

Лекция 8

Особенности ультразвукового воздействия в экстремальных условиях, Теоретические основы

Уважаемые Студенты, Магистранты, Аспиранты, Коллеги!

(Слайд 1). Предлагаемое Вам сообщение представляет собой доклад о новых исследованиях и разработках, направленных на решение проблем оптимизации ультразвукового воздействия в экстремальных условиях, т.е. на выработку оптимальных режимов и условий воздействия для последующего решения задач создания и эксплуатации ультразвуковых приборов (аппаратов) в экстремальных условиях.

Т.е., в этой лекции, мы рассматриваем особенности реализации ультразвуковых воздействий на различные среды в экстремальных условиях, т.е. в условиях предельных возможностей реализации ультразвуковых воздействий.

Очевидно, что экстремальных условия эксплуатации могут быть реализованы в земных условиях и обусловлены они существенными отличиями от номинальных условий по температуре.

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 теоретические подходы к решению существующих задач эксплуатации аппаратов в экстремальных условиях по температуре, 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.

Сегодня мы производим сотни различных ультразвуковых аппаратов и решаем различные научные задачи, связанные с применением ультразвуковых воздействий на различные среды, материалы и объекты.

(Слайд 3). Высокочастотные воздействия на различные вещества и продукты – это основа реализации современных технологических процессов, позволяющих получать новые вещества и материалы или придавать известным материалам новые 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.

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.

Как мы с Вами говорили ранее, 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.

При реализации ультразвуковых технологий решаются задачи формирования ультразвуковых колебаний и их введение в обрабатываемые среды

Слайд 4. 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.

Очевидно, что объекты и среды могут не только отличаться свойствами, но и находиться в определенных условиях по температуре.

Что же такое экстремальные условия ультразвукового воздействия по температуре

Слайд 5.

Воздействие ультразвука в экстремальных условиях актуально для различных задач ведущих отраслей народного хозяйства.

Для нас важны и наиболее интересны задачи ультразвукового воздействия на внеземные грунты в космических условиях, которые характеризуются широкими перепадами температур, отсутствием атмосферы или высокоплотной атмосферой, наличием агрессивных веществ на отдельных космических телах, экстремально высокой или экстремально низкой гравитацией.

В земных условиях ультразвуковое воздействие в экстремальных условиях имеет не менее широкое применение – это задачи кавитационного определения стойкости покрытий в экстремальных условиях (охлаждающие контуры для атомных реакторов и ускорителей элементарных частиц, в которых поддерживается температура вплоть до температуры жидкого гелия; технологические линии для получения сплавов металлов и литейные цеха), задачи дегазации расплавов металлов для повышения их прочности после застывания, задачи очистки топочных промышленных отходящих газов от дисперсных частиц, задачи добычи и транспортировки нефти и газовых гидратов в условиях Севера, задачи снятия обледенения с промышленных установок в холодных климатических условиях и летательных аппаратов.

Для ультразвуковых излучателей высокие или низкие внешние давления, или низкая гравитация не являются критическими параметрами, поскольку при деформации ультразвукового рабочего инструмента амплитуда механических напряжений может достигать 300 МПа (почти 3000 атмосфер), а озвучиваемой среде (если она является плотной – жидкой или твёрдой) – до 20 МПа (почти 20 атмосфер).

В то время температура обрабатываемой среды является критическим параметром, поскольку даже при повышении температуры на 150 градусов Цельсия уже происходит потеря механических свойств материала излучателя (из-за тепловой деформации возникают начальные напряжения, теряется предел усталостной прочности, быстрее возникают микротрещины при

высокочастотных переменных нагрузках). Наряду со свойствами излучателя при экстремальных температурах сильно меняются линейные и нелинейные волновые свойства среды. В частности, начинают проявляться влияние фазовых переходов на кавитационные процессы, возникают начальные напряжения в твёрдом грунте, изменяется плотность газовой фазы.

