

**ОСОБЕННОСТИ
УЛЬТРАЗВУКОВОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ
В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ
(Экспериментальные
исследования)**

Хмелёв Владимир Николаевич



***Доктор технических наук, профессор,
Заслуженный изобретатель РФ, Senior
Member IEEE. Лауреат премии
Правительства РФ в области науки и
техники, автор более 1000 научных
публикаций (в т.ч. более 100
патентов, более 20 монографий и
учебников)***

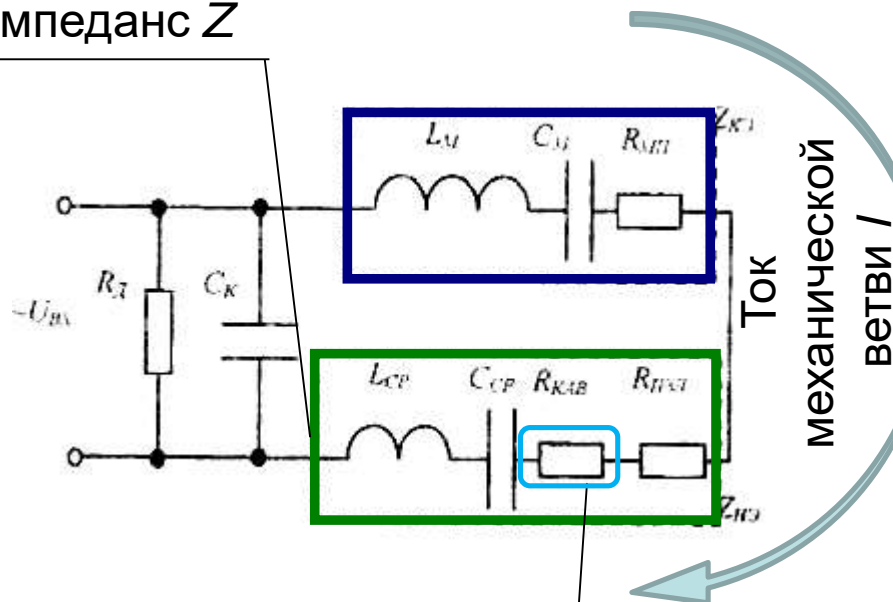
***Зам. директора по научной работе
Бийского технологического
института ФГБОУ ВО "Алтайский
государственный технический
университет им. И.И. Ползунова".***

+7 9039925120

vnh@u-sonic.ru

Эквивалентная электрическая схема ультразвуковой колебательной системы

Механический импеданс Z



Активное сопротивление, обусловленное нагрузкой со стороны среды R (потребляет активную мощность P)

ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Ограниченный температурный диапазон пьезоэлемента, при котором он сохраняет пьезоэлектрические свойства

Изменяется ёмкость пьезоэлемента C_K -> изменяется резонансная частота колебательной системы с изменением температуры

Изменяются механические свойства материала излучателя (снижается предел прочности на растяжение и на сжатие, уменьшается предельное количество циклов нагружения, возникают начальные напряжения).



УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ТВЁРДЫЕ СРЕДЫ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Реализация ультразвуковых процессов при экстремально низких температурах и экстремально высоких температурах , еошда твёрдые тела плавятся или переходят в пар.

ИССЛЕДОВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ



Стенд для экспериментальных исследований при низкой температуре, обеспечиваемой жидким азотом

Экспериментальные исследования

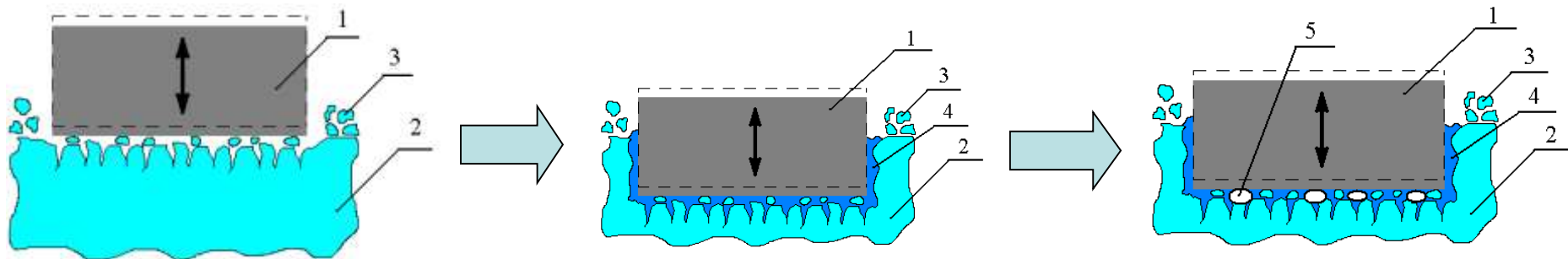
Замороженная
песчано-водная песчано- маслянная смесь



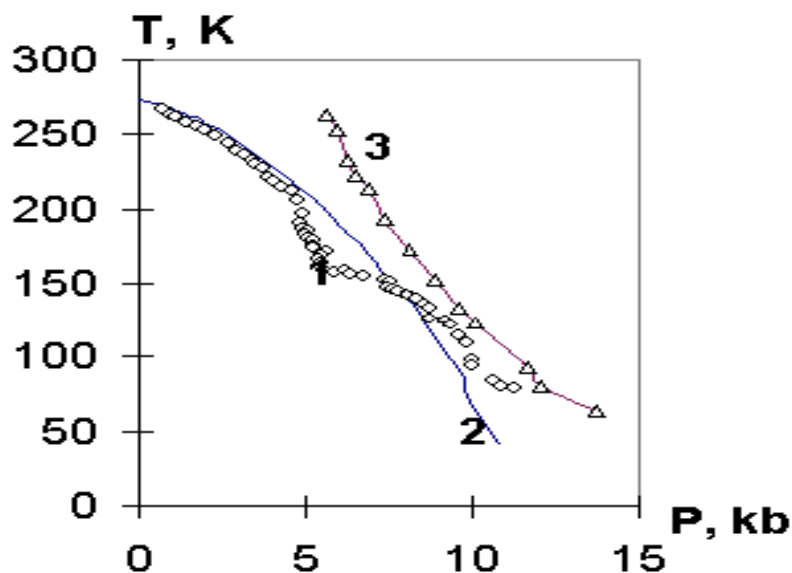
Амплитуда колебаний на торце инструмента – 30 мкм;
Потребляемая мощность при бурении – до 75 Вт;
Диаметр создаваемого канала – 25 мм

Предельный случай ультразвукового воздействия на твёрдые среды в экстремальных условиях

Бурение льда



1 – ультразвуковой рабочий инструмент; 2 – лёд; № 3 – осколки льда; № 4 – вода; 5 – кавитационные пузырьки

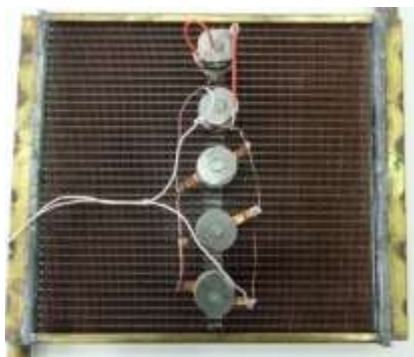


Зависимость температуры плавления льда от внешнего давления согласно различным экспериментальным и теоретическим данным

Основные процессы ультразвукового воздействия на твёрдые среды в экстремальных условиях

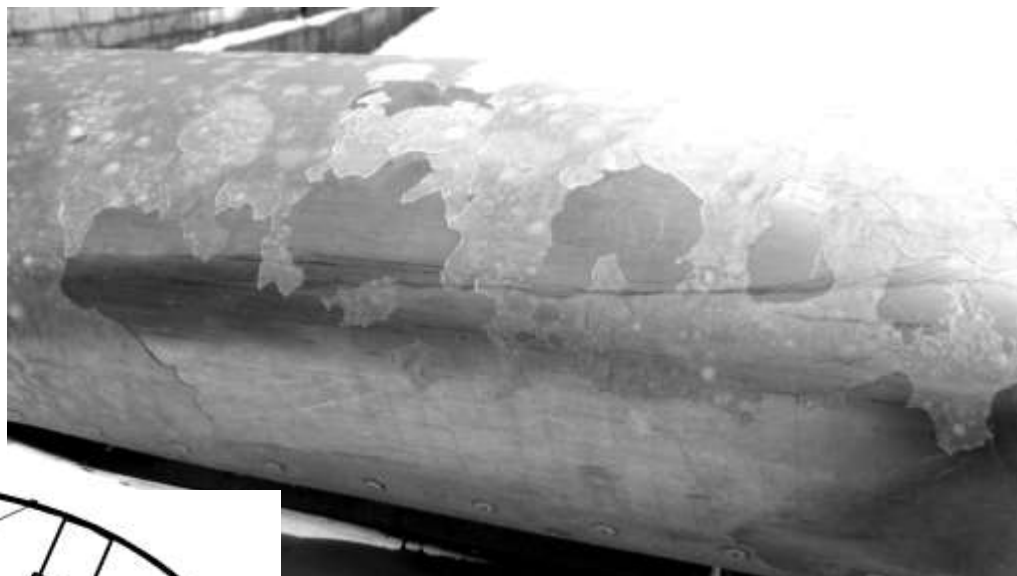
Удаление льда с поверхности технологических установок

Внешний вид технологической установки (на примере радиатора) с закреплёнными ультразвуковыми излучателями

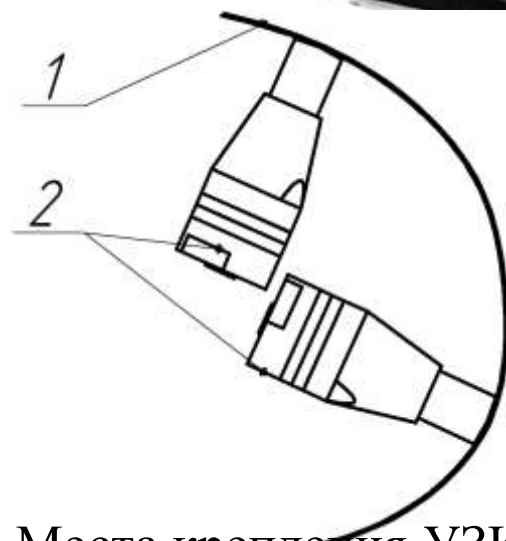


Результат ультразвукового воздействия на обледенённую поверхность в течение 15 мин

