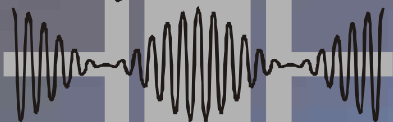


Лаборатория
Акустических



Процессов
и
Аппаратов

Состояние и перспективы развития ультразвуковых технологий

***Лаборатория акустических процессов и
аппаратов***

www.u-sonic.ru

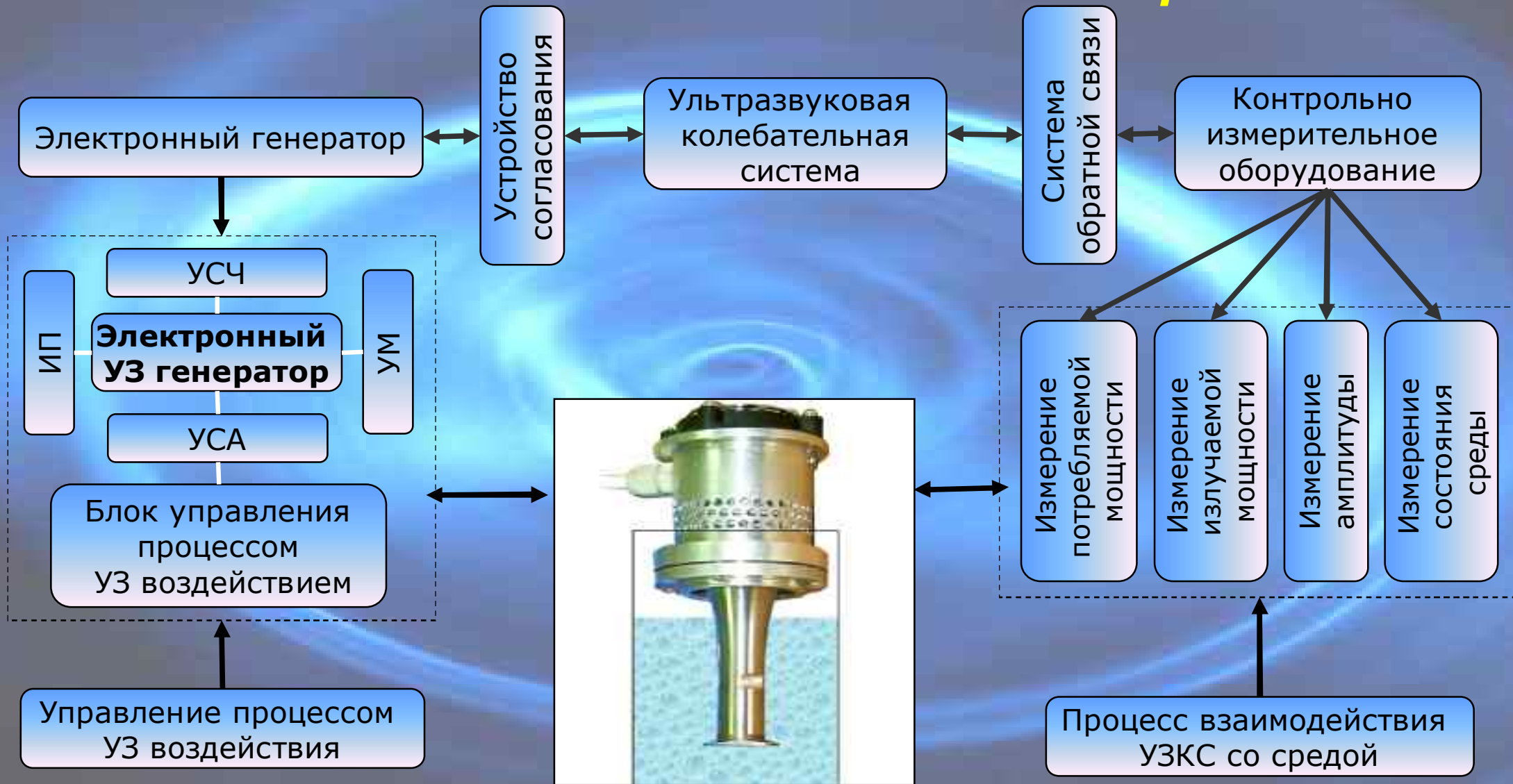
Применение УЗ технологий



Состояние УЗ технологий

1. Достигнуто к 80-м годам XX века в отдельных аппаратах в лабораторных условиях
2. В последние годы наблюдается стремительный рост интереса к ультразвуковым технологиям
3. Практически не реализуются даже известные УЗ технологии. Обусловлено низкой эффективностью существующих аппаратов
 - КПД менее 40%
 - Масса, габариты, энергопотребление –не приемлемы
 - Отсутствие оптимального воздействия на обрабатываемые среды (ручная регулировка)
 - Отсутствие многофункциональных аппаратов

Ультразвуковой технологический аппарат



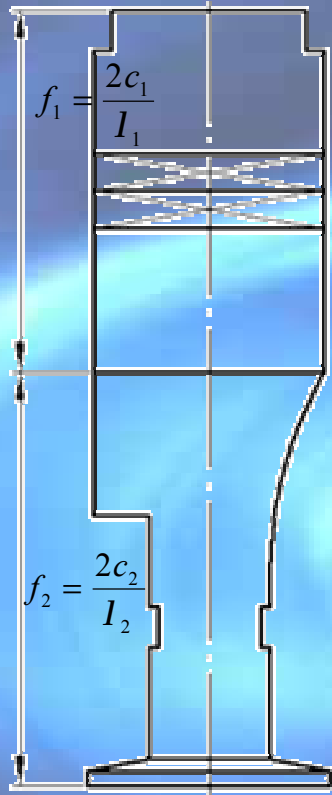
Ультразвуковая колебательная система

Внешнее воздействие

Нагрев металла
 $\Delta F \sim f(\rho, \alpha, k)$

Нагрев керамики
 $\Delta F \sim f(T, U)$

Влияние среды
(вязкость)