Поэтому необходимо исследовать влияние ультразвукового воздействия на жидкие, твёрдые и газообразные среды как при экстремально высоких, так и при экстремально низких температурах.

Слайд 6.

Основные направления исследований, заключаются как в выявлении оптимальных режимов и условий ультразвукового воздействия, обеспечивающих максимальную эффективность протекания процессов в экстремальных условиях; так и в решении проблем создания ультразвуковых аппаратов, обеспечивающих реализацию оптимальных режимов и условий, а именно:

- исследование кавитации в сплошной жидкой фазе с учётом фазовых переходов и вязкоупругости среды;
- исследование влияния ультразвука на процессы разрушения твёрдых материалов в экстремальных условиях;
- исследование влияния ультразвука на динамику гетерогенных систем со сплошной газовой фазой при экстремально высоких температурах;
- исследование электрических свойств пьезоэлектрической колебательной системы при экстремально высоких или низких температурах;
- разработка системы поддержания температуры первичного пьезопреобразователя в рабочем диапазоне;
- контроль параметров ультразвуковой колебательной системы при изменяющихся внешних условиях;
- контроль параметров ультразвуковой колебательной системы при изменяющихся свойствах среды.

Данная лекция открывает начало цикла лекций, посвящённых ультразвуковому воздействию в экстремальных условиях. Для того, чтобы реализовать процессы в средах с максимальной эффективностью сперва необходимо выявить оптимальные режимы и условия. Под режимами понимаются интенсивности ультразвуковых колебаний (частота принята равной стандартизованному значению 22 кГц), а под условиями – геометрия акустического тракта в озвучиваемой среде (расстояние между излучателем и отражающей поверхностью, направление излучения колебаний).

Слайд 7.

Для понимания физики и основных закономерностей процессов первоначально были проведены теоретические исследования процессов в жидких, твёрдых и газообразных средах на примере кавитационной обработки криогенных жидкостей и расплавов металлов, бурения твёрдого грунта вземных объектов и коагуляции газодисперсных систем в промышленных отходящих газах при высоких температурах.

Слайд 8.

В рамках теоретических исследований кавитации в экстремальных условиях был использован трёхуровневый подход, включающий микроскопический, мезоскопический и макроскопический уровни детализации модели кавитационной области в жидкости при экстремальных условиях.

На микроскопическом уровне исследовано формирование одиночной кавитационной области. Коллективом исследователей БТИ АлтГТУ получена система уравнений динамики кавитационного пузырька, учитывающая фазовые переходы при экстремально высоких или низких температурах, вязкоупругие свойства жидкости (характерные для расплавов металлов). Система уравнений предназначена для определения зависимостей массы пара жидкости внутри пузырька и радиуса пузырька от времени, параметров ультразвукового воздействия, температуры и свойств жидкости.

Слайд 9.

Получены зависимости радиуса кавитационного пузырька и массы пара внутри пузырька от времени при различных интенсивностях ультразвуковых колебаний на примере расплава алюминия. Установлено, что температура на радиус пузырька влияет достаточно слабо (за исключением температуры, которая находится в окрестности температуры плавления алюминия).

Наиболее существенное влияние температуры наблюдается на массу пара внутри пузырька. Это очень существенный факт, поскольку от массы пара внутри пузырька зависит амплитуда формируемой ударной волны и другие связанные параметры кавитационной области.

Слайд 10.

Аналогичная закономерность наблюдается для кавитационного пузырька в жидком азоте, т.е. при предельно низких температурах.

Слайд 11.

Далее, проанализировав поведение отдельного кавитационного пузырька, авторами предложена и разработана мезоскопическая модель, позволяющая определить концентрацию пузырьков в локальной области, размеры которой много меньше длины ультразвуковой волны, но велики по сравнению с размерами кавитационного пузырька. Модель основана на том, что пузырьки дробятся при схлопывании на более мелкие за счёт ударных волн, формируемых внутри пузырька, и объединяются при расширении в более крупные за счёт сил Бьеркнеса. Эти два процесса достаточно быстро (в течение нескольких периодов ультразвуковых колебаний) друг друга уравнивают и при прочих постоянных условиях (вязкости и температуры жидкости) устанавливается стационарная концентрация пузырьков. На слайде представлены уравнения коалесценции и дробления пузырьков и полученное выражение для стационарной концентрации.