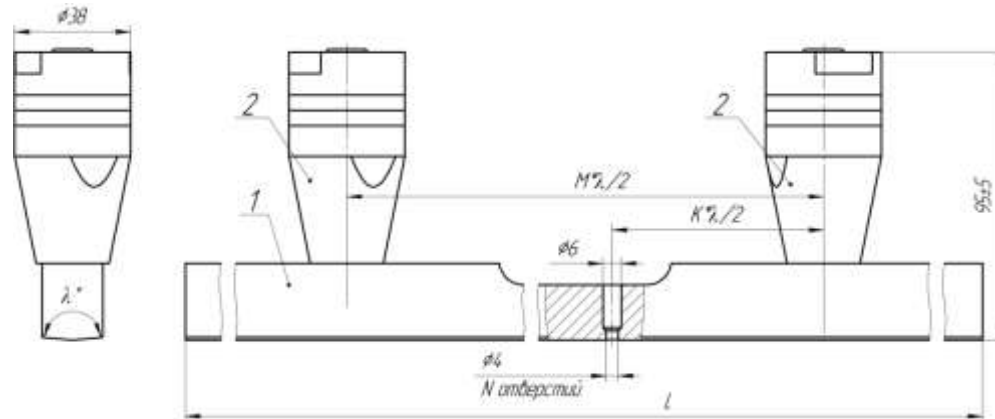
Ультразвуковая система антиобледенения летательных аппаратов



Корка льда,
разрушенная
ультразвуковыми
колебаниями



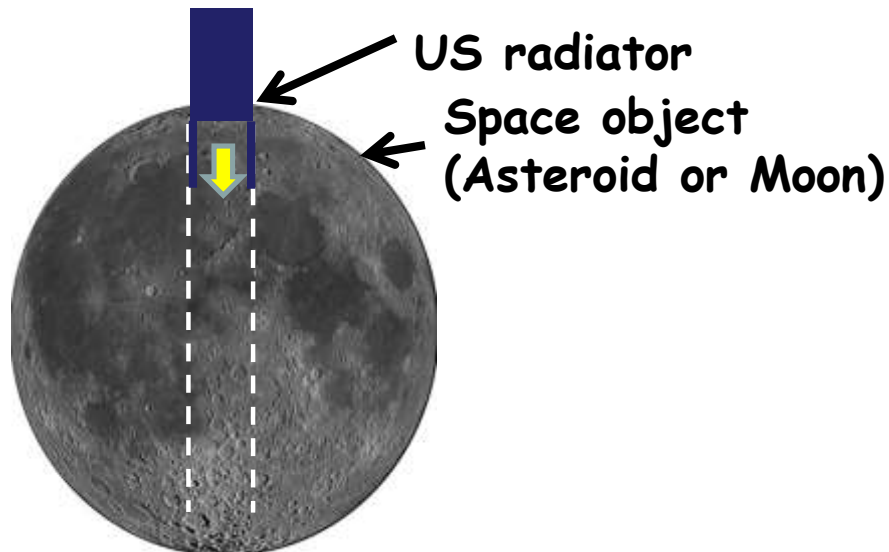
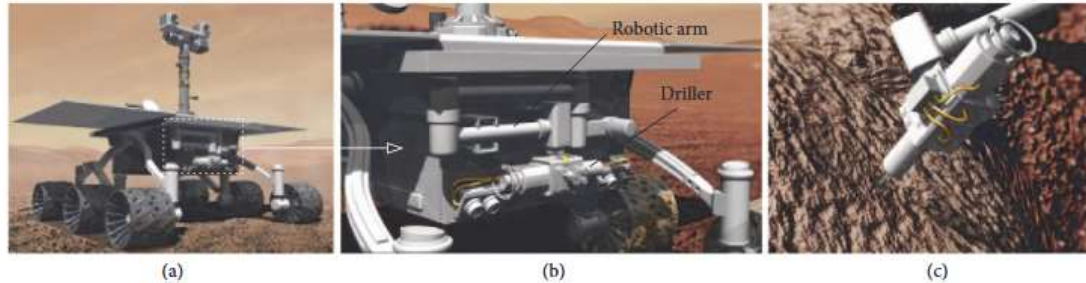
Места крепления УЗКС к
крылу: 1 – крыло; 2 –
УЗКС



Конструкция УЗКС: 1 – Распределитель
УЗ колебаний; 2 – электроакустический
преобразователь пьезоэлектрического

Процессы ультразвукового воздействия на твёрдые среды в экстремальных условиях

Бурение космических объектов



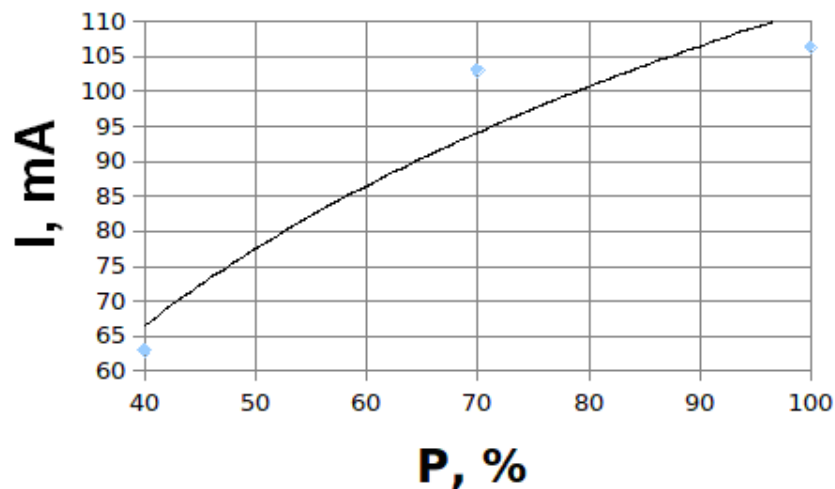
Материалы, использованные при проведении экспериментов по ультразвуковому бурению

- Сыпучий песок
- Силикатный кирпич
- Замороженный песок – имитатор лунного грунта (размер частиц – не более 1 мм, содержание влаги по массе – 4 %)

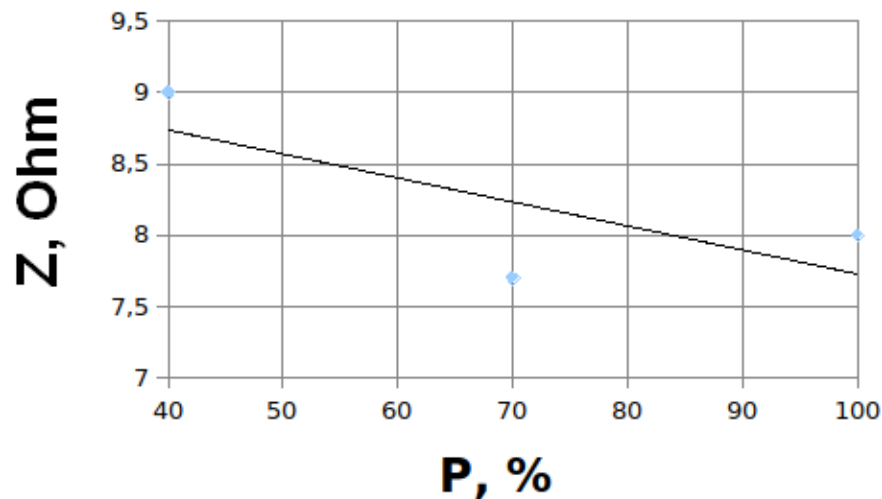
Зависимости электрических параметров ультразвуковой колебательной системы от мощности

Материал – замерзший песок (имитатор лунного грунта),
усилие прижима – 7,5 Н, частота – 22 кГц,
температура – -70°C .

Здесь и далее мощность указана в % от максимальной.
Максимальная мощность составляет 50 Вт.



а) ток механической ветви

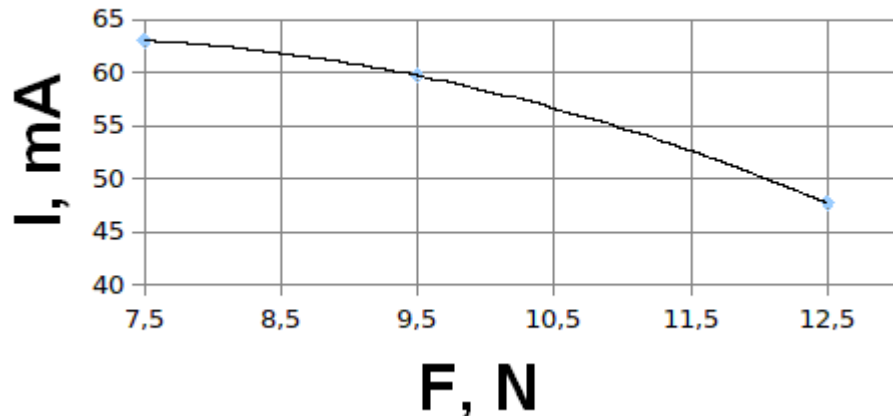


б) модуль импеданса
механической ветви

Зависимости электрических параметров ультразвуковой колебательной системы от усилия прижима

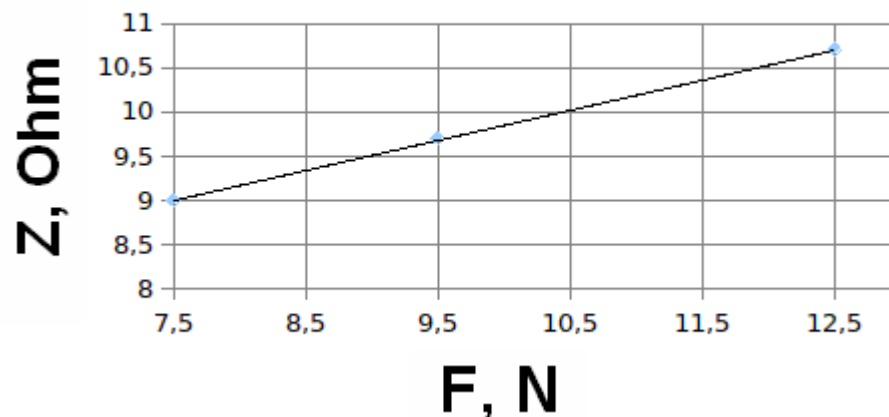
Материал – замерзший песок (имитатор лунного грунта),
мощность – 20 Вт, частота – 22 кГц,
температура – -70°C .