Конструктивное воздействие

Тип керамики
 $\Delta F = f(c_{\text{Кер}} \theta)$

Тип концентратора
 $\Delta F = f(\text{форма})$

Площадь и форма инструмента

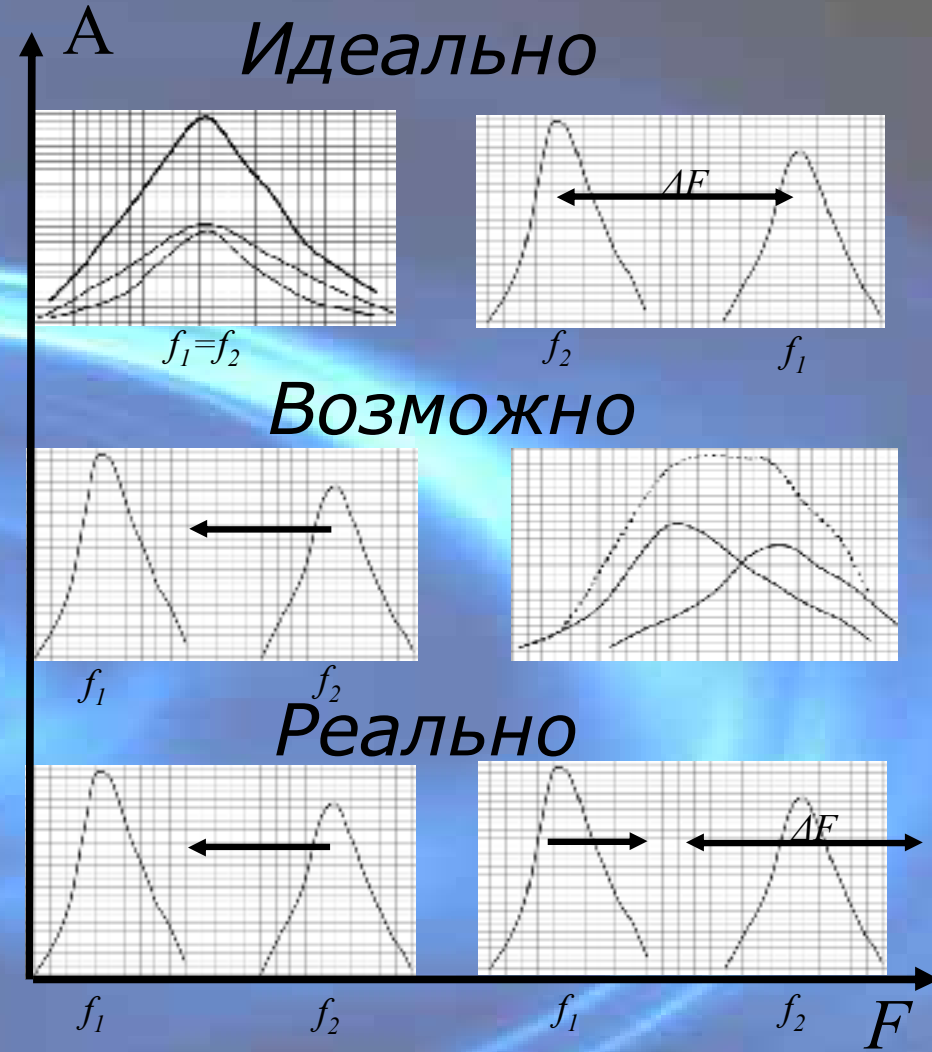
Влияние технологического процесса

Режим воздействия

Докавитационный

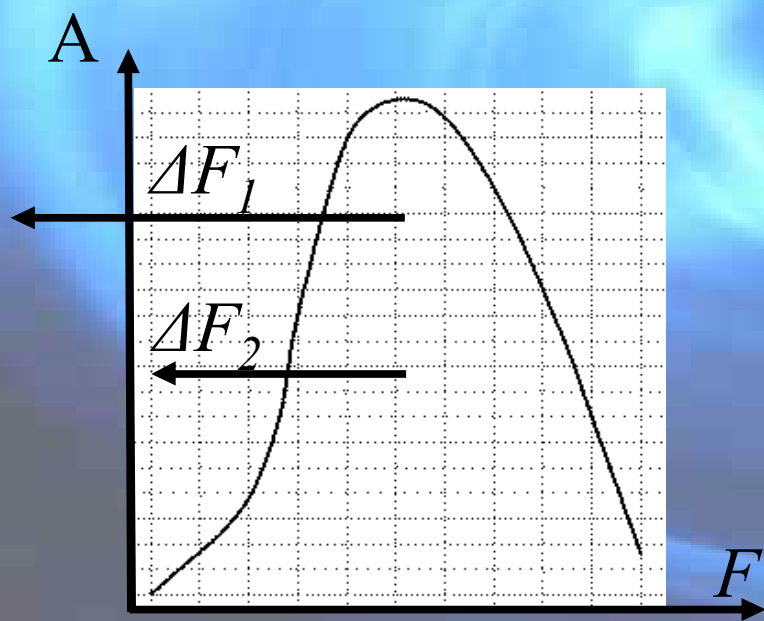
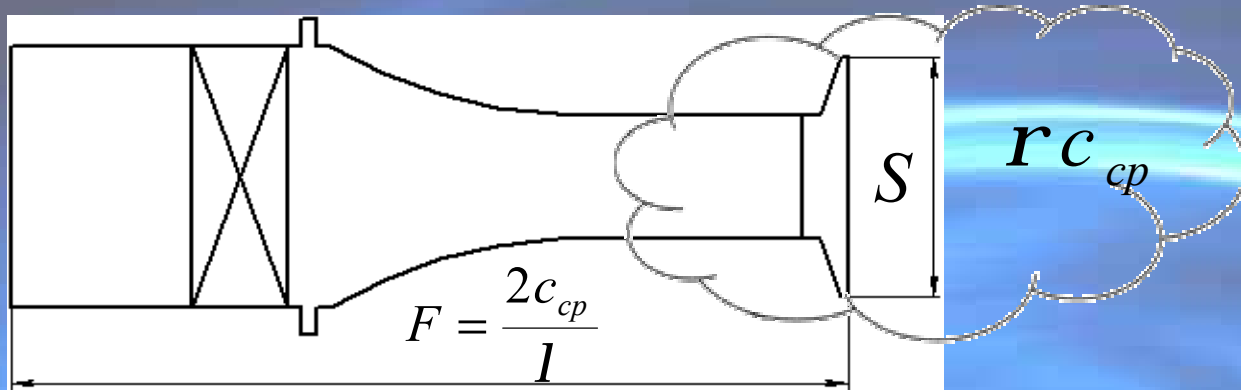
Кавитационный

Развитая кавитация



$F_{\text{генератора}} - ?$

Полуволновая колебательная система



$$\Delta F_1 = f(S, \rho c_{\text{среды}})$$

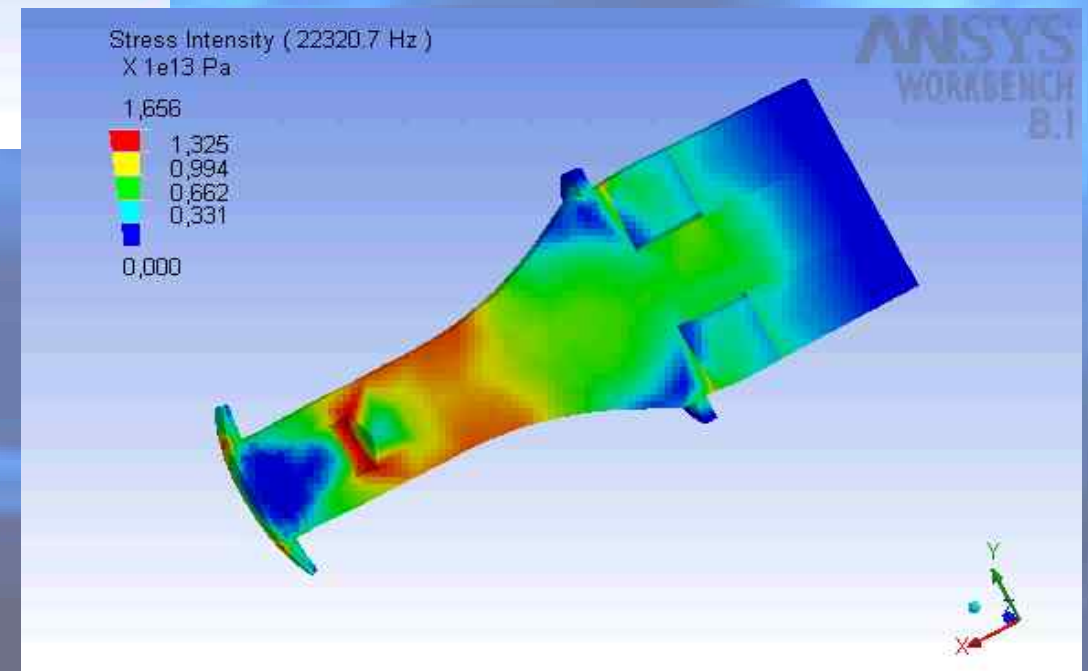
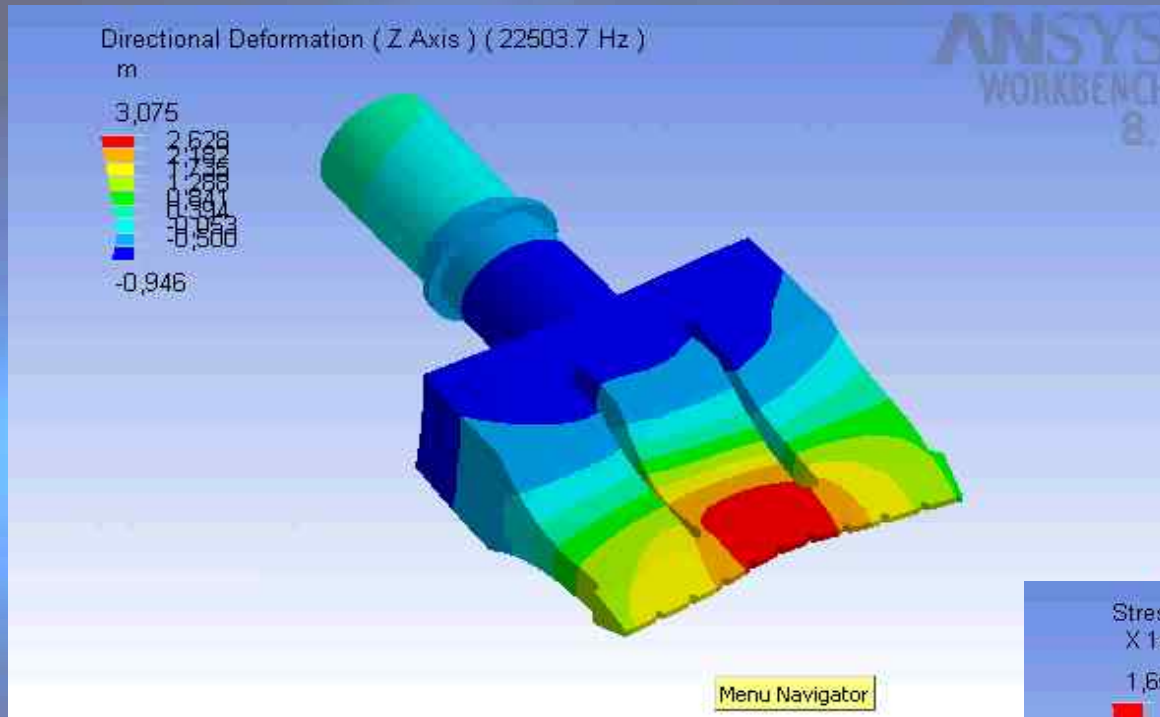
$$\Delta F_2 = f(T, U)$$

КПД $\leq 80\%$

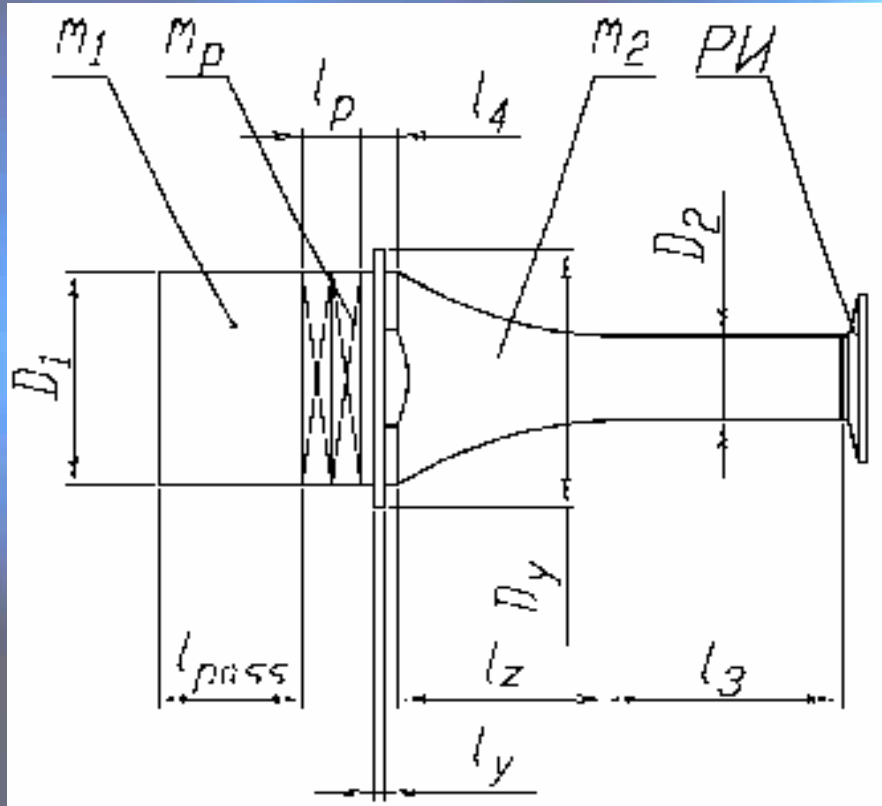
Амплитуда ≤ 100 мкм

Коэффициент усиления ≥ 20

Моделирование



ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ ПОЛУВОЛНОВОЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ



l_3 – длина цилиндрического участка диаметром D_2 (материал m_2)

l_4 – ширина узла крепления колебательной системы в корпусе

D_y – диаметр пояска крепления

l_y – ширина пояска крепления

l_{pass} – длина отражающей пассивной накладки (материал m_1) диаметром D_1

l_p – толщина пакета пьезоэлектрических элементов (материал m_p)

l_z – длина участка с плавным переходом

РИ – сменный рабочий инструмент

МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Исходные данные, необходимые для реализации ТП:

объемная акустическая энергия P , интенсивность I , частота f

1) расчет площади излучающей поверхности $S=P/I$, определение диаметров цилиндрических участков D_1 , D_2 , выбор материалов составляющих колебательной системы c_1, c_2, c_p

2) расчет длин основных участков по исходным данным и выбранным материалам

$$l_1 = n_1 [c_1 / f - 2l_p (c_1 / c_p + 1)] \quad l_z = c_2 / f \cdot \ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right) \quad l_2 = n_2 c_2 / f$$

3) расчет геометрических размеров узла крепления колебательной системы в корпус технологического объема