Слайд 12.

На слайде представлены расчётные зависимости концентрации кавитационных пузырьков от интенсивности ультразвуковых колебаний при

различных температурах на примере расплава металла (алюминия). Установлено, что изменение температуры в диапазоне от 660 до 1000 градусов Цельсия (поддиапазон диапазона жидкого состояния алюминия) способно изменять концентрацию пузырьков более чем в 2 раза. При этом, с повышением температуры концентрация пузырьков падает (при рассматриваемых исходных данных до 2-х раз), что связано с увеличением массы пара внутри пузырька, которое влечёт падение амплитуды ударной волны, образуемой при схлопывании. Это свидетельствует о снижении энергетической эффективности кавитации при повышенных температурах и ещё раз подтверждает необходимость работы ультразвукового излучателя в оптимальных режимах при оптимальных условиях.

Слайд 13.

Далее представлены расчетные данные влияние температуры и интенсивности колебаний на объёмное содержание кавитационных пузырьков (индекс кавитации).

Слайд 14.

Следующим этапом расчетов осуществляется переход к мезоскопическому уровню во всём объёме жидкости. Предложена модификация уравнения Гельмгольца, учитывающая влияние кавитации на волновые свойства среды на основании найденной концентрации и объёмного содержания пузырьков.

Слайд 15.

Далее, на основании уравнения Гельмгольца рассчитано относительное изменение квадрата волнового числа среды и выявлены оптимальные интенсивности, при которых это изменение максимально.

Слайд 16.

При выявлении зависимости удельной энергии схлопывания пузырька (т.е. энергии ультразвуковых колебаний, поглощённой в единице объёма в единицу времени) от толщины плоского слоя жидкости было установлено

наличие оптимальной толщины, при которой удельная энергия схлопывания пузырька вблизи поверхности отражателя максимальна.

Это имеет важнейшую практическую значимость для контроля степени разрушения материалов в экстремальных условиях. Установлено наличие оптимальной толщины, при которой удельная энергия схлопывания максимальна. Установлено также, что температура влияет на эту оптимальную толщину.

Однако, для экспериментальной проверки адекватности модели формирования кавитационной области, наиболее удобной является интегральная мощность схлопывания пузырьков (т.е. суммарная энергия ультразвуковых колебаний, поглощённая во всём объёме в единицу времени), которую можно косвенно измерить по активной составляющей акустической нагрузки на излучатель или калориметрическим методом.

Получены зависимости интегральной мощности от толщины слоя жидкости.

Слайд 17.

Таким образом, по результатам исследований кавитационного процесса в жидкости при экстремальных температурах можно сделать следующие выводы:

- кавитацию возможно и необходимо создавать в жидкостях при широком диапазоне экстремальных температур - от температур криогенных жидкостей (в обычных условиях это газы) до температур плавления металлов;
- при экстремальных температурах необходимо обеспечить интенсивности воздействия не ниже, чем интенсивности при обычных температурах (необходимы новые рабочие инструменты из новых материалов);
- из-за сниженной интенсивности кавитации (начальная концентрация пузырьков ниже) необходима разработка более высокочувствительной системы контроля свойств среды, способной подбирать оптимальную интенсивность при изменяющейся температуре;

- необходимо обеспечивать оптимальное расстояние между излучателем и отражающей поверхностью, которое зависит от температуры.

Слайд 18.

Далее проведены теоретические исследования скорости бурения твёрдого материала и испарения влаги из пор материала при экстремально низкой температуре и высоком вакууме. Предложена модель деформации и разрушения грунта. Модель учитывает медленное накопление микротрещин в результате высокочастотного ударного воздействия со стороны излучателя и внутреннее трение в твёрдом грунте. Предполагается, что испарения влаги происходит за счёт тепловыделения при внутреннем трении.