40%



а) ток механической ветви

40%

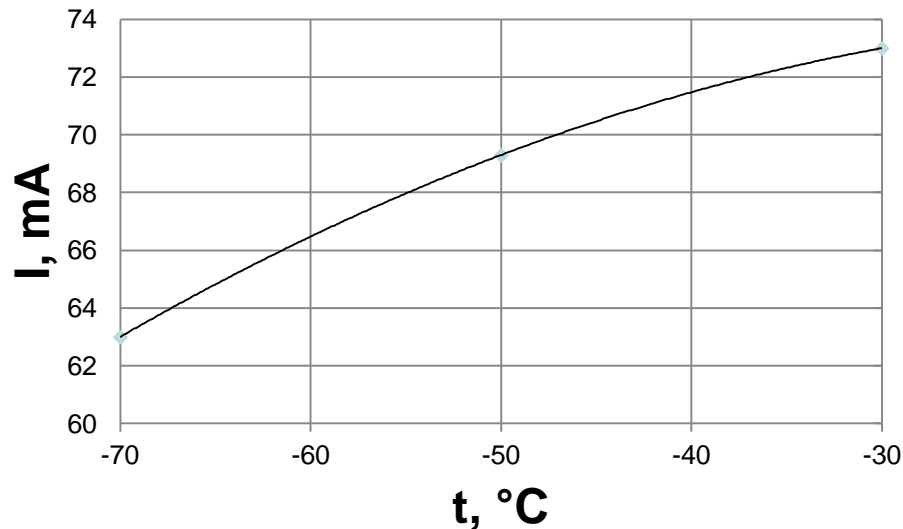


б) модуль импеданса
механической ветви

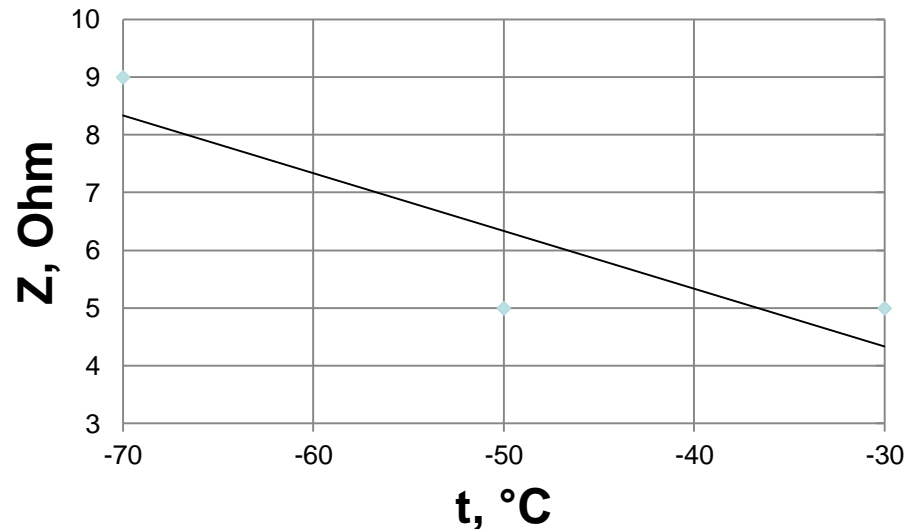
Зависимости электрических параметров ультразвуковой колебательной системы от температуры

Материал – замерзший песок (имитатор лунного грунта),
усилие прижима – 7,5 Н, частота – 22 кГц.

Здесь и далее мощность указана в % от максимальной. Максимальная
мощность составляет 50 Вт.



а) ток механической ветви



б) модуль импеданса механической ветви

Ключевая особенность воздействия – температура приводит к понижению тока механической ветви и увеличению акустического импеданса среды. Следовательно, уменьшается энергия, вводимая в озвученный материал.

Необходимо осуществлять дополнительное ударно-контактное воздействие с помощью присоединённой массы.

Ультразвуковое бурение при дополнительных воздействиях



Ultrasonic generator with horn



Setup for ultrasonic drilling at room temperatures

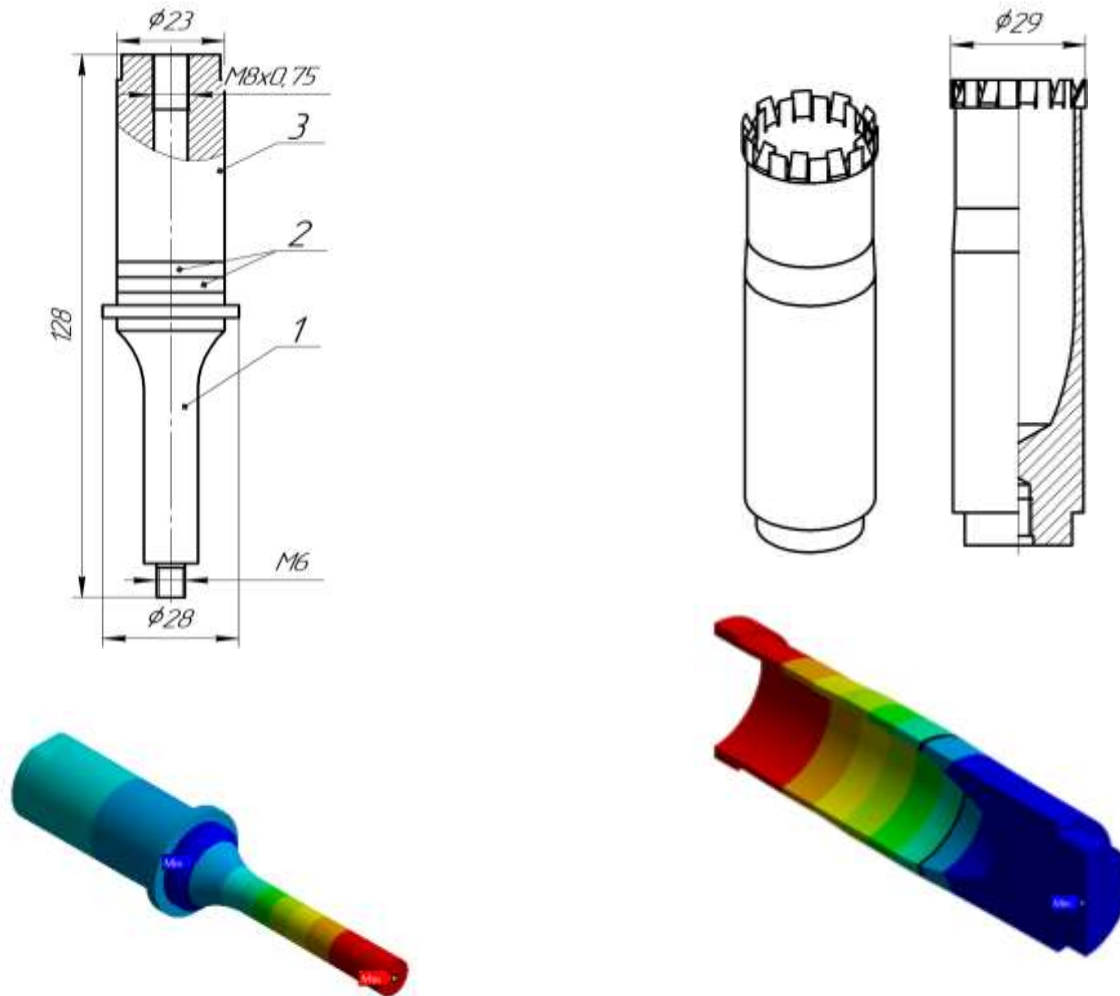
Static pressure, N	Drilling speed, mm/min				
	DR	UV	UV + DR	UV + LV	UV + LV + DR
Silicate brick					
20	4	27	30	30	42
10	2	16	17	18	24
5	2	14	16	16	24
Red brick					
20	3	9	11	10	13
10	1	14	14	15	17
5	1	13	13	14	18
Foam concrete					
20	11	122	134	136	154
10	10	91	102	100	136
5	5	55	59	60	102

UV – ultrasonic vibrations

LV – low frequency shock vibrations due to additional mass

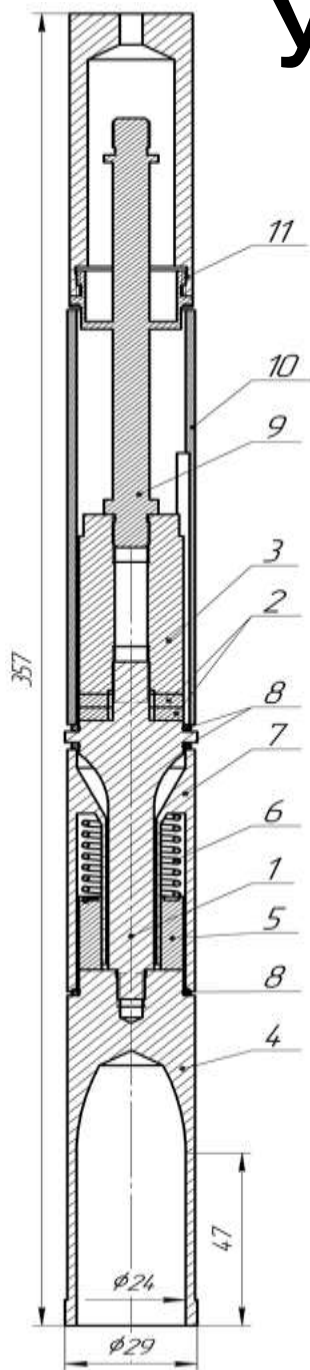
DR – pseudo-rotation

УЗКС для бурения грунта (составляющие)



1 – концентратор; 2 – пьезоэлектрические кольца; 3 – отражатель.

