, имеющих контакт с обрабатываемым объектом.

Только при создании необходимых и достаточных условий для длительной и эффективной работы колебательной системы – излучателя с

заданной амплитудой УЗ колебаний – можно осуществлять воздействие объекты и среды.

Состояние технологических сред, в которых реализуются необходимые для человека процессы, может быть различным. Поэтому условно разделяют ультразвуковое воздействие на воздействие на основные агрегатные состояния веществ – газообразное, жидкое и твердое.

Различные среды могут очень существенно различаться по химическому составу, плотности, температуре, находиться при избыточном, в сравнении с атмосферным, давлением.

В большинстве случаев жидкие и твердые фазы таких сред могут существенно отличаться вязкостью, скоростью распространения в них ультразвуковых колебаний, их затуханием, поверхностным натяжением, кавитационной прочностью и др.

Кроме этого, объекты и среды могут не только отличаться свойствами, но и находиться в определенных условиях по температуре, давлению.

Начнем с самого простого.

Рассмотрим особенности УЗ воздействия, осуществляемого за счет введения УЗ колебаний в среды с преимущественной жидкой фазой при разной температуре. При реализации ультразвукового воздействия рабочее окончание колебательной системы должно находиться в обрабатываемой среде (условия в среде). Остальные элементы системы могут находиться как в среде, так и в окружающем пространстве (внешние условия).

Слайд 5 . Вот самый простейший пример обработки жидких сред при разной температуре. Вначале это холодная эпоксидная смола, далее она разогревается под действием ультразвуковых колебаний. Видно, как изменяется зона воздействия и само воздействие.

Поскольку основное влияние на скорость реализации технологических процессов в средах с жидкой фазой и при размерной обработке (бурении) оказывает кавитация, то основная задача УЗ воздействия – необходимость обеспечения максимально эффективного кавитационного процесса. Условно эффективность процессов зависит от интенсивности УЗ воздействия.

На слайде 6 показано воздействие ультразвуковых колебаний в кавитационном режиме на расплав металла при температуре более 1000К.

К сожалению, исследование кавитации в расплавах это отдельная проблема и ее решение требует новых подходов. Один из таких подходов связан с реализуемым нами косвенным контролем.

На слайде 7 показано воздействие ультразвуковых колебаний на образец грунта, замороженного до температуры жидкого азота (при

температуре менее 10 К). Это другая проблема и контроль этого процесса также реализуется специальным образом, об этом будет рассказано далее.

Почему особенные аномальные условия могут быть в космосе.

Слайд 8. Космические корабли будут исследовать планеты и астероиды. Очевидно, что мы будем использовать ультразвуковые аппараты для закрепления на астероидах и малых планетах, бурения мерзлого грунта, исследования поверхностей из жидких газов при низких температурах или расплавленных металлов при высоких температурах. Понятно, что работать нам нужно будет в аномальных условиях, отличных от земных. Понятно, что работать наши аппараты должны будут в отсутствии газовой среды, отсутствие силы тяжести (или при ее повышенном значении, где то на Юпитере), при температурах близких в абсолютному нулю или при температурах плавления металлов или протекания термоядерных реакций.

Главное, что эти условия непредсказуемы и могут существенно изменяться в указанных пределах в короткие промежутки времени. Наши ультразвуковые аппараты должны быть готовы к этому.

Необходимость создания и введения УЗ колебаний заданной частоты и интенсивности в среды определяется решаемой при помощи УЗ воздействия задачей.

Однако, прежде чем осуществлять воздействие на обрабатываемые среды, необходимо обеспечить формирование УЗ колебаний.

Из предыдущих лекций Вам известно, что для создания колебаний применяются УЗ преобразователи, действие которых основано на использовании различных физических явлений, обеспечивающих преобразование какого либо вида энергии в энергию механических колебаний УЗ частоты некоего физического тела, называемого УЗ колебательной системой. Наиболее эффективно (с максимальным КПД) формирование УЗ механических колебаний в преобразователях на основе пьезокерамических элементов (пьезокерамика) осуществляется за счет пьезоэлектрического эффекта

Слайд 9. И так, формирование УЗ колебания заданной амплитуды на определенной частоте осуществляется при помощи пьезоэлектрических элементов, обеспечивающих за счет пьезоэлектрического эффекта преобразование электрических колебаний в механические.

Далее, при помощи колебательной системы, схематично показанной на Слайде 10 формируются колебания необходимой частоты и амплитуды.