Выявлено влияние частоты ультразвукового воздействия на скорость бурения. Установлено, что при одинаковой излучаемой энергии колебаний существуют локальные максимумы скорости бурения, обусловленные наличием резонансных частот. Наличие локальных максимумов обусловлено тем, что при определённых частотах наблюдается резонансный эффект – время свободного падения излучателя оказывается равным или сопоставимым с периодом ультразвуковых колебаний. И моменты соударения излучателя с поверхностью грунта при определённых амплитудах начинают совпадать с моментами, когда рабочая поверхность излучателя оказывается наиболее отдалённой относительно центра масс излучателя. Т.е. наступают «резонансные соударения». Установлено, что расстояние между локальными максимумами составляет от 9 до 11 кГц. Например, локальный максимум скорости бурения наблюдается на частотах 13 кГц и 23 кГц.

Установлено, что минимальное количество испарённой влаги на единицу объёма отобранной пробы грунта достигается при строго определённой амплитуде колебаний излучателя.

Эта амплитуда зависит от усилия прижима.

Например, при частоте 23 кГц и при усилии прижима 5 Н – амплитуда 19 мкм; 10 Н (эта же частота) – 5 мкм; 15 Н – 3 мкм; 20 и более Н – менее 1 мкм.

При этих амплитудах и усилиях скорость бурения составляет (19 мкм, 5 Н) – 8,2 мм/мин; (5 мкм, 10 Н) – 3,4 мм/мин; (3 мкм, 15 Н) – 6,6 мм/мин.

При этом при одинаковой амплитуде абсолютное значение массы испарившейся влаги уменьшается с ростом усилия прижима.

Слайд 19.

Далее представлена визуализация процесс развития микротрещин в грунте на основании расчётов с помощью предложенной модели разрушения грунта. Модель основана на модели К.Б. Броберга для роста трещины в твёрдом материале, которая модифицирована для случая периодического импульсного нагружения. Получено, что при добавлении низкочастотных ударов к классическому ультразвуковому воздействию со стороны присоединённой свободной массы скорость развития микротрещины уменьшается более чем в 2 раза.

Слайд 20.

Далее, выявив оптимальные режимы ультразвукового бурения, проведены теоретические исследования, направленные на разработку способа определения вещества грунта. Разрабатываемый способ определения основан на контроле импедансных характеристик излучателя при низких амплитудах колебаний, не допускающих разрушение. Теоретически получены зависимости смещений рабочего окончания излучателя и поверхности грунта от времени при различных модулях упругости грунта.

Слайд 21.

Далее для различных по свойствам грунтов (**Модуль упругости грунта $3 \cdot 10^{10}$ Па**)

Слайд 22.

Модуль упругости грунта $5 \cdot 10^{10}$ Па

Слайд 23.

В конечном итоге, был рассчитан косинус угла сдвига фаз между усилием на излучатель со стороны грунта и скоростью смещения излучателя. Установлено, что плотность грунта слабо влияет на косинус угла сдвига фаз. При этом косинус угла наиболее чувствителен к модулю упругости грунта. Поэтому предлагаемый способ определения свойств грунта основан на измерении электрического импеданса (его механической ветви) ультразвуковой колебательной системы, затем расчёте механического импеданса и определении косинуса угла сдвига фаз. Затем по косинусу угла рассчитывается модуль упругости грунта и, следовательно, определяется тип вещества.

Слайд 24.