УЗКС для бурения грунта (проект)



- 1-3 – пьезоэлектрический преобразователь;
- 4 – рабочий инструмент;
- 5 – свободная масса;
- 6 – пружина;
- 7 – корпус концентратора;
- 8 – кольцевые резиновые уплотнители;
- 9 – полуволновой резонансный шток;
- 10 – корпус преобразователя;
- 11 – кронштейн

Характеристика	Значение
Резонансная частота, кГц	23,5
Максимальная амплитуда (размах) механических колебаний рабочего инструмента, мкм	60
Масса, г	700
Габаритные размеры, мм	29x357
Потребляемая мощность на холостом ходу, Вт	12
Потребляемая мощность под максимальной нагрузкой, Вт	50

Постановка задачи исследования процесса ультразвукового бурения для обнаружения воды и льда

Скорость бурения $\frac{dh}{dt}(A, \Lambda) \rightarrow ?$ Массовая доля испарившейся воды $\Delta\chi(A, \Lambda) \rightarrow ?$

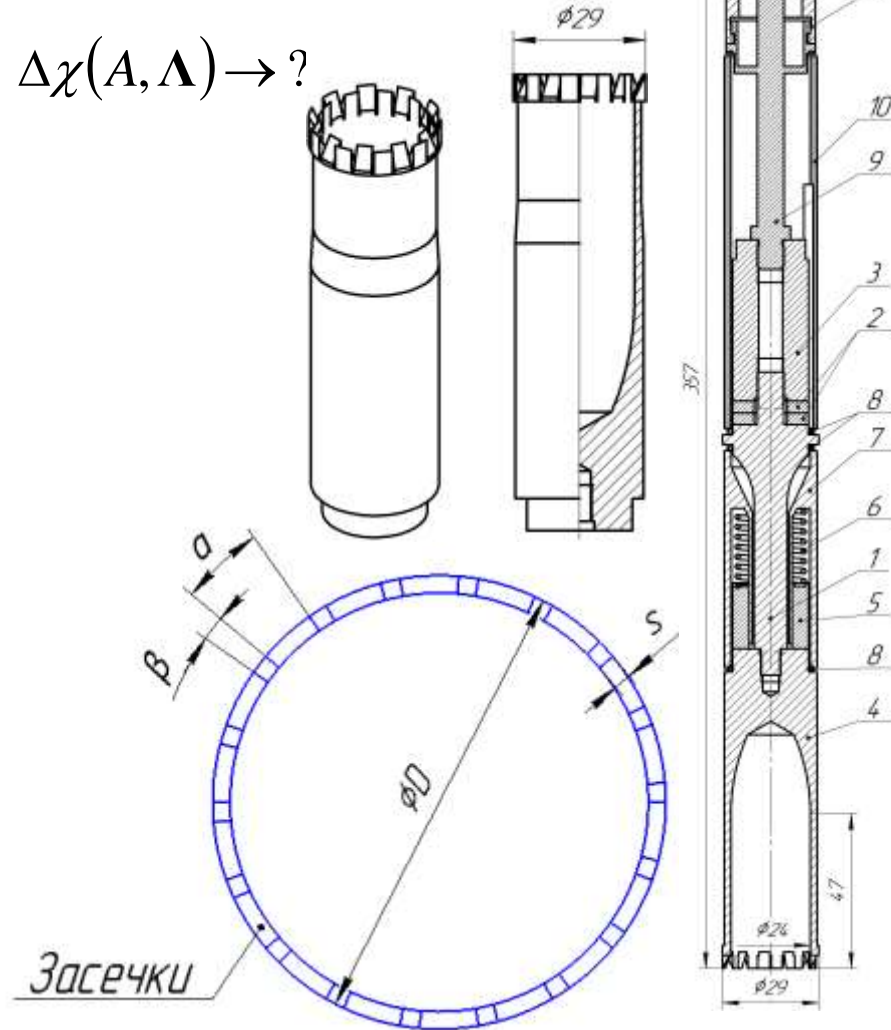
Критерий оптимальности процесса бурения

Минимальная масса испарившейся воды $\Delta\chi \rightarrow \min$

A – амплитуда колебаний излучателя

Λ – параметры излучателя

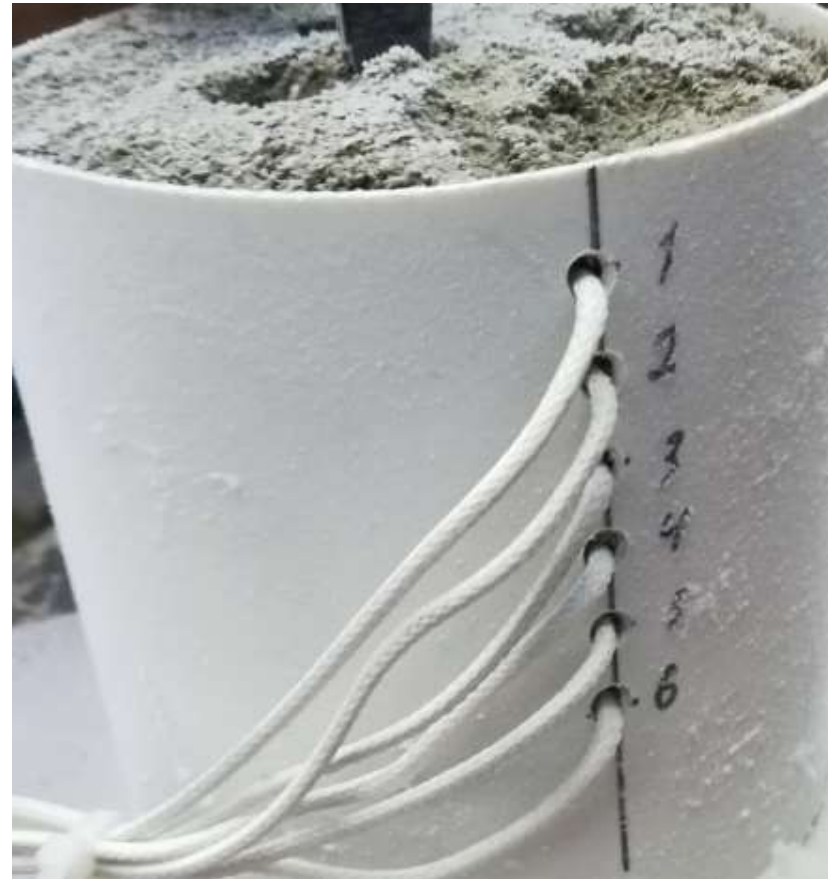
1. D – диаметр;
2. S – толщина засечек;
3. α/β – скважность;
4. n – количество засечек.



Ultrasonic drilling at low temperatures



Photos of the ultrasonic drilling process at different points in time at temperature -80°C



A sample of a frozen soil simulator with an embedded system of temperature sensors located at various depths