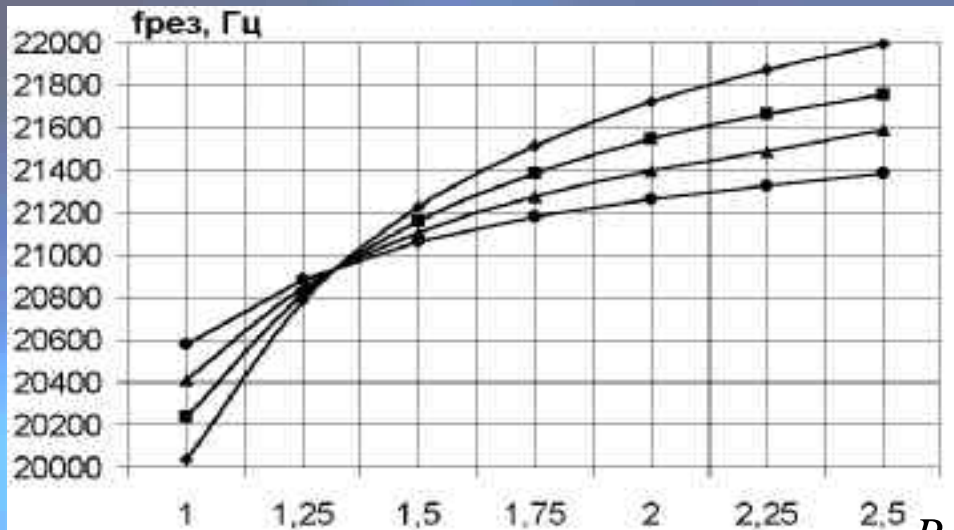
$$l_y^{\text{э}} = \frac{D_y^2 \cdot l_y}{D_1^2} \quad l_{\text{pass}}^{\text{э}} = l_1 - (l_4 - l_y + l_y^{\text{э}}), \quad l_{\text{pass}} = \frac{l_{\text{pass}}^{\text{э}} \cdot c_2}{c_1}$$

4) расчет выходного участка концентратора с учетом рабочего инструмента

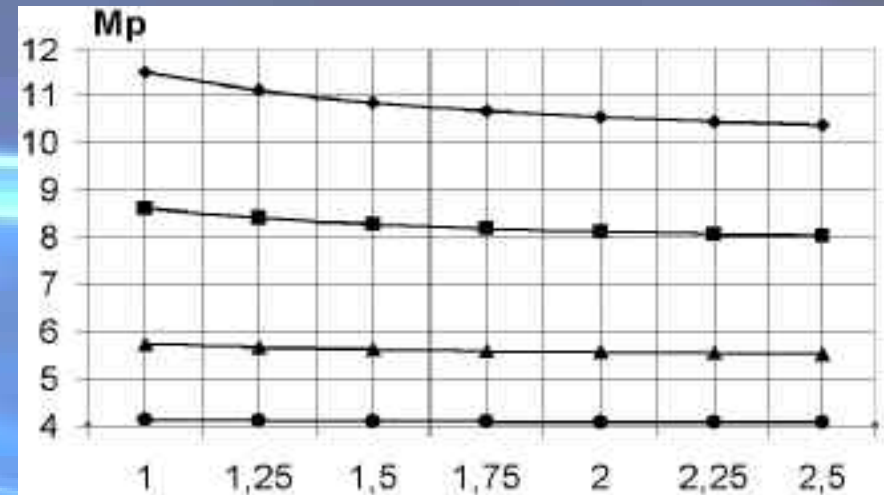
$$l_3 = l_2 - \frac{4V}{p \cdot K_{\text{изг}} \cdot D_2^2}$$

Возможно рассчитать любую ультразвуковую колебательную систему по исходным данным

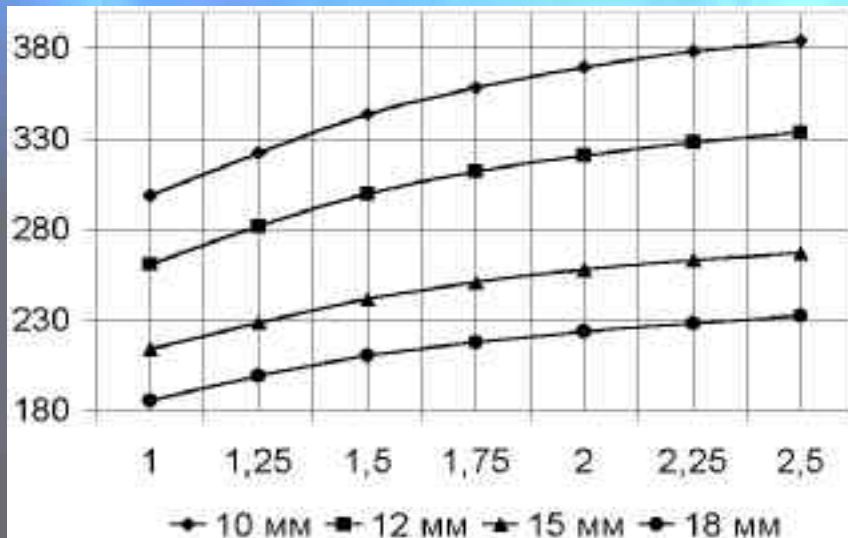
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ



Зависимость резонансной частоты от R/R_0



Зависимость коэффициента усиления колебаний от R/R_0

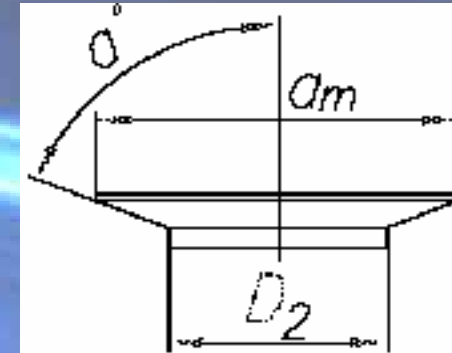
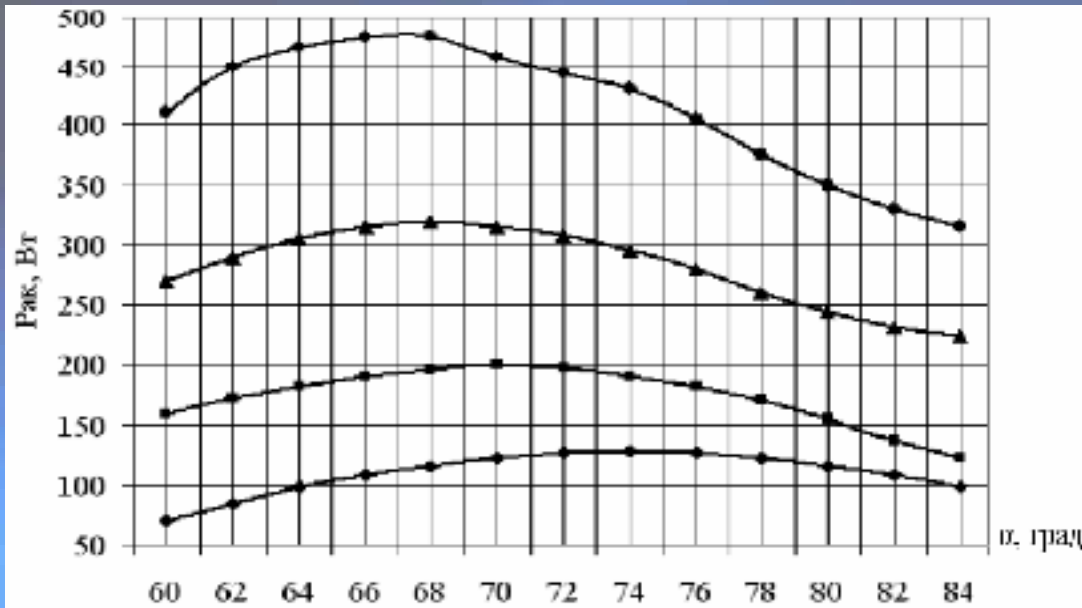


Зависимость механических напряжений от R/R_0

Результаты моделирования позволили заменить экспоненциальный переход на радиальный. Оптимальный радиус составляет $1,1-1,2R_0$, где

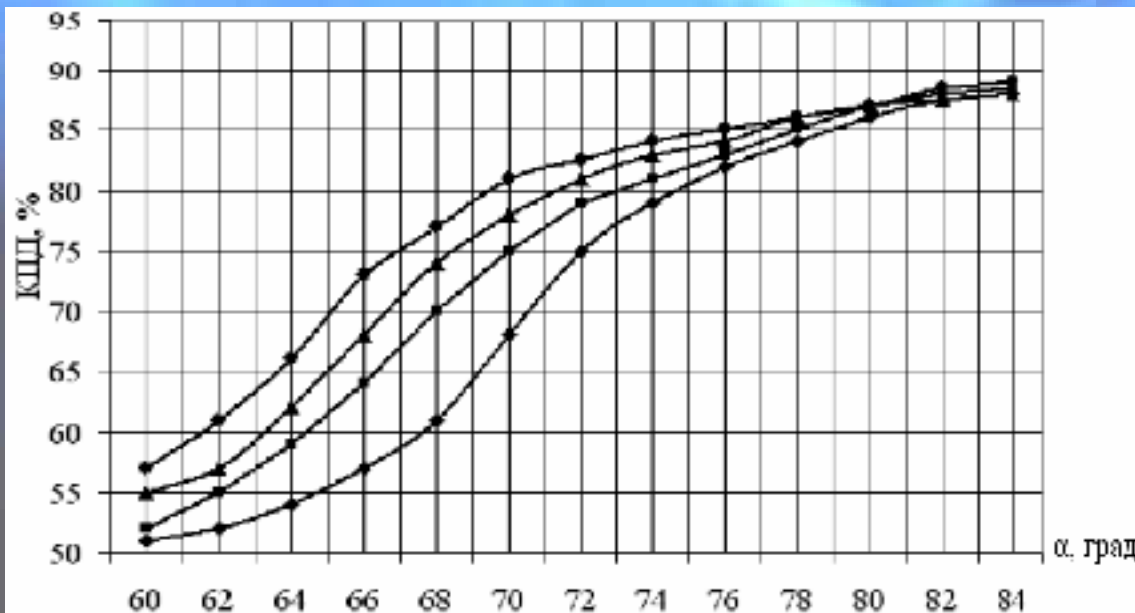
$$R_0 = \frac{4l_z^2 + (D_1 - D_2)^2}{4(D_1 - D_2)}$$

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ГРИБОВИДНЫХ РАБОЧИХ ИНСТРУМЕНТОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ



Конструкция рабочего инструмента

$$\frac{a_m}{D_2} \leq (1,5 \div 1,8)$$



Критерий оптимальности:

$$\max(P_{ак} \cdot КПД)$$

Зависимость $P_{ак}$ и КПД от угла α

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГРИБОВИДНЫХ РАБОЧИХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НАПРАВЛЕННЫХ КАВИТАЦИОННЫХ ПОТОКОВ

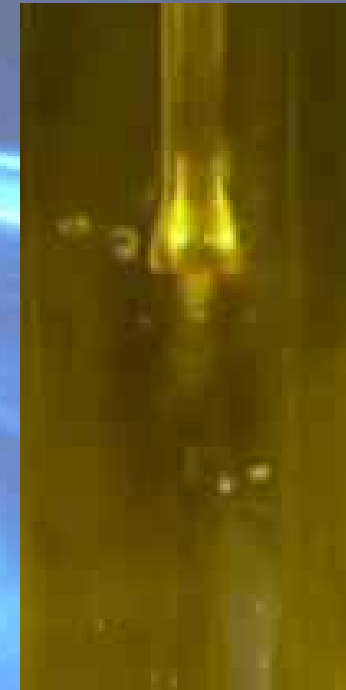
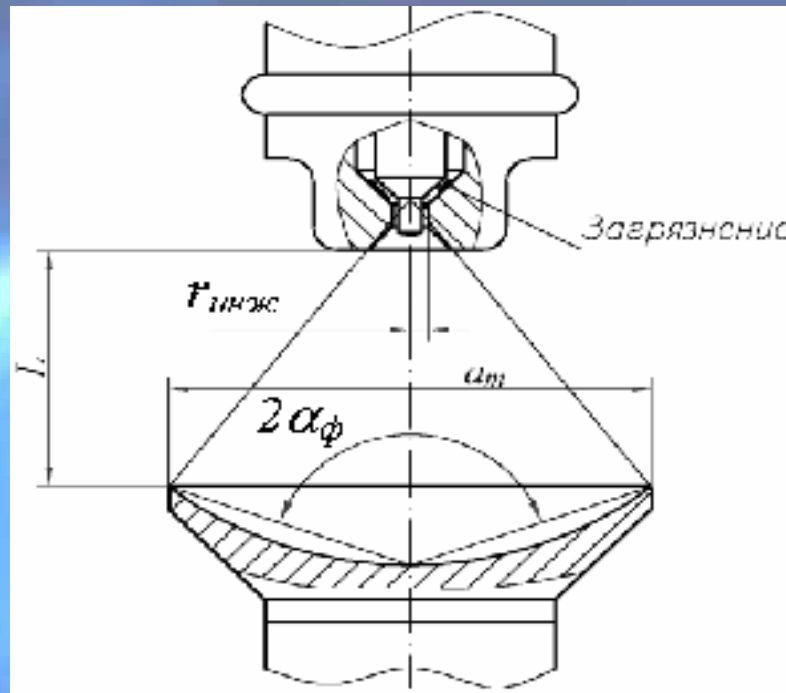


Схема ультразвукового технологического оборудования для высокоамплитудной очистки

$$L = \left(r_{инж} - \frac{a_m}{2} \right) \cdot ctg 2\alpha_\phi, \quad 90^\circ < 2\alpha_\phi < 180^\circ$$

Патент РФ №2243039

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ АКТИВНЫХ СТУПЕНЧАТО-РАДИАЛЬНЫХ РАБОЧИХ ИНСТРУМЕНТОВ

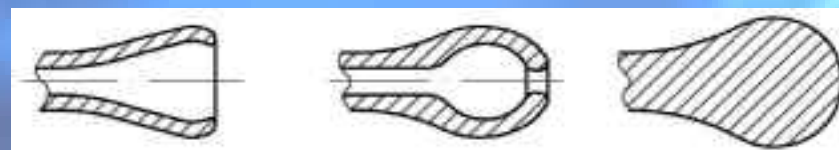


Ультразвуковой преобразователь

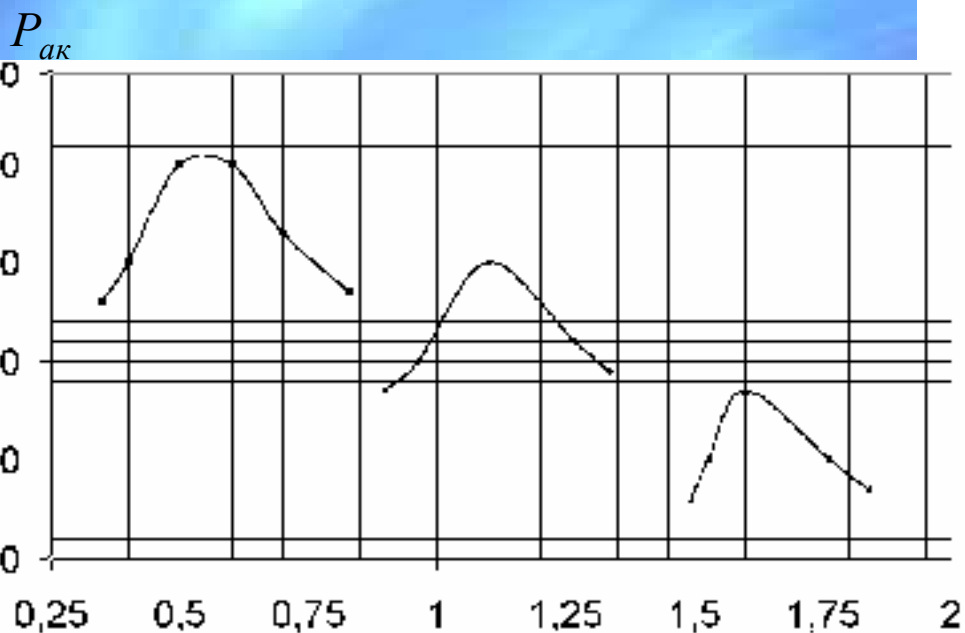


Внешний вид активных рабочих инструментов

Длины равны $1,6\lambda$, $1,1\lambda$, $0,55\lambda$



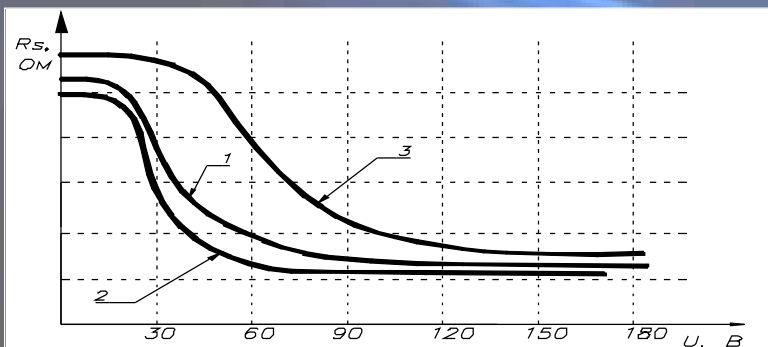
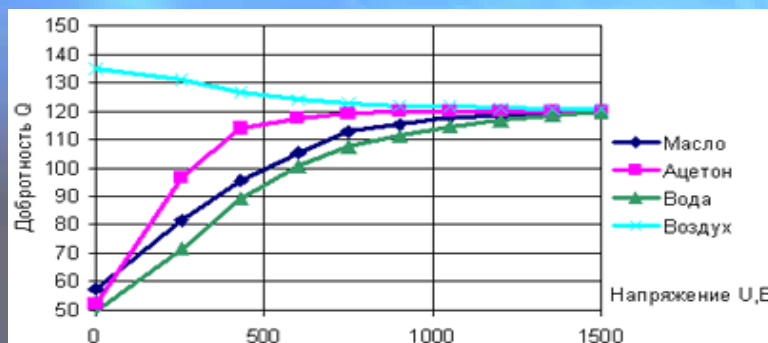
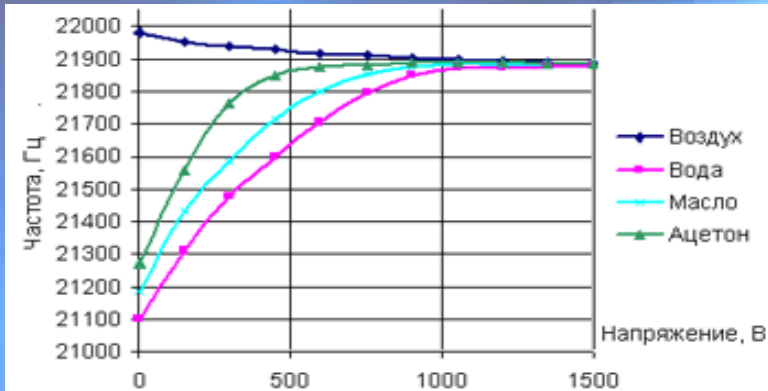
Различные излучающие окончания активных рабочих инструментов



Зависимость акустической мощности от частотного согласования преобразователя и рабочих инструментов

Патент РФ №2239383

Исследование влияния сред. Необходимость определения реальных диапазонов перестройки генераторов

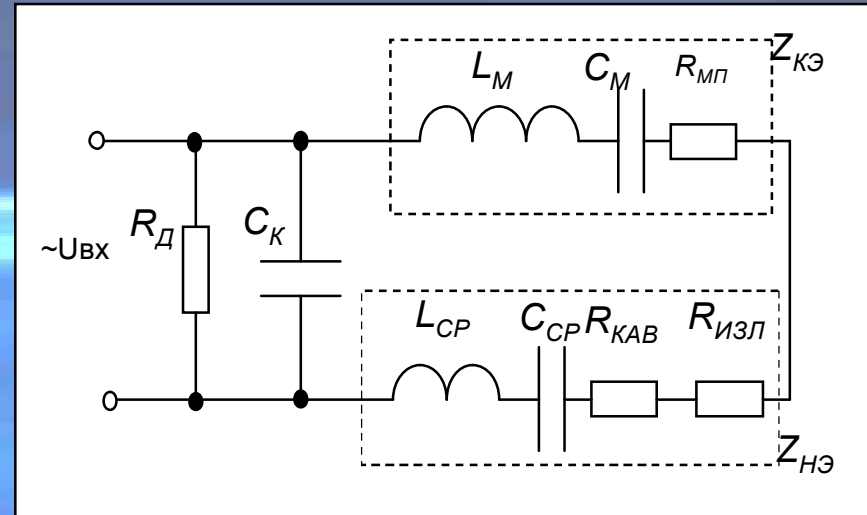


1. Определение диапазона перестройки частоты ΔF
2. Определение диапазона перестройки источника напряжения для стабилизации амплитуды
3. Определение режимов степени развития кавитации
4. Определение критериев настройки
5. Выбор и разработка способов и устройств настройки и управления

$$\Delta F = f(S, \rho c_{\text{среды}}, U), [-3,5 \text{ кГц}]$$

$$\Delta U = f(\rho c, S, U), [20..300 \text{ В}]$$

Эквивалентная электрическая схема замещения УЗКС



R_d – сопротивление диэлектрических потерь;