Таким образом, по результатам теоретических исследований воздействия ультразвуковых колебаний на твёрдый грунт при экстремальных температурах сделаны следующие выводы:

- необходимо обеспечивать оптимальную амплитуду колебаний при УЗ бурении для достижения максимальной сохранности воды и других летучих веществ;
- необходимо воздействовать на резонансной частоте, характерной для данного типа грунта;
- частоту и оптимальную амплитуду необходимо обеспечить с учётом низкотемпературных условий, в которых будет находиться УЗ излучатель;
- низкочастотное ударное воздействие со стороны присоединённой свободной массы дополнительно увеличивает скорость бурения;
- свойство грунта, которое наиболее существенно влияет на косинус угла сдвига фаз между усилием и скоростью – модуль упругости;
- для определения типа грунта целесообразно измерять косинус угла сдвига фаз механического импеданса системы «излучатель-грунт» и на основании расчётной зависимости определять модуль упругости (механический импеданс определяется по электрическим параметрам излучателя, не используя внешних датчиков);

- для определения типа грунта необходимо воздействовать с как можно меньшей амплитудой, чтобы не возникло процессов разрушения (не более 6 мкм).

Слайд 25.

Далее еще одно возможное применение ультразвука в экстремальных условиях.

Авторами были проведены теоретические исследования очистки промышленных отходящих газов от золы при высоких температурах.

На слайде представлен эскиз скруббера Вентури и в таблице представлены исходные данные для моделирования. Ультразвуковое воздействие осуществляется на внутреннюю область трубы Вентури с целью интенсификации соударения частиц золы с каплями воды.

Слайд 26.

На слайде представлены уравнения движения частиц золы и воды в скруббере Вентури и выражения для силы и скорости сближения частиц под действием ультразвуковых колебаний.

Внизу слайда представлены выражения для эффективности трубы Вентури и скруббера и остаточной запылённости на выходе.

Слайд 27.

Получены зависимости эффективности трубы Вентури в отдельности и скруббера (труба Вентури + каплеуловитель) от размера частиц пыли. Установлено, что наиболее существенно ультразвуковые колебания повышают эффективности коагуляции мелких, наиболее опасных частиц (размером менее 10 мкм). Необходимый уровень звукового давления для почти 100%-го улавливания самых мелких частиц – не менее 150 дБ во всём объёме трубы Вентури.

Слайд 28.

Далее получены зависимости эффективности улавливания при различных углах установки излучателей к оси трубы Вентури. Установлено,

что максимальная эффективность достигается при угле установки 45 градусов, который обеспечивает наиболее равномерное ультразвуковое поле.

Слайд 29.

Выводы по результатам теоретических исследований воздействия ультразвуковых колебаний на газодисперсные системы при экстремально высоких температурах:

- необходимо обеспечивать уровень звукового давления не менее 150 дБ при температуре 170 градусов Цельсия
- необходимо устанавливать излучатели под оптимальным углом (45 градусов)
- необходимо обеспечить равномерное звуковое давление во всей области коагуляции

Слайд 30.

В целом, на основании изложенного, т.е. по итогам представленных теоретических исследований сформулированы общие требования к ультразвуковым аппаратам для воздействия в экстремальных условиях:

- необходимо обеспечивать интенсивности ультразвуковых колебаний, не ниже, чем для обычных условий (комнатная температура при атмосферном давлении) во всём объёме озвучиваемой среды;
- из-за снижения предельных характеристик излучателей при экстремальных температурах необходимо увеличивать долю вводимой энергии колебаний в среду от излучателя за счёт оптимизации геометрии акустического тракта в озвучиваемой среде (оптимизация расстояния между излучающей поверхностью и отражающей границей; расположение излучателей под оптимальным углом к оси озвучиваемого объёма);
- необходимо реализовать высокочувствительную систему контроля типа озвучиваемой среды;
- необходимо обеспечивать рабочий диапазон температур первичного пьезопреобразователя за счёт систем термостатирования и охлаждения;

- необходимо использовать специальные материалы для изготовления рабочего окончания ультразвукового излучателя, способные выдержать амплитуды упругих колебаний ультразвуковой частоты, требуемые для обычных условий, в экстремальных условиях.

Таким образом, подводя итоги изложенному в этой Лекции можно сделать вывод о наличии оптимальных режимов ультразвукового воздействия и о возможности практической реализации ультразвукового воздействия в экстремальных по температуре условиях, т.е. в условиях низких и высоких температур в земных и космических условиях.

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