Ultrasonic drilling at low temperatures



a) 0 min



b) 0.5 min

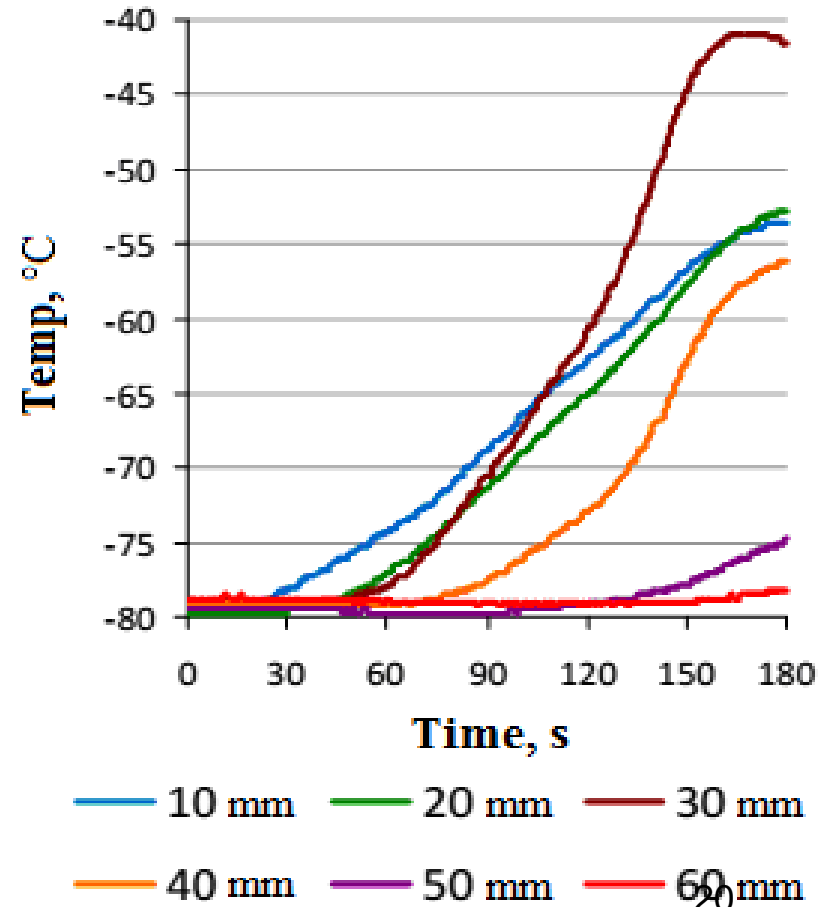


c) 1 min

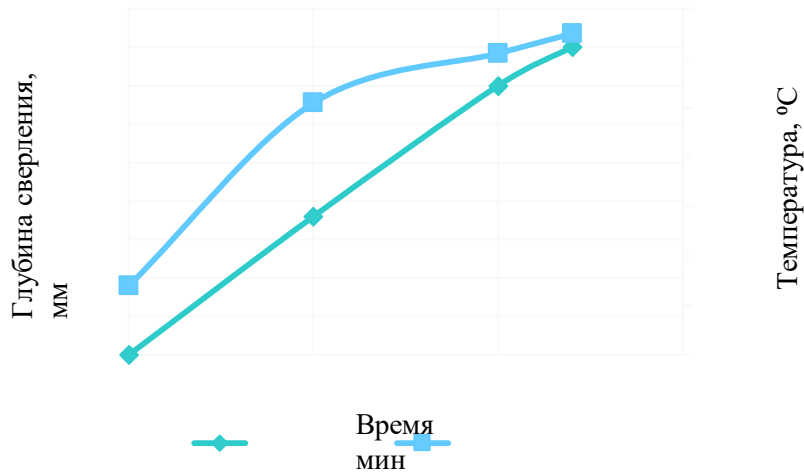


d) 2 min

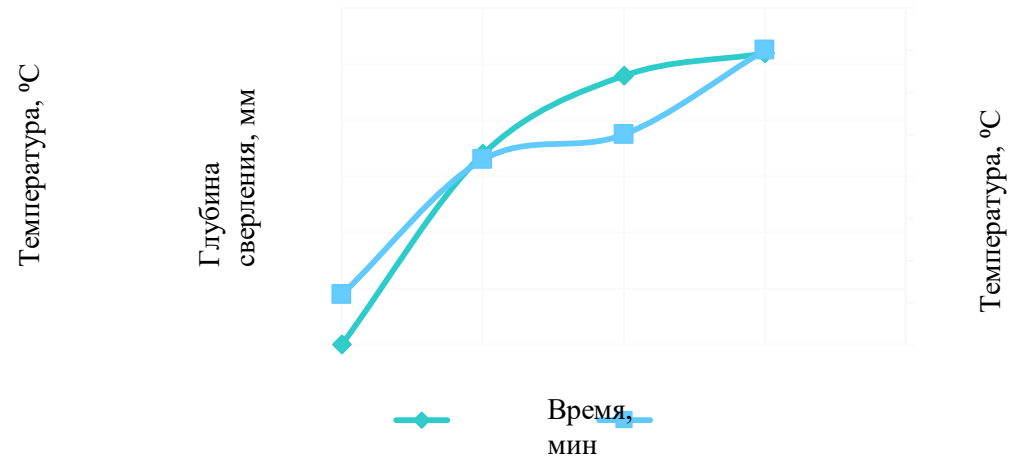
Dependences of the temperature of the soil simulator on the time of ultrasonic drilling at different depths



Скорость и температура



Пенобетон



Замороженная песчано-водная смесь

Материал	Средняя потребляемая мощность, Вт	Скорость бурения, мм/мин	Среднее увеличение температуры в минуту, °C/мин
Пенобетон	56	3	30
Песчано-водная смесь	72	5	10
Песчано-маслянная смесь	63	6	18

Влияние вещества материала на электрические параметры ультразвуковой колебательной системы



а) ток механической ветви



б) модуль импеданса механической ветви

Измерение импедансных характеристик излучателя позволяет в режиме реального времени определять тип грунта

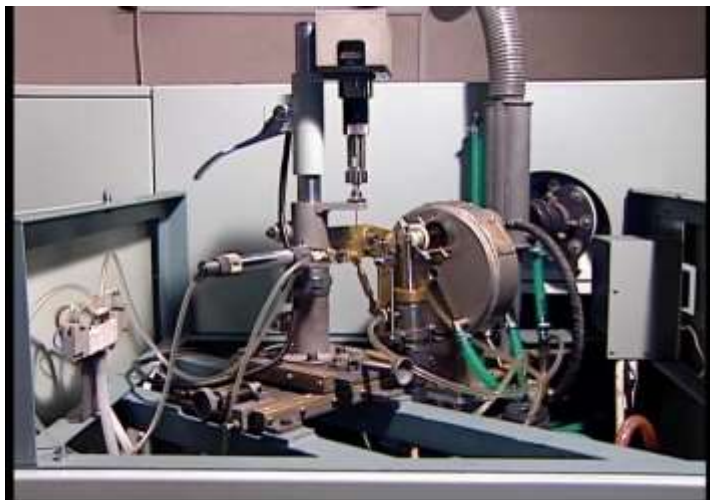
**УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ
НА ГАЗОВЫЕ СРЕДЫ
ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ
ТЕМПЕРАТУРАХ**

Основные процессы ультразвукового воздействия на газовые среды при высоких температурах

- 1) Коагуляция аэрозолей (коагуляция дисперсных выбросов в топочных газах)
- 2) Интенсификация процессов горения
- 3) Распыление для сжигания авиационных масел в анализаторе частиц

Ультразвуковое распыление авиационных масел для их спектрального анализа

Установка для спектрального анализа авиационных масел при высоких температурах



Дисперсный состав капель при распылении на частоте 60 кГц



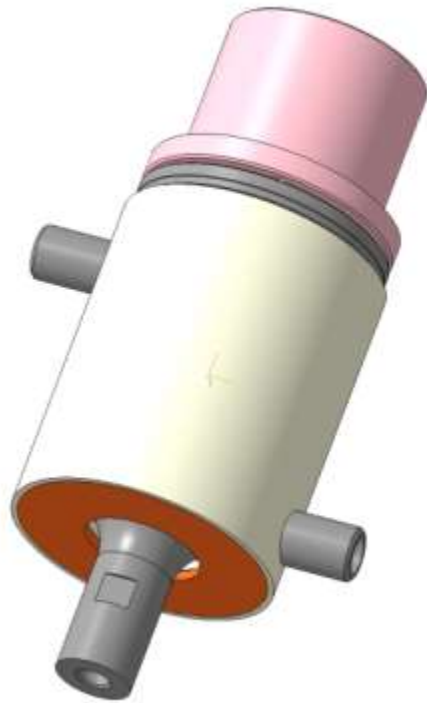
Ультразвуковой распылитель, установленный в плазменной горелке



Дисперсный состав капель при распылении на частоте 22 кГц



Ультразвуковое распыление расплава алюминия

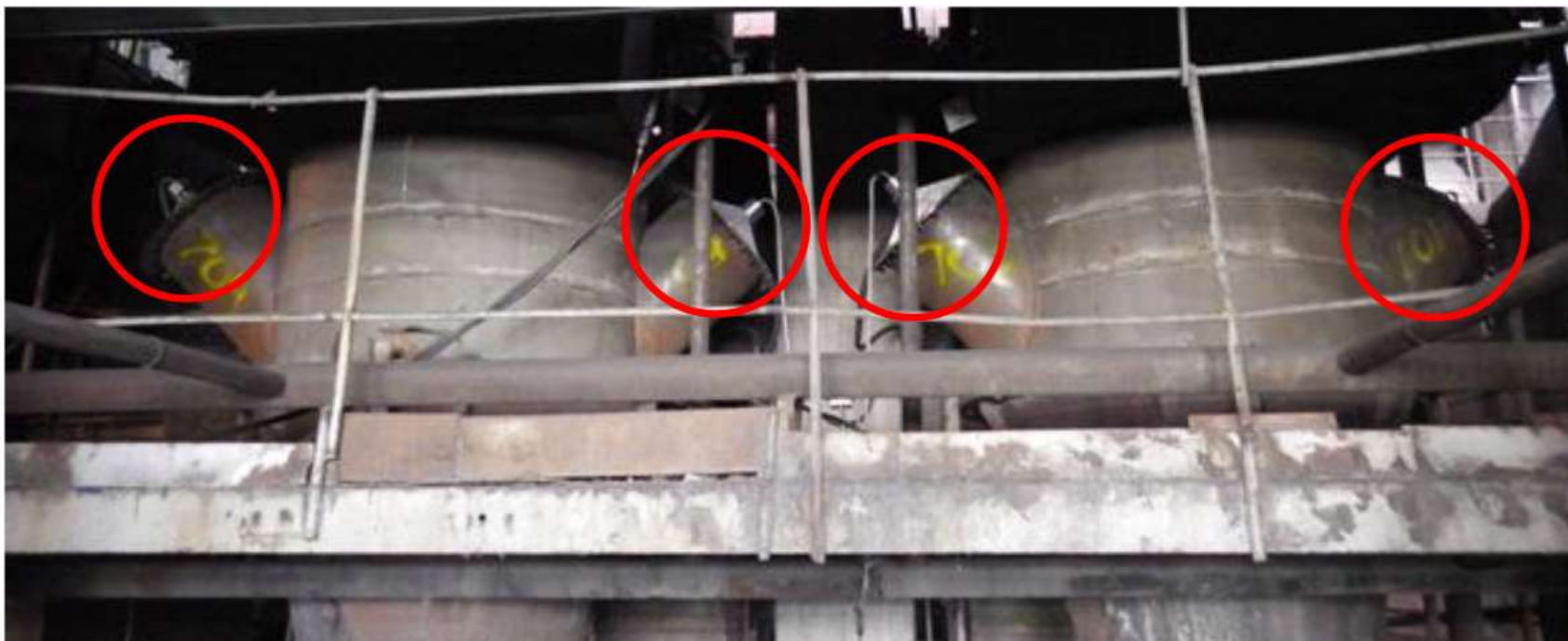


Ультразвуковая колебательная система для наложения колебаний на распылительную форсунку



Фото установки для наложения ультразвуковых колебаний

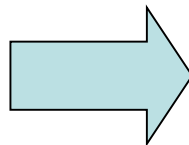
Ультразвуковая коагуляция дисперсных выбросов в топочных газах (Читинская ТЭЦ)



До коагуляции



После коагуляции



Ультразвуковые излучатели для работы при высоких температурах (в составе экспериментальных установок для испытаний излучателей)

Ультразвуковые дисковые излучатели при температурах от 170 °С и выше



Ультразвуковой распылитель расплава легкоплавких сплавов
(при температуре 300 °С)



Влияние температуры газовой среды на параметры ультразвукового излучателя

Ультразвуковой аппарат для работы в экстремальных условиях (слева – электронный генератор, справа – дисковый излучатель)