C_k – емкость пьезокерамических элементов;

$R_{мп}$ – сопротивление механических потерь;

C_m – эквивалент упругости материала колебательной системы;

L_m – эквивалент массы материала колебательной системы;

$C_{ср}$, $L_{ср}$ – элементы, характеризующие реактивные свойства обрабатываемой среды;

$R_{изл}$ – элемент характеризующий волновое сопротивление среды;

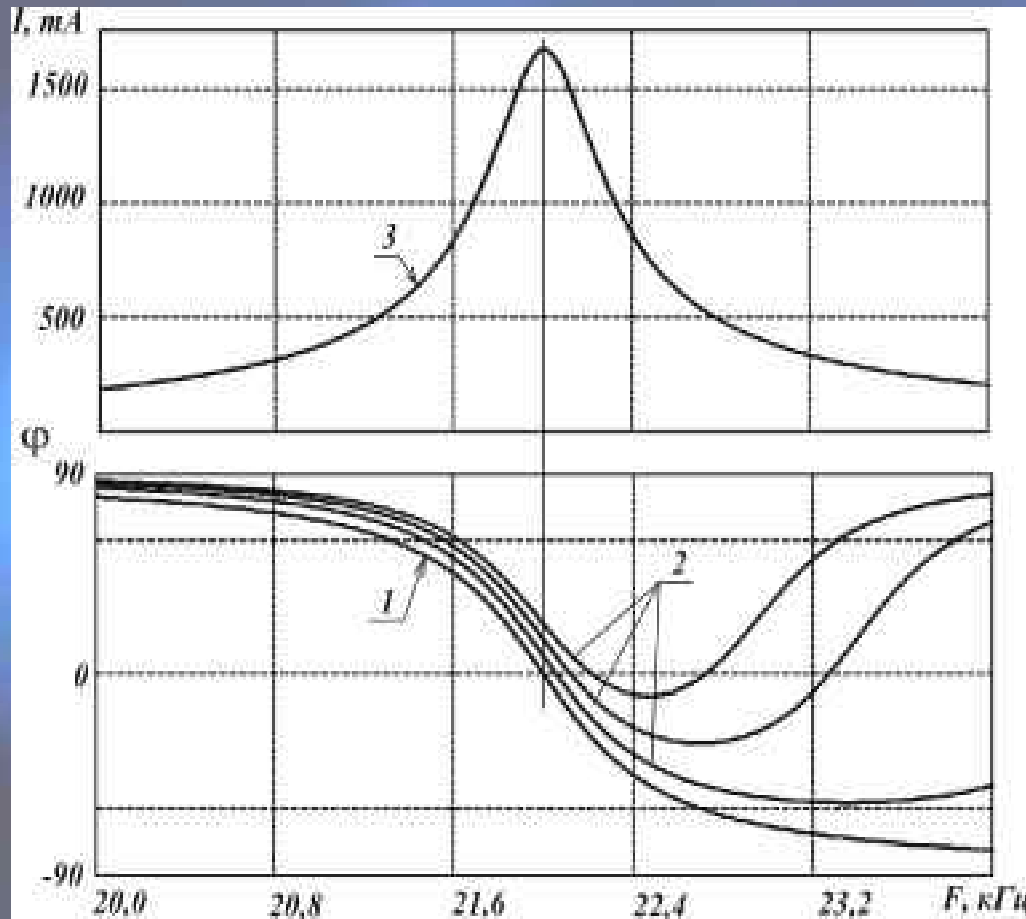
$R_{кав}$ – элемент отражающий затраты энергии на развитие и поддержание кавитации;

$Z_{кэ}$ – собственный импеданс колебательной системы;

$Z_{нэ}$ – импеданс акустической нагрузки.

На основе предложенной электрической эквивалентной схемы УЗКС получены зависимости ее электрических параметров, от характеристик акустической нагрузки и собственных свойств.

Влияние электрической емкости пьезокерамических элементов ультразвуковой колебательной системы на ее частотные электрические характеристики



Частотные характеристики, полученные при различных значениях электрической емкости пьезокерамических элементов:

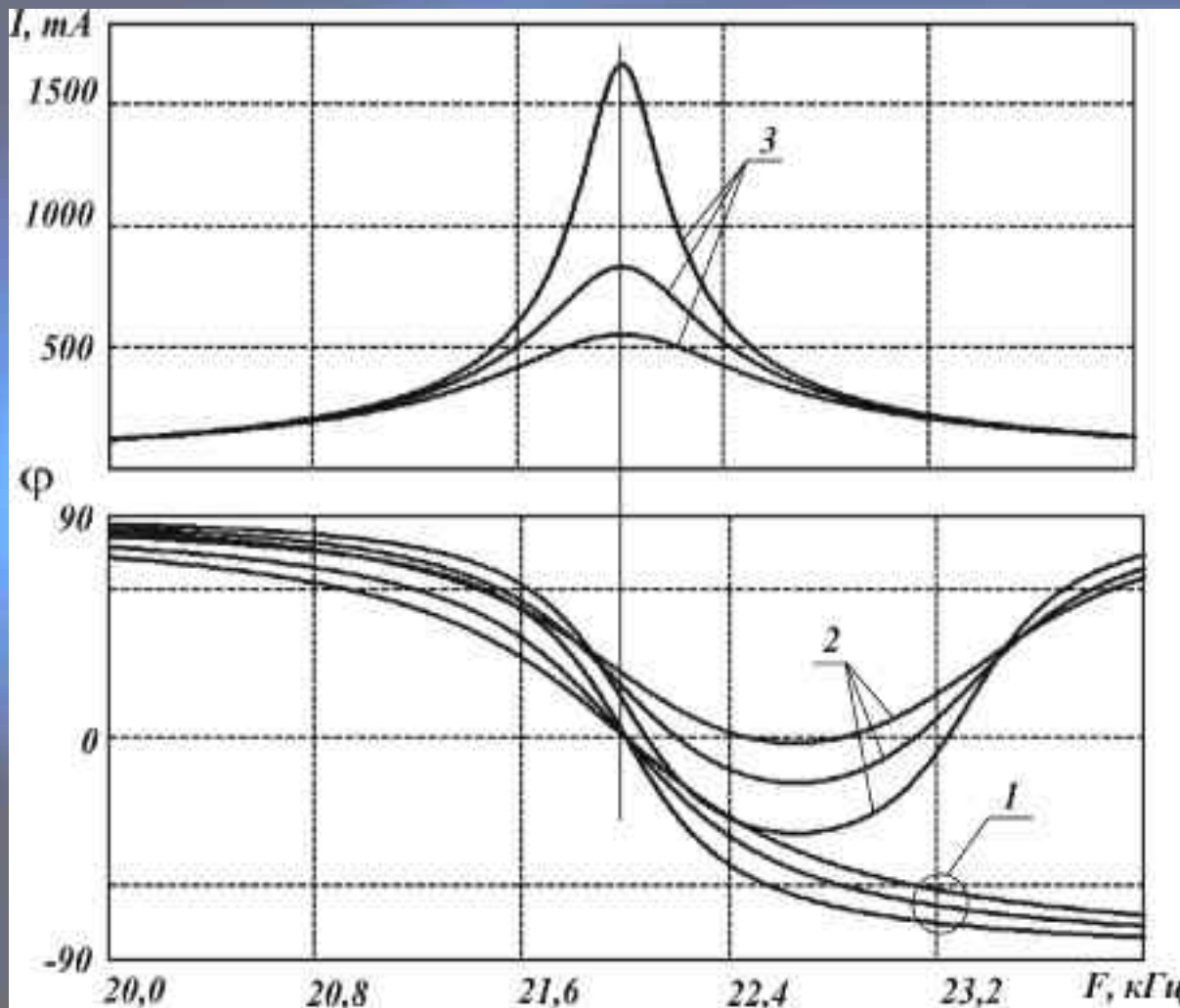
1 – ФЧХ тока механической ветви колебательной системы;

2- ФЧХ тока, потребляемого колебательной системой от электронного генератора;

3 – АЧХ тока механической ветви колебательной системы.

Использование в качестве критерия настройки ультразвукового генератора на резонансную частоту колебательной системы условия равенства нулю ФЧХ тока, потребляемого от электронного генератора, не обеспечивает точной настройки и зависит емкости пьезокерамических элементов.

Влияние акустической нагрузки на частотные характеристики электрических параметров колебательных систем



Частотные характеристики, полученные при различных значениях акустической нагрузки:

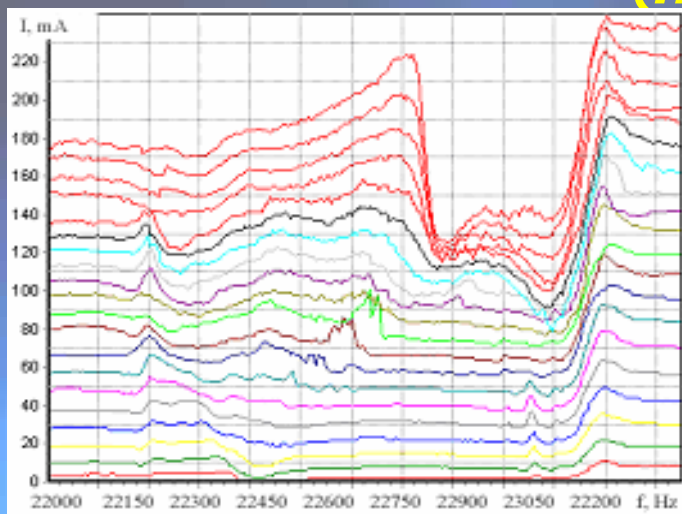
1 – ФЧХ тока механической ветви колебательной системы;

2 – ФЧХ тока, потребляемого колебательной системой от электронного генератора;

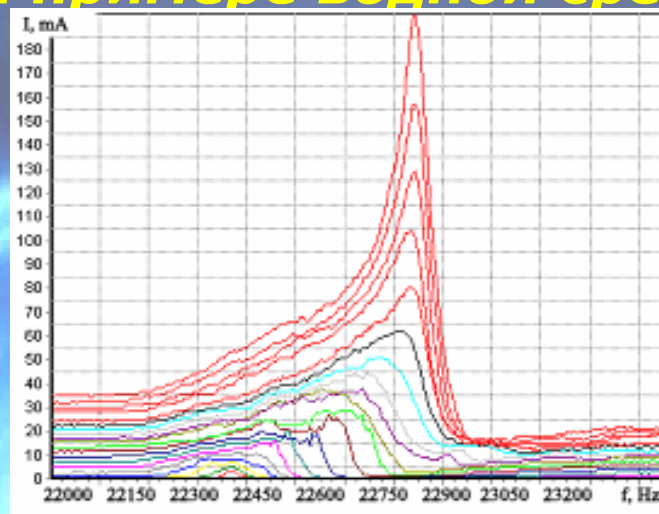
3 – АЧХ тока механической ветви колебательной системы.