При этом амплитуда механических смещений поверхностей пьезокерамических элементов определяется величиной электрического поля, т.е. электрическим напряжением, прикладываемым к противоположным

поверхностям пьезоэлементов. К сожалению, амплитуда механических колебаний не может мгновенно достигать максимального значения, увеличиваясь постепенно с учетом резонансных свойств колебательной системы. Она также не может достигать беспредельных значений, имея вполне реальные ограничения по электрической и механической прочности пьезоматериала.

В зависимости от условий эксплуатации резонансные характеристики колебательной системы будут существенно отличаться.

Посмотри на Слайд 11. Здесь условно показано, что при изменении температуры резонансные свойства системы существенно меняются. Электроника должна это отслеживать и обеспечивать питание системы на определенной частоте, в определенных условиях.

В зависимости от исходного состояния пьезоэлектрического материала и материалов самой колебательной системы, формирование колебаний необходимо осуществлять с учетом этих состояний. Так, при формировании УЗ колебаний пьезоэлектрическим преобразователем в условиях вакуума увеличение напряжения переменной частоты может привести к пробоем пьезоматериала.

При формировании колебаний системами, находящимися в условиях низких и особенно абсолютно низких температур (до 4–10 К) может произойти механическое разрушение материалов. Поэтому, повышение напряжения в этом случае должно происходить постепенно, обеспечивая возврат номинальных пьезоэлектрических свойств, т.е. прогрев материала. Распространение колебаний во всех элементах и материалах УЗ колебательной системы (металлах) также должно обеспечивать возврат свойств этих материалов к свойствам при нормальных условиях. Формирование колебаний пьезоэлектрическими преобразователями при определенных температурах (выше температуры Кюри) принципиально невозможно, из-за отсутствия у материалов пьезоэлектрических свойств.

Слайд 12. Это выдвигает определенные требования, которые необходимо выполнять на этапе формирования колебаний с момента подачи электрического напряжения на электроды пьезоэлектрического элемента, обеспечивая необходимое нарастание амплитуды механических колебаний при условии совпадения частоты подаваемых электрических напряжений с непрерывно изменяющейся собственной резонансной частотой колебательной системы.

После безопасного вывода УЗ колебательной системы на номинальный рабочий режим формирования колебаний возникает необходимость дальнейшего повышения величины электрического напряжения,

прикладываемого к электродам пьезопреобразователя. При достаточно высоком коэффициенте электромеханического преобразования (более 60%) у современных пьезоматериалов наблюдаются значительные релаксационные потери, приводящие к повышению температуры пьезоэлементов и всей УЗ колебательной системы. Повышение температуры приводит к изменению свойств пьезоматериала, в частности, к снижению его эффективности (падению КПД преобразования) и к изменению резонансных свойств. При этом повышение электрического напряжения питания не приводит к линейному увеличению амплитуды механических колебаний, а потери на нагрев возрастают. При этом, может быть превышена температура разрушения пьезоэлектрических свойств (температура Кюри) и пьезокерамический материал потеряет навсегда свои пьезоэлектрические свойства.

Слайд 13. Из сказанного следует, что процесс формирования колебаний требует управления прикладываемым электрическим напряжением для стабилизации (ограничивая) потерь на нагрев и обеспечения постоянного соответствия частоты прикладываемого электрического напряжения собственной резонансной частоте УЗ колебательной системы. При несоответствии возникают дополнительные потери, усугубляющие процесс формирования колебаний.

Таким образом, при формировании непрерывных колебаний необходимо обеспечивать постепенное увеличение амплитуды механических колебаний, непрерывно контролируя и обеспечивая работу на резонансной частоте всей УЗ колебательной системы, с максимально возможным коэффициентом преобразования, не допуская превышения определенного уровня температуры (не более 50...70% от температуры Кюри) пьезоэлементов и возникающих при формировании колебаний механических напряжений (не более 50% от прочности материалов).

Аналогичным образом, при формировании разрывных (импульсных) колебаний необходимо обеспечивать заданное нарастание амплитуды механических колебаний, непрерывно контролируя и обеспечивая работу на резонансной частоте УЗ колебательной системы в течение импульсного воздействия, а затем уменьшать амплитуду до нулевых (или заданных) значений. При этом формирование импульсных колебаний следует рассматривать как особый способ УЗ воздействия, поскольку такой способ обеспечивает реализацию уникальных условий воздействия – связанных с кратковременным введением больших энергий и исключением, при определенных условиях, кавитационного процесса в жидкостях. А это

возможность исследования материалов при высокоинтенсивных ультразвуковых воздействиях, но без кавитации.