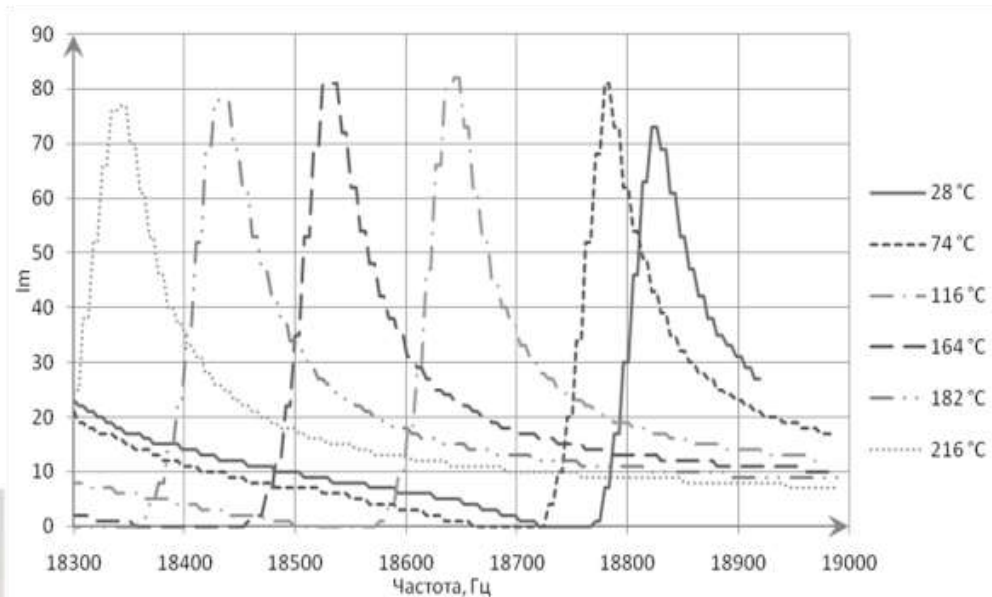


Ультразвуковой излучатель, встроенный в промышленно-технологическую установку (с системами воздушного охлаждения концентратора и рабочего инструмента и водяного охлаждения первичного пьезопреобразователя)



Внешний вид ультразвукового дискового излучателя

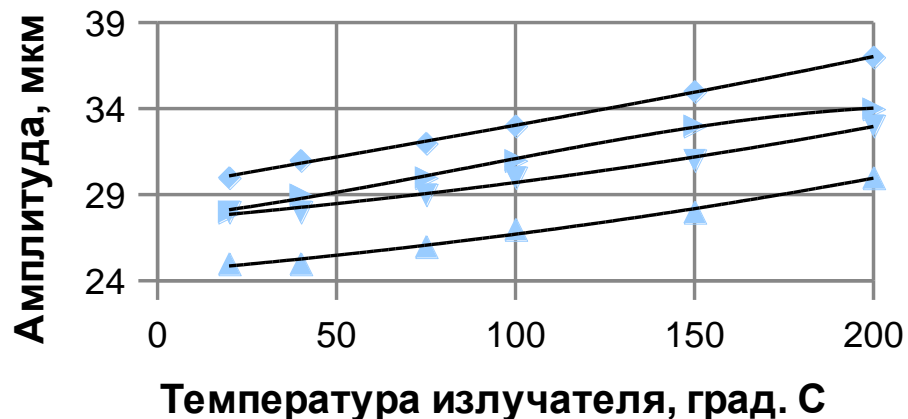
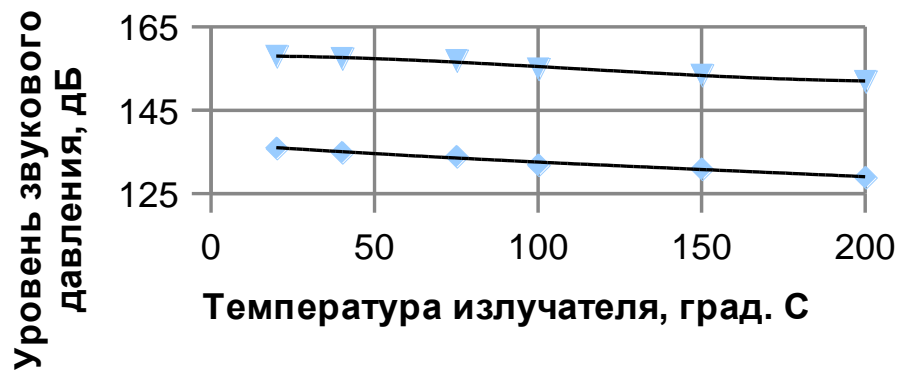
Зависимость тока механической ветви ультразвукового излучателя (I_m , мА) частоты при различных температурах



Ключевая особенность воздействия – повышение температуры с 28 до 216 °C приводит к уменьшению резонансной частоты УЗКС на 480 Гц.

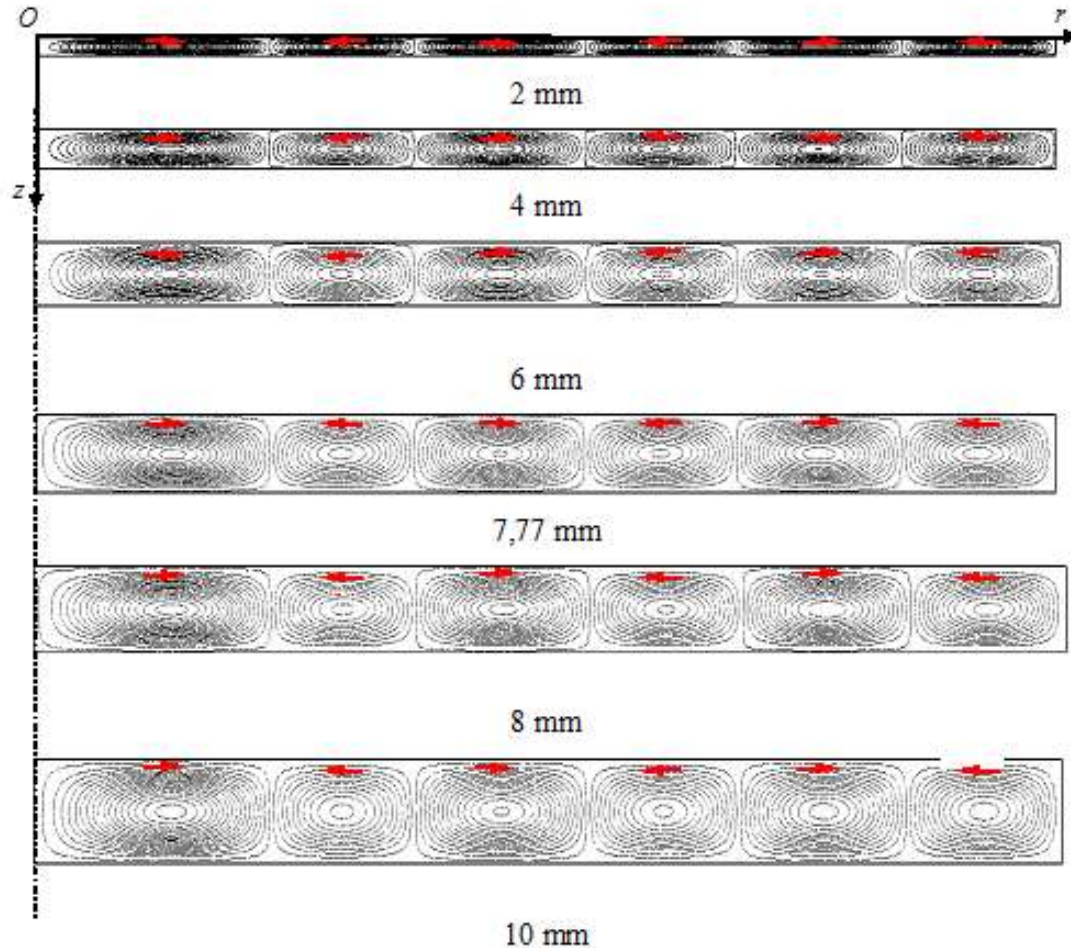
Следовательно, необходимо реализовать систему автоматической подстройки частоты, адаптированной к изменению температуры.

Влияние температуры газовой среды на звуковое давление



При повышении температуры уровень звукового давления снижается, несмотря на увеличение амплитуды колебаний. Следовательно, необходимо искать новые нелинейные эффекты УЗ воздействия.

Ультразвуковая коагуляция в резонансных условиях при которых возникают вихревые акустические течения



За счёт вихревых течений происходит локальное повышение концентрации (частицы за счёт сил инерции частично уносятся к периферийным областям вихрей). Следовательно, возрастает эффективность коагуляции.

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ЖИДКИЕ СРЕДЫ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Стенд для высокотемпературных исследований (плавление металлов)