Использование в качестве критерия настройки ультразвукового генератора на резонансную частоту колебательной системы условия равенства нулю ФЧХ тока, потребляемого от электронного генератора, не обеспечивает точной настройки и зависит от величины акустической нагрузки.

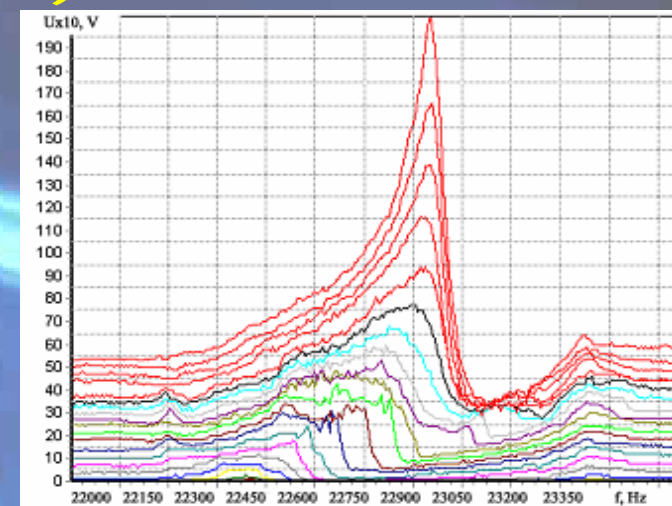
Результаты измерений электрических параметров УЗКС при различных условиях УЗ воздействия на технологические среды (на примере водной среды)



а)



б)

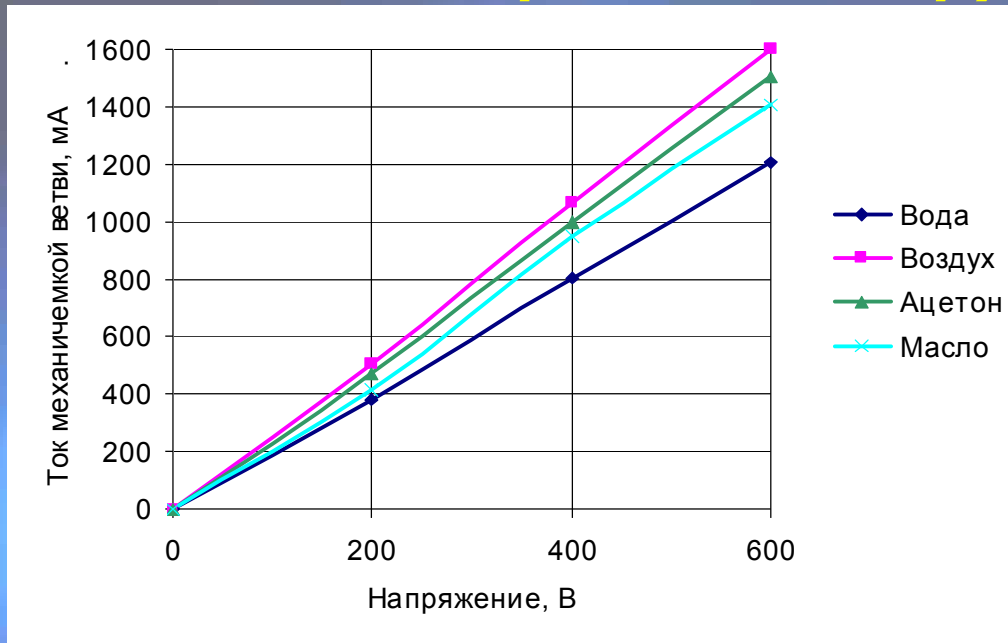


в)

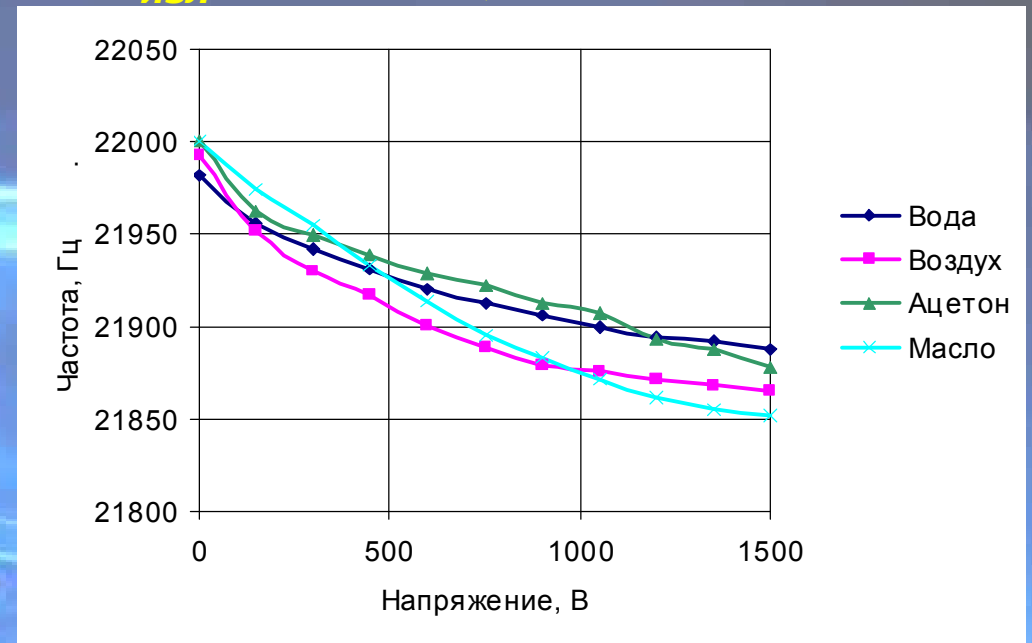
- а) АЧХ тока, потребляемого колебательной системой от ультразвукового генератора;
- б) АЧХ тока, механической ветви колебательной системы;
- в) АЧХ напряжения питания колебательной системы.

Аналогичные данные были получены для всех исследуемых технологических сред (воздушная среда, ацетон, индустриальное масло) при использовании различных рабочих инструментов.

Изменение параметров колебательной системы при ультразвуковом воздействии на различные технологические среды (цилиндрический рабочий инструмент $S_{изл} = 1,7\text{см}^2$)



а)



б)

$$S_{изл} = S_{волн}, \text{ где}$$

$S_{изл}$ – площадь излучающей поверхности рабочего инструмента;

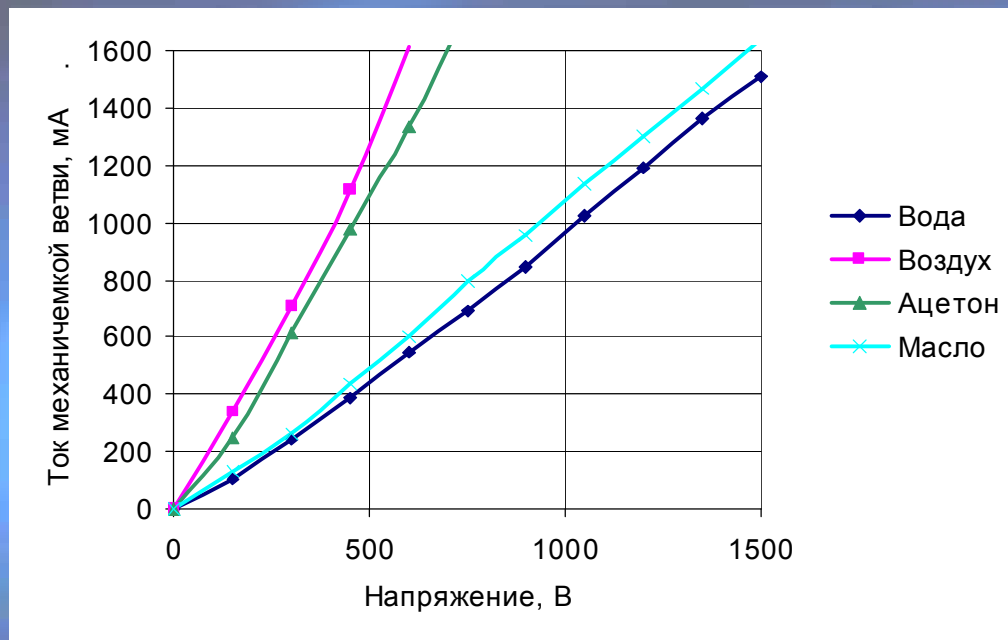
$S_{волн}$ – площадь сечения волновода (концентратора).

а) зависимость тока механической ветви от напряжения питания УЗКС;

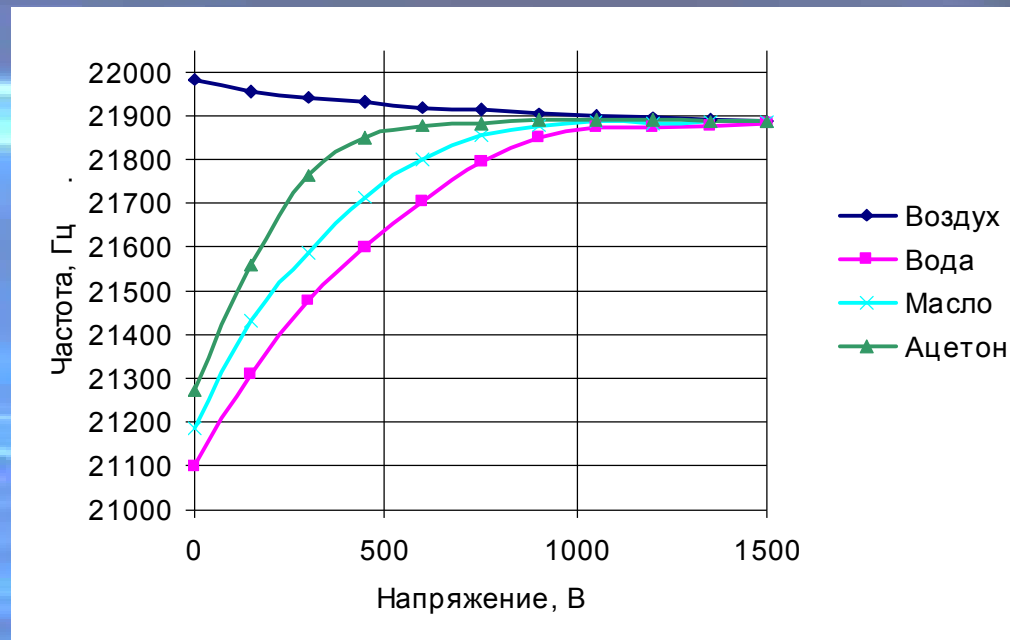
б) зависимость резонансной частоты УЗКС от напряжения ее питания.