При реализации любого процесса в аномальных условиях, как и в общем случае, необходимо различать следующие условия реализации УЗ воздействия:

- УЗ воздействие на безграничные по размерам среды, когда УЗ колебания распространяются без каких либо отражений, т.е. вся энергия распространяемых УЗ колебаний затрачивается на реализацию положительного действия – от возникновения и создания кавитационной области, в которой реализуется основной технологический процесс (кавитационное преобразование) с последующим УЗ воздействием в безкавитационном режиме (дегазация, активация бактерий, деимульгирование и т.п.) до полного затухания колебаний;

- УЗ воздействие на ограниченные по размерам среды, когда УЗ колебания распространяются с большим количеством безрезонансных или резонансных отражений. Когда реализуются безрезонансные условия отражений, происходит некоторое усреднение амплитуды колебаний, возникают зоны повышенной интенсивности и зоны отсутствия колебаний. Воздействие в таких случаях становится неэффективным;

- при реализации резонансного режима УЗ воздействия в ограниченных по размерам средах (или при наличии твердого отражателя) возможно формирование режима «стоячей» УЗ волны и повышение ее реальной амплитуды не менее чем в три раза. При этом вся энергия распространяемых УЗ колебаний затрачивается на реализацию положительного действия – создания кавитационной области, в которой реализуется основной технологический процесс (кавитационное преобразование). Максимальный положительный эффект такого воздействия достигается при реализации однородного кавитационного облака во всем резонансном промежутке;

- может быть реализован процесс разрушения или исследования свойств материалов, как в зоне ультразвукового воздействия, так и в кавитационном поле.

В каждом отдельном случае возникает необходимость создания определенного ультразвукового воздействия, обеспечивающего достижение поставленной цели с максимальным эффектом.

Слайд 14. На этом слайде показан и другой предельный случай, связанный с работой при высоких температурах. Нагрев колебательной системы за счет преобразования и формирования колебаний дополняется влиянием высокой температуры со стороны рабочего инструмента или всех

колебательной системы. Возникает необходимость создания специальных колебательных систем.

Далее на слайде 15 представлен стенд для проведения исследований при температуре жидкого азота. Это специальная термокамера из пеннополиуретана с многослойной стеклянной стенкой для визуальных наблюдений за процессами бурения, например.

На слайде 16 представлен стенд для проведения исследований при температуре плавления металлов. Это опять же специальная термокамера из огнеупорного кирпича с каналом для наблюдений за процессами плавления и кавитации в расплавах. Нагрев осуществляется за счет работы газовых горелок, воздействующих на тигель из высокотемпературного чугуна (платины).

На слайде 17 представлены рекомендации по формированию колебаний в жидком азоте с момента подачи электрического напряжения на электроды пьезоэлектрического элемента, обеспечивая необходимое нарастание амплитуды механических колебаний при условии совпадения частоты подаваемых электрических напряжений с непрерывно изменяющейся собственной резонансной частотой колебательной системы.

На фото этого слайда показано, что пьезоэлектрическая колебательная система работает в жидком азоте, формируя колебания и создавая кавитационный процесс.

Таким образом, мы впервые доказали возможность работы колебательной пьезоэлектрической системы при температуре жидкого азота и возможность формирования кавитационного процесса в жидких средах с такой температурой.

Но большую проблему составляет реальная эксплуатация пьезоэлектрических колебательных систем при высоких температурах.

Еще раз повторяюсь, в чем же собственно проблема.

Кроме принципиальной невозможности работы пьезоэлементов при температуре Кюри (300 градусов Цельсия), требующей обязательного охлаждения пьезоэлементов существует масса других проблем.

Слайд 18. Простейший пример, который мы рассматривали в предыдущих лекциях. Работа ультразвукового излучателя при выпечке хлеба, т.е. в термо шкафу с температурой до 200 градусов Цельсия. Посмотрите, как изменяется с увеличением температуры резонансная частота колебательной системы. От 18350 до 18850 Гц. Казалось бы не много. Но все относительно. Изменение на 500 Гц происходит при полосе резонансной характеристики системы в 30 Гц.

Слайд 19. При этом изменяется не только резонансная частота, но и все необходимые для согласования с электронным генератором параметры колебательной системы (активное сопротивление и реактивные составляющие). Эти измерения проведены при относительно незначительных изменениях температуры – не более 100 или 200 градусов.