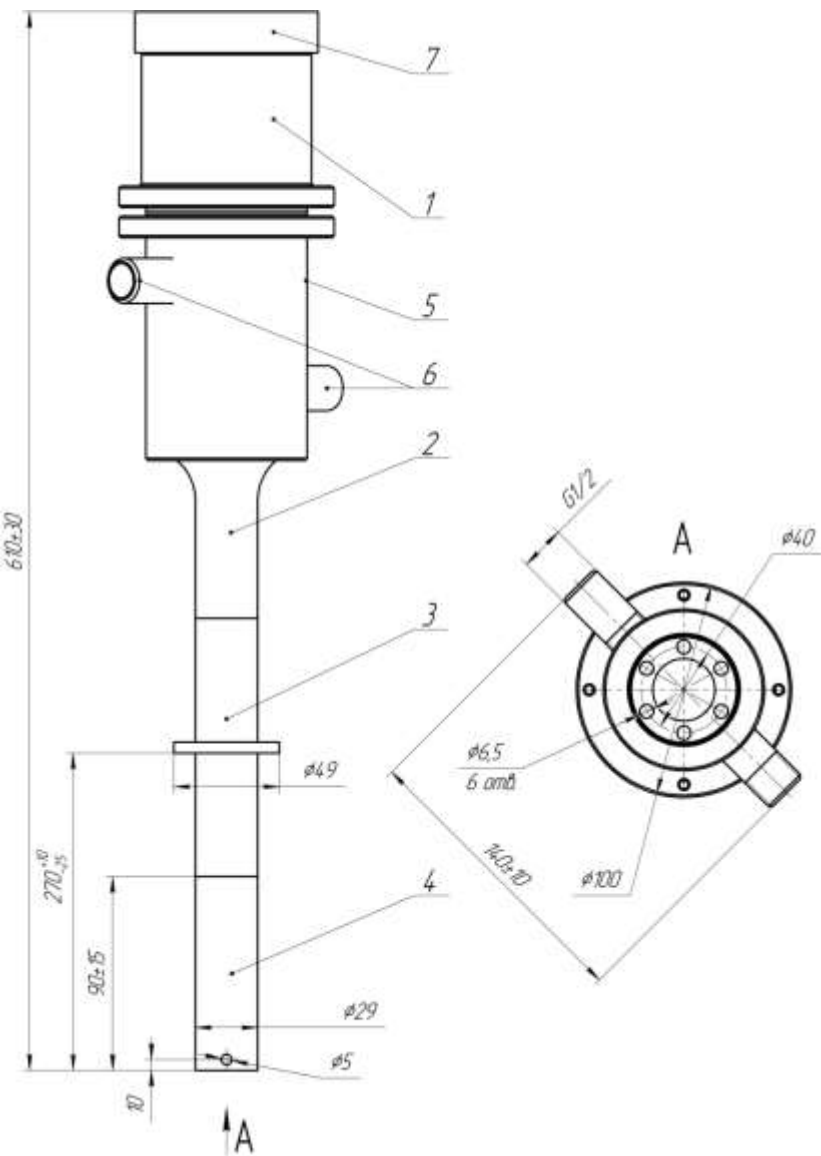


Внешний вид огнеупорной камеры

Основные процессы, реализуемые в жидкостях при экстремальных температурах

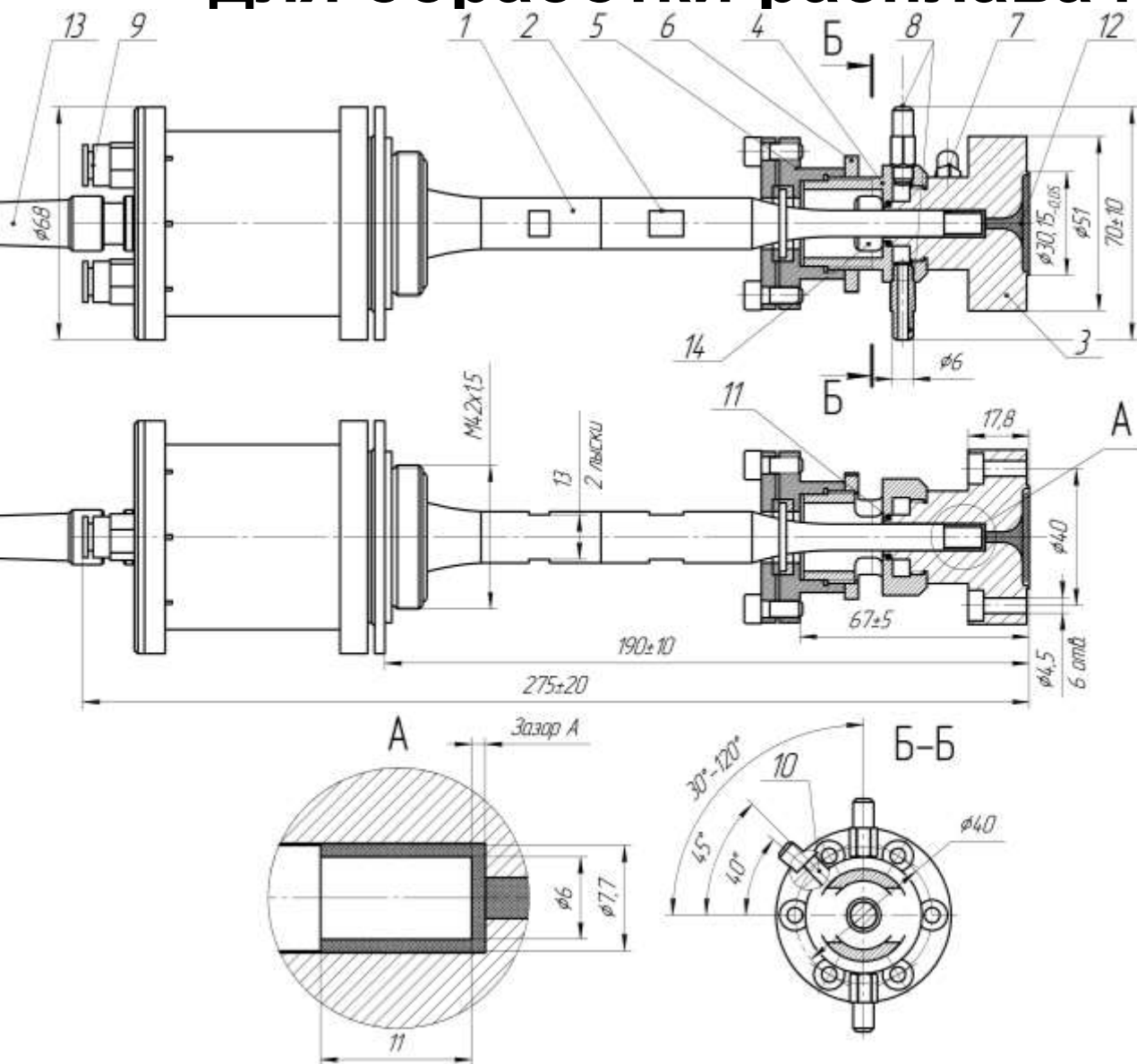
- 1) Кавитационная обработка криогенных жидкостей
- 2) Кавитационная обработка расплавов полимеров
- 3) Кавитационная обработка расплавов легкоплавких сплавов

Обработка расплава алюминия (пропитка углеволокна)



- 1 – Пьезопреобразователь в корпусе; 2 – концентратор титановый; 3 – 2-х полуволновая проставка стальная; 4 – рабочий инструмент (ниобий); 5 – охлаждающая рубашка; 6 – патрубки; 7 – вентилятор

Ультразвуковая колебательная система для обработки расплава полимеров



- 1 – пьезопреобразователь в корпусе;
- 2 – рабочий инструмент; 3 – головка;
- 4 – направляющая; 5 – фланец УЗКС;
- 6 – гайка; 7 – штуцер выхода полимера;
- 8 – штуцеры пневмосистемы для местного охлаждения полимера; 9 – штуцеры пневмосистемы для охлаждения пьезопреобразователя;
- 10 – отверстие для установки датчика температуры;
- 11 – уплотнительное кольцо;
- 12 – расплавленный полимер;
- 13 – кабельный ввод; 14 – смотровое окно

Кавитационная обработка криогенных жидкостей



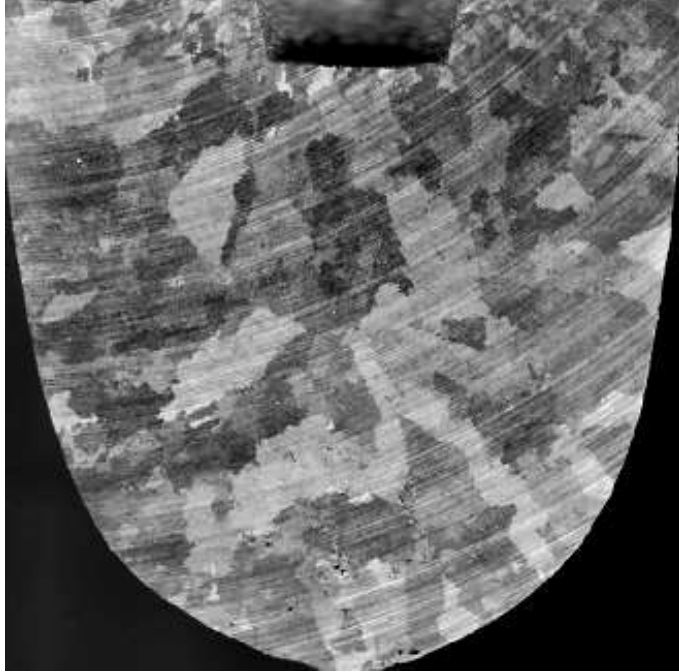
Кавитационная обработка расплавов полимеров



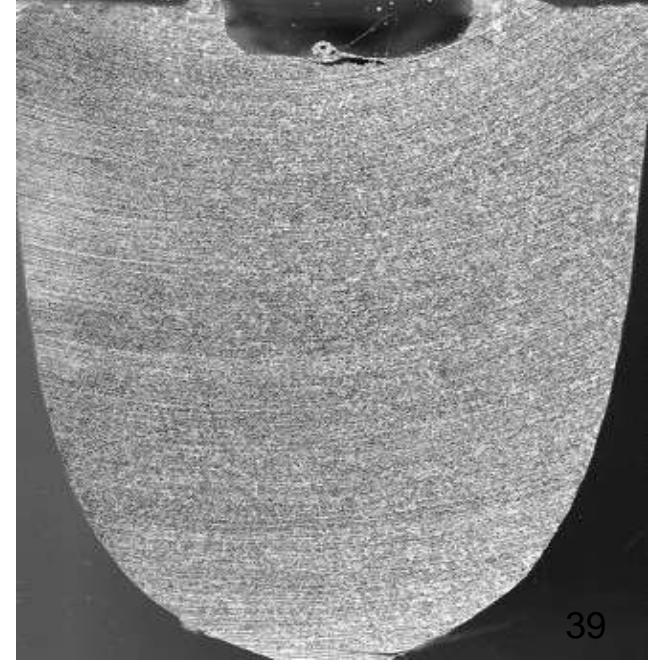
Кавитационная обработка расплавов легкоплавких сплавов