При ультразвуковом воздействии с использованием малых поверхностей излучения наблюдаются незначительные изменения параметров колебательных систем при обработке различных технологических сред.

Изменение параметров колебательной системы при ультразвуковом воздействии на различные технологические среды (грибовидный рабочий инструмент $S_{изл} = 3,2 \text{ см}^2$)



а)



б)

$S_{изл}$ – площадь рабочего инструмента.

а) зависимость тока механической ветви от напряжения питания УЗКС;

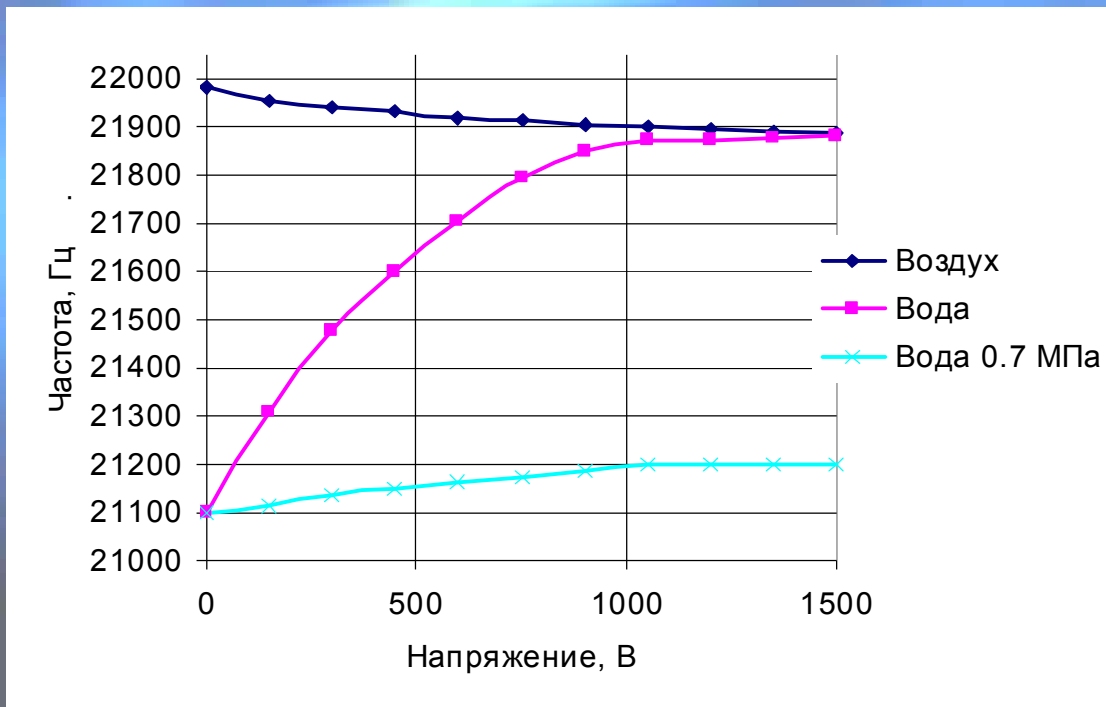
б) зависимость резонансной частоты УЗКС от напряжения ее питания.

При ультразвуковом воздействии с использованием развитых поверхностей излучения наблюдаются существенные изменения параметров колебательных систем при обработке различных технологических сред.

Аналогичные зависимости были получены при $S_{изл} = 3,2 \text{ см}^2$; $S_{изл} = 5,37 \text{ см}^2$; $S_{изл} = 11 \text{ см}^2$; $S_{изл} = 18 \text{ см}^2$

Изменение резонансной частоты колебательной системы при ультразвуковом воздействии на водную среду при нормальном и избыточном давлениях (грибовидный рабочий инструмент $S_{изл} = 3,2 \text{ см}^2$)

Зависимости резонансной частоты колебательной системы от напряжения питания при разных условиях излучения



Изменение резонансной частоты колебательной системы связано с уменьшением присоединенной массы среды в следствии ее насыщения парогазовыми пузырьками по мере развития в ней кавитации.

При избыточном давлении кавитация не возникает (при прочих равных условиях), в следствии чего изменения резонансной частоты УЗКС не происходит.

Зависимость резонансной частоты УЗКС от кавитационного состояния обрабатываемой среды может быть использована для контроля режима кавитационного воздействия.

Методика определения основных параметров ультразвуковых электронных генераторов (запас электрической мощности)

1. Определяется резонансный радиус ПГ:

$$R_{MAX} = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}}$$

$$q = -\frac{3gs}{2p^2 r_{ж} f^2}$$

$$p = -\frac{P_0 3g}{4p^2 r_{ж} f^2}$$

2. Определяется средний размер резонансных пузырьков:

$$\bar{R}_{MAX} = \frac{R_{MAX}}{2}$$

3. Определяется радиус пузырька для $0 < K < 1$:

$$R = \sqrt[3]{K \bar{R}_{MAX}^3}$$

4. Определяется амплитудное и среднее значение звукового давления:

$$P_M = P_0 - P_{II} + \frac{2s}{R} - (P_0 - P_{II} + \frac{2s}{R_0}) \frac{R_0^3}{R^3}$$

$$\bar{P}_M = \frac{P_M}{\sqrt{2}}$$

5. Определяется интенсивность ультразвука:

$$I = \frac{\bar{P}_M^2}{2r_{ж} c_{ж}}$$

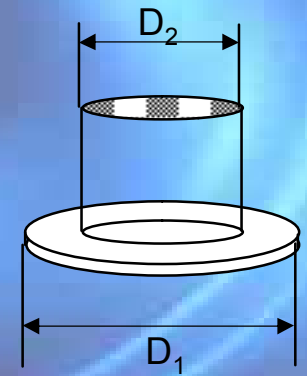
6. Определяется акустическая мощность с учетом площади излучения:

$$P_{AK} = I \left(\frac{\pi D_1^2}{2} - \frac{\pi D_2^2}{4} \right)$$

7. Определяются электрическая мощность с учетом КПД колебательной системы:

$$P_{эл} = P_{AK} h_{ЭА}$$

Эскиз грибовидного рабочего инструмента



Методика определения основных параметров ультразвуковых электронных генераторов (диапазон перестройки частоты). Продолжение

1. Определяется резонансный размер колебательной системы:

$$l_1 = \frac{c_{УЗКС}}{2f}$$

2. Определяется масса присоединенной жидкости к излучающей поверхности:

$$m = \left(\frac{\rho D_1^2}{2} - \frac{\rho D_2^2}{4} \right) h r_{ж}$$

3. Определяется длина эквивалента присоединенной массы из материала колебательной системы равная массе присоединенной жидкой среды:

$$\Delta l = \frac{4m}{r_{УЗКС} \rho D_2^2}$$

4. Определяется частота колебательной системы с эквивалентной присоединенной массой:

$$f_1 = \frac{c_{УЗКС}}{2(l + \Delta l)}$$

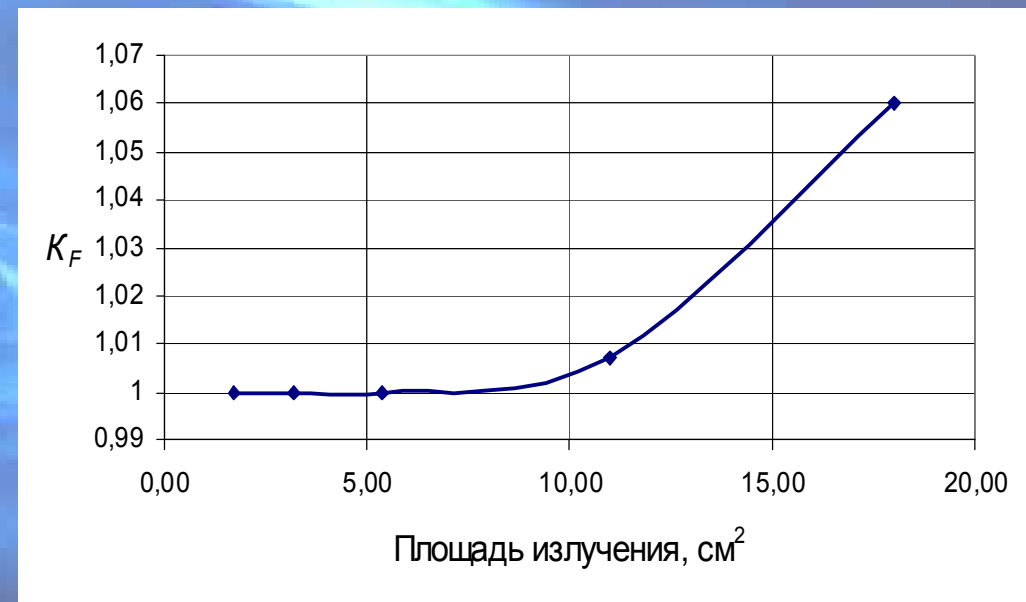
5. Выполняется корректировка частоты при помощи коэффициента K_F :

$$\bar{f}_1 = K_F \frac{c_{УЗКС}}{2(l + \Delta l)}$$

6. Определяется диапазон изменения резонансной частоты колебательной системы:

$$\Delta f = f - \bar{f}_1$$

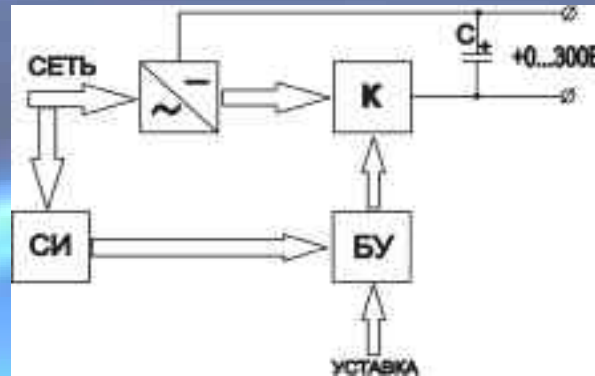
Зависимость коэффициента K_F от площади поверхности излучения