Давайте посмотрим, что будет при больших изменениях температуры.

Слайд 20. Это изменение температуры до 600 градусов. Следует отметить, что в этих исследованиях использованы инструменты из специального высокотемпературного материала – ниобиевого сплава (температура плавления более 2000 градусов). Потребляемая мощность для сохранения заданной амплитуды растет. Частота существенно изменяется.

Слайд 21. Все остальные характеристики также подвергаются существенному изменению. На этом слайде представлены импедансные характеристики, АЧХ и ФЧХ УЗКС на воздухе и при работе в расплавленном алюминии. Различия очень существенны.

Казалось бы что в этом плохого. Происходит изменение резонансной частоты колебательной системы. Перестраивай электронный генератор и работай всегда на резонансной частоте.

Но не все так просто.

Частота ультразвукового воздействия во многих случаях определяет эффективность ультразвукового воздействия. Пример на Слайде 22. Изменение скорости бурения имитаторов лунного грунта на различной частоте. Оказывается, есть в любом процессе оптимальные частоты ультразвукового воздействия и работа на этих частотах обеспечит максимальную эффективность реализации процессов. Изменение скорости бурения в 1,5 раза при изменении частоты с 22 до 24 кГц очень существенно.

И эти моменты необходимо учитывать при обеспечении максимальной эффективности работы аппаратов.

Посмотрите следующий слайд. Слайд 23. Эффективность реализации кавитационного процесса очень существенно зависит от температуры. При изменении температуры от 700 до 1000 градусов количество формируемых кавитационных пузырьков уменьшается в 3 раза. Соответственно, уменьшится и эффективность кавитационного воздействия на жидкие среды, в частности, расплавы.

Мы очень долго говорили о проблемах, возникающих при работе в аномальных условиях.

Пора переходить к тому, как предлагается решать эти проблемы.

Первая проблема – обеспечение номинального режима работы пьезоэлементов решается охлаждением пьезопреобразователя. Простейший

вариант – проточный объем с охлаждающей жидкостью. Это показано на слайде 24. В космических условиях – это непрерывное испарение специальных материалов, замерзающих в ночных условиях (повороте астероида от Солнца).

При одновременном воздействии высоких давлений и температур такое охлаждение дополняется специальными силовыми развязками на бустерных звеньях или инструментах.

Слайд 26. При обработке расплавленных металлов защите подвергаются пьезопреобразователи и рабочие инструменты. Т.е. тепловая защита реализуется с двух сторон колебательной системы.

Слайд 27. Так работает ниобиевый инструмент в составе такой системы. Мы используем трехволноволновой инструмент, обеспечивая охлаждение его на длине до 70% от общей длины. И только часть инструмента работает в расплаве.

Это показано на слайде 28. Это пример реализации УЗ воздействия при литье изделий из расплавов.

На следующих слайдах еще несколько примеров практической реализации работы ультразвуковых аппаратов в аномальных условиях.

Слайд 29. Распыление отработанных авиационных масел при высокой температуре для анализа износа авиационных двигателей.

Слайд 30. Распыление расплава алюминия для получения мелкодисперсного порошка алюминия.

На слайде 31 примеры созданных практических конструкций ультразвуковых аппаратов, предназначенных для эксплуатации в аномальных условиях на Земле при реализации различных технологических процессов.

На слайде 32 промышленные аппараты большой мощности.

Слайд 33. Это многотоннажные производства, например нанотрубок, бензинов и т.п.

На слайде 34 схематично показан аппарат для исследования параметров обрабатываемых сред при аномальных условиях. Пока мы только готовим такие исследования.

На следующем слайде 35 показан аппарат для осуществления операций бурения во вземных условиях. Такой аппарат результат нашего совместного труда. О его конструкции и функциональных возможностях следует говорить отдельно.

Сегодня при помощи таких аппаратов мы проводим исследования по бурению имитаторов вземных грунтов при низких температурах.

Слайд 36. На этом слайде стенда проведения исследований.

Слайд 37. Фото таких исследований.

Слайд 38. Бурение при низких температурах с контролем изменения температур в зонах ультразвукового бурения

И результаты такого бурения. Слайд 39.

Таким образом, подводя итоги изложенному в этой Лекции можно сделать вывод о принципиальной возможности практической реализации ультразвукового воздействия в аномальных условиях, в том числе в условиях низких и высоких температур в земных и космических условиях.

Более подробно материалы, изложенные в Лекции будут в ближайшее время опубликованы в виде отдельной монографии и нескольких статей.