Кристаллизация Al-4 % Cu
без УЗ обработки



Кристаллизация Al-4 % Cu
с УЗ обработкой

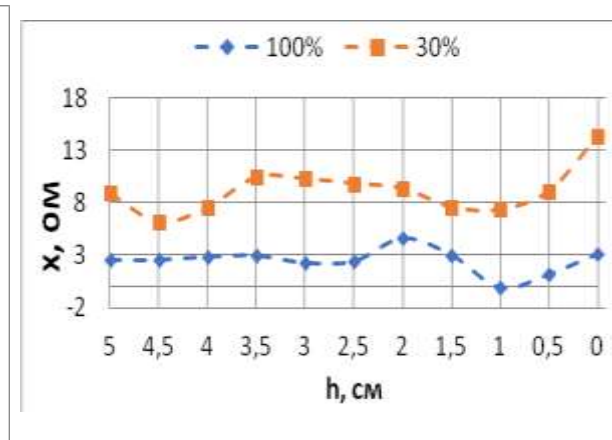
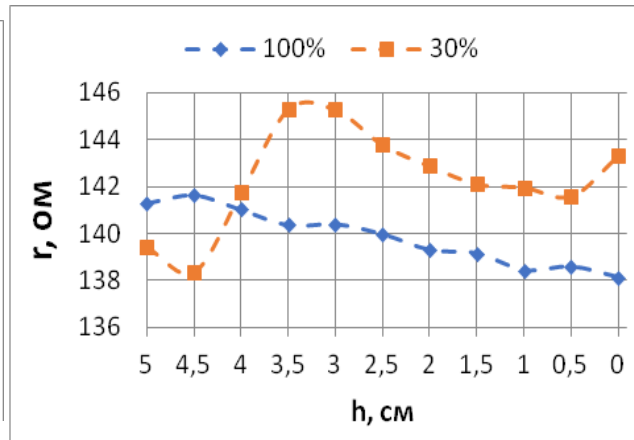
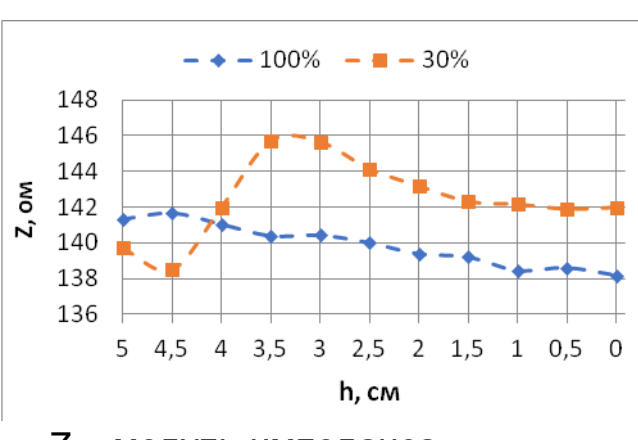


Влияние температуры на импедансные характеристики ультразвукового излучателя при обработке расплавов (на примере алюминия)



Изменение температуры приводит к уменьшению резонансной частоты с 21 до 20,2 кГц. Следовательно, необходимо осуществлять непрерывный контроль акустической нагрузки и автоматическую подстройку частоты. При повышении температуры увеличивается активное сопротивление внутренних потерь в УЗКС до 3 раз. Следовательно, уменьшается мощность, вводимая в среду. Для повышения эффективности воздействия необходимо оптимизировать геометрию обрабатываемого объема.

Экспериментальные исследования влияния расстояния между ультразвуковым излучателем и отражателем на импедансные характеристики ультразвукового излучателя в расплаве алюминия



Z – модуль импеданса

R – активная составляющая импеданса, определяющая долю суммарной энергии колебаний, затрачиваемую на поддержание кавитации

X – реактивная составляющая импеданса, обусловленная упругостью среды

Мощность 30% - амплитуда звукового давления вблизи излучателя 500 кПа (режим развитой кавитации во всём объёме)

Мощность 100% - амплитуда звукового давления вблизи излучателя 1600 кПа (режим вырожденной кавитации вблизи излучателя)

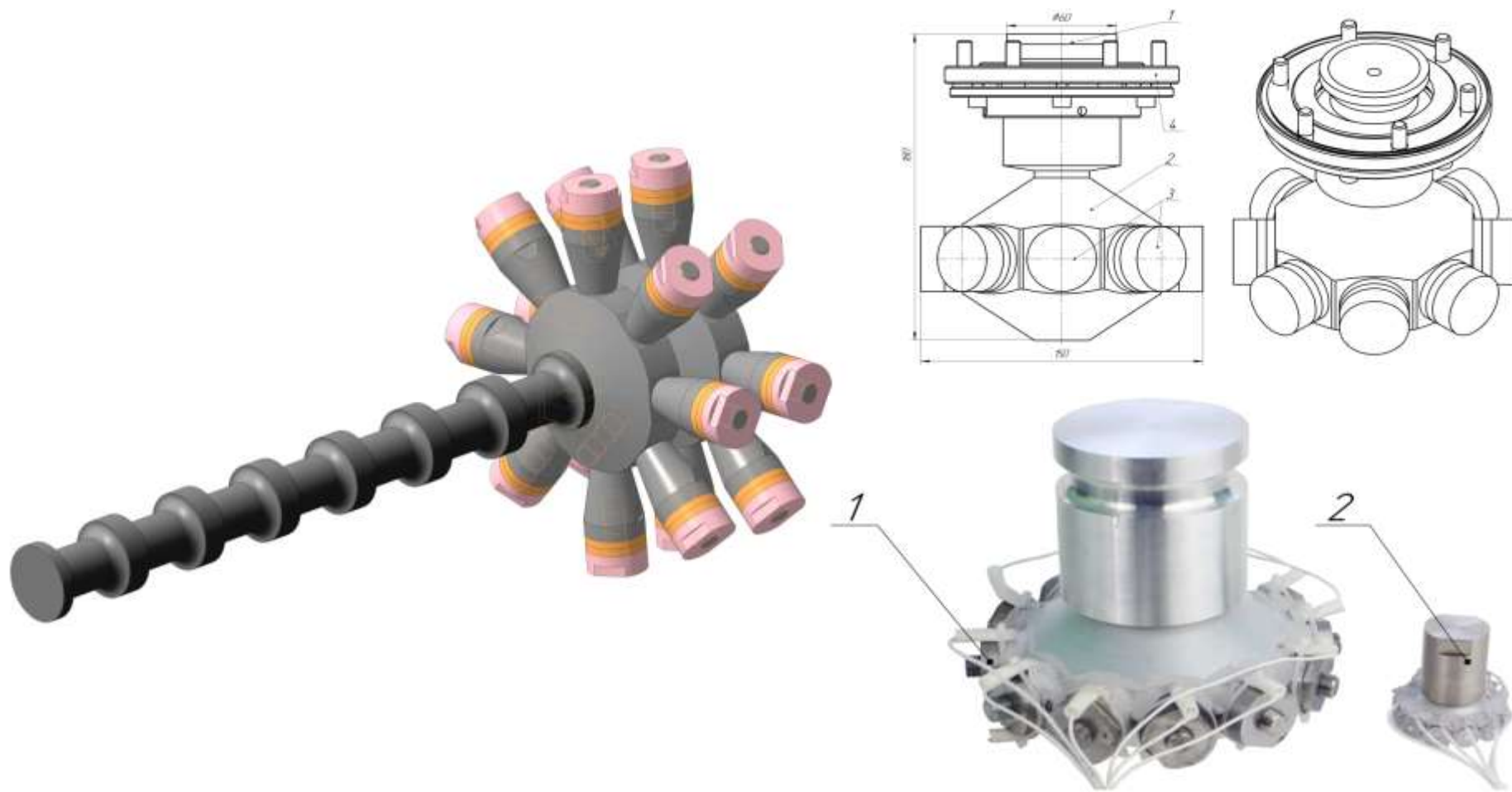
Ключевая особенность воздействия – при мощностях, обеспечивающих режим развитой кавитации, необходимо воздействовать при оптимальном расстоянии между излучателем и отражающей поверхностью (для расплава алюминия – 3,2 см)

Требования к ультразвуковым аппаратам для воздействия в экстремальных условиях

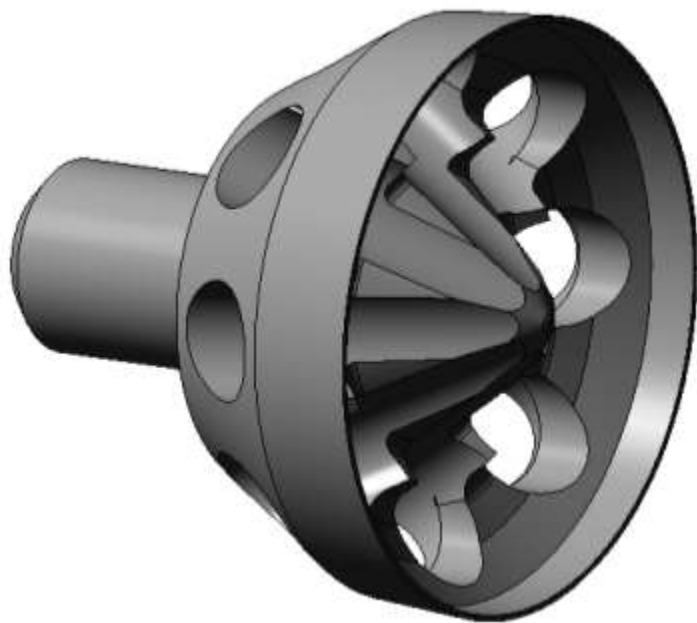
- Ультразвуковое воздействие на твёрдые среды должно дополняться ударно-контактным воздействием со свободной массой и псевдовращением
- Ультразвуковое воздействие на газовые среды должно проводиться при подстройке частоты в зависимости от температуры. Ультразвуковой излучатель должен быть снабжён двойной системой охлаждения (воздушное и водяное)
- Ультразвуковое воздействие на жидкие среды (расплавы) должно осуществляться при оптимальном расстоянии между излучателем и отражающей поверхностью

ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ (НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ)

Создание многопакетных пьезопреобразователей повышенной мощности и увеличенной частоты



Разработка рабочих инструментов для бурения грунта и обработки сред



Особенности:

- Наружная режущая часть для формирования канала
- Внутренняя рабочая полость для дополнительного разрушения грунта
- Отверстия для выхода измельченного грунта из рабочей полости

Создание разночастотных аппаратов для подачи колебаний в зону расплава (сварка)