Принципиальные схемные решения



Система стабилизации частоты



Система стабилизации амплитуды

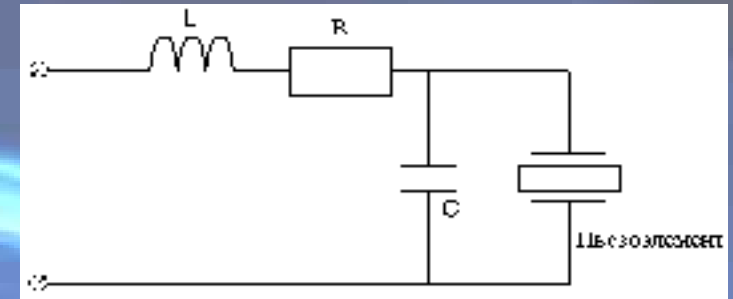
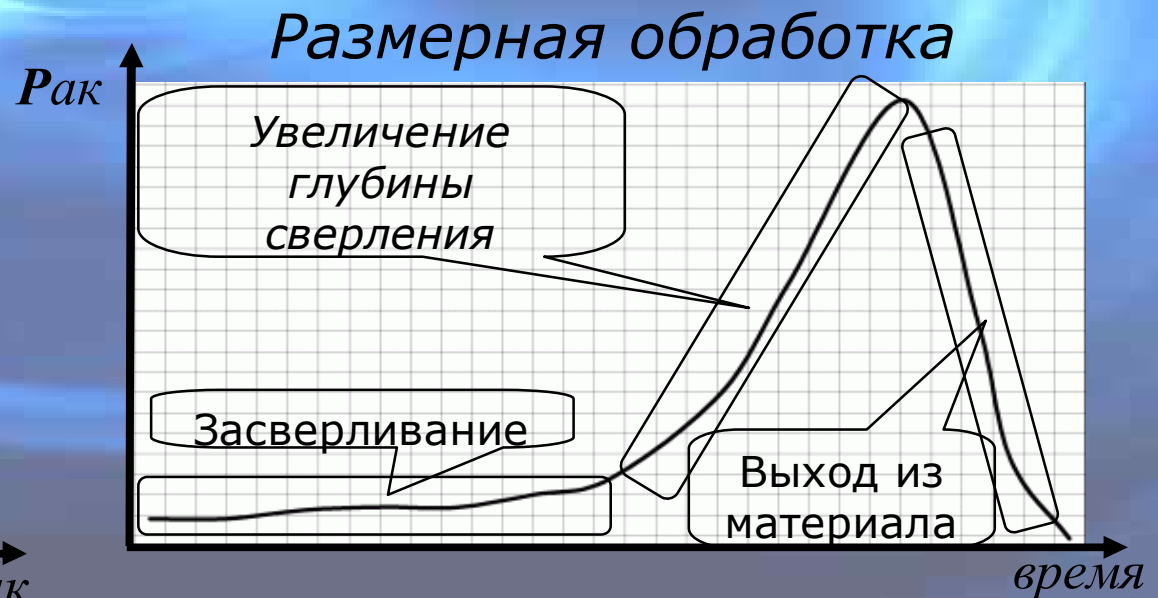
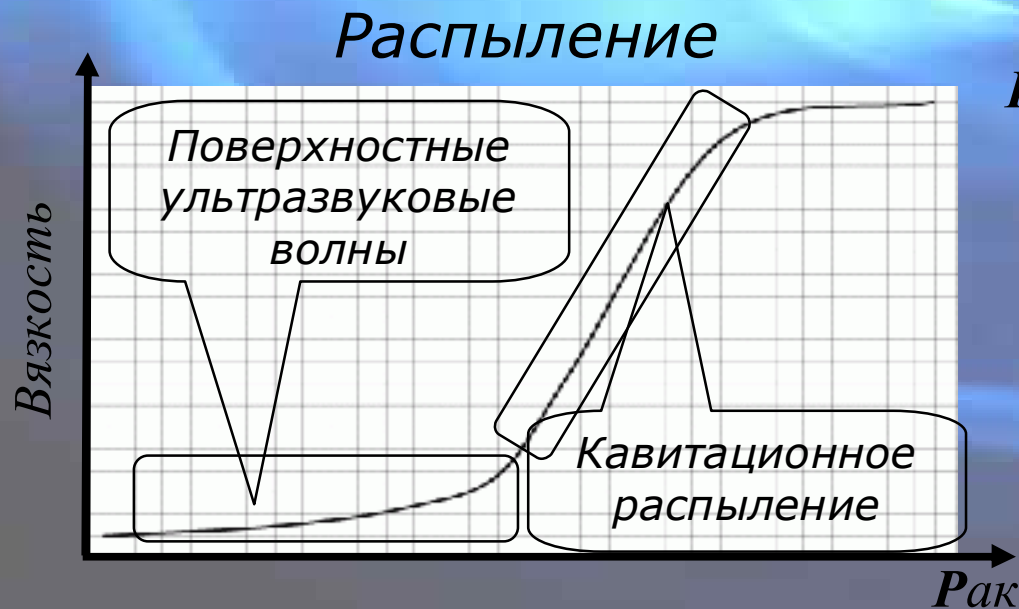
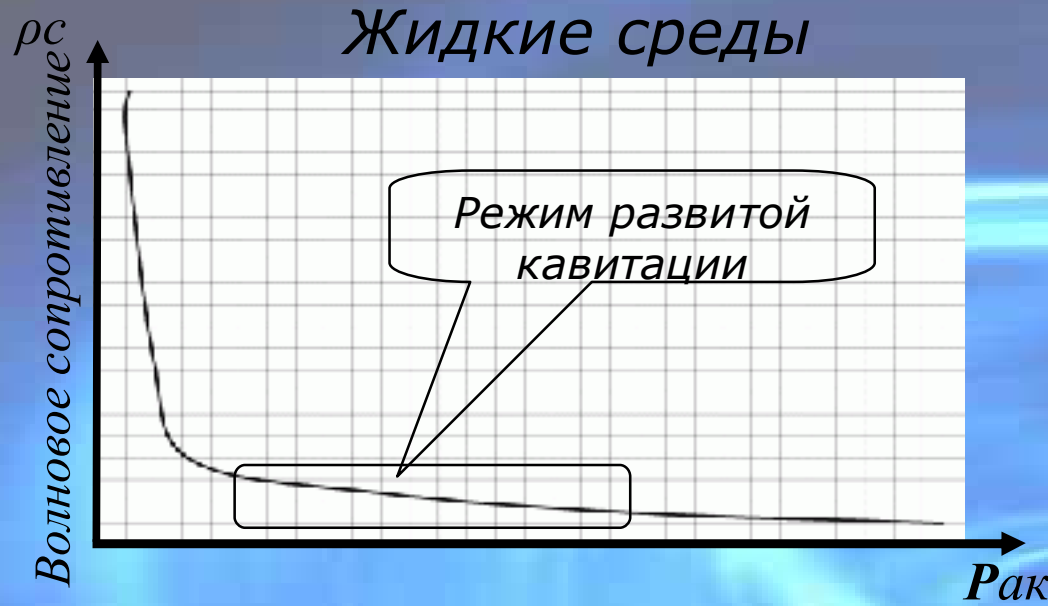


Схема согласующего звена



1-источник питания, 2- электронный блок генератора, 3-блок управления, 4- согласующее устройство, 5- ультразвуковая колебательная система; 6-рабочий инструмент

Способы управления процессом



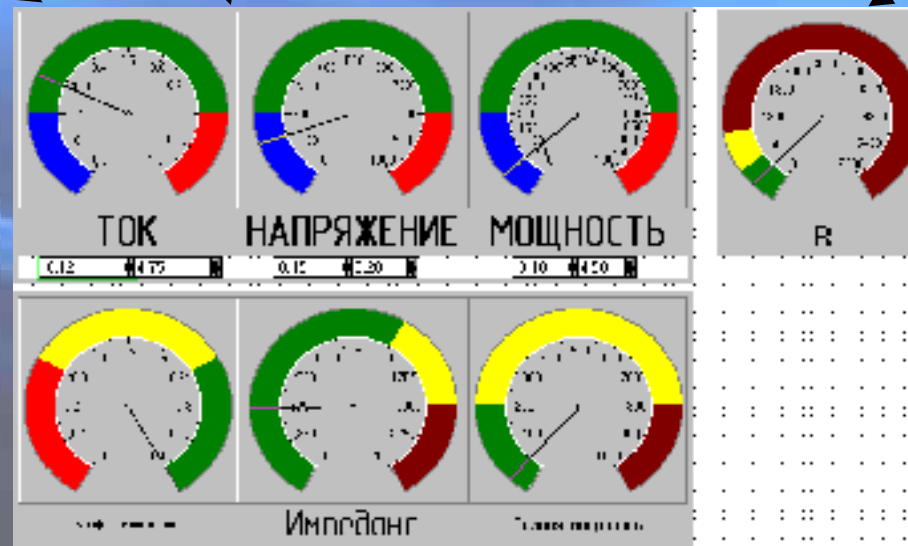
Контрольно-измерительная аппаратура

Измерение
электрической
мощности

Измерение
акустической
мощности

Контроль
амплитуды
колебаний

Контроль
состояния
среды



Разработки

Многофункциональные аппараты



Размерная обработка



Сварка



Медицина



Достижения

Награды

1. Премия Алтайского края в области науки и техники за 2004 год
2. Награды международных и всероссийских конференций и выставок



Востребованность



1. LG Electronic
2. SUDO Premium Engeniring LTD
3. ToMetric AG
4. ГНЦ ВБ «Вектор»
5. "Спортивный клуб "Сатурн"



Наука

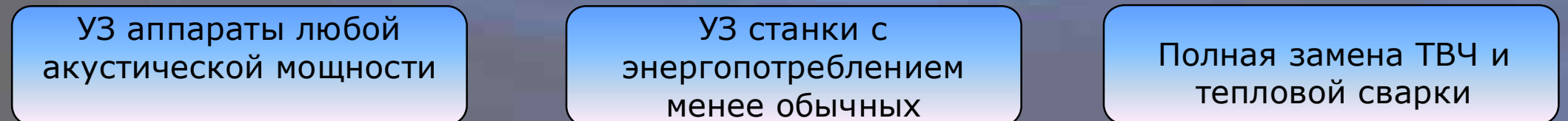
1. Более 130 статей за 10 лет
2. 14 патентов Российской федерации и 5 международных патентов
3. 200 типов ультразвуковых аппаратов



Перспективы



2010 год



Перспективы



2010 год

