

Центр ультразвуковых технологий

**Пьезоэлектрические
излучатели для создания
ультразвуковых колебаний**

www.u-sonic.ru, www.u-sonic.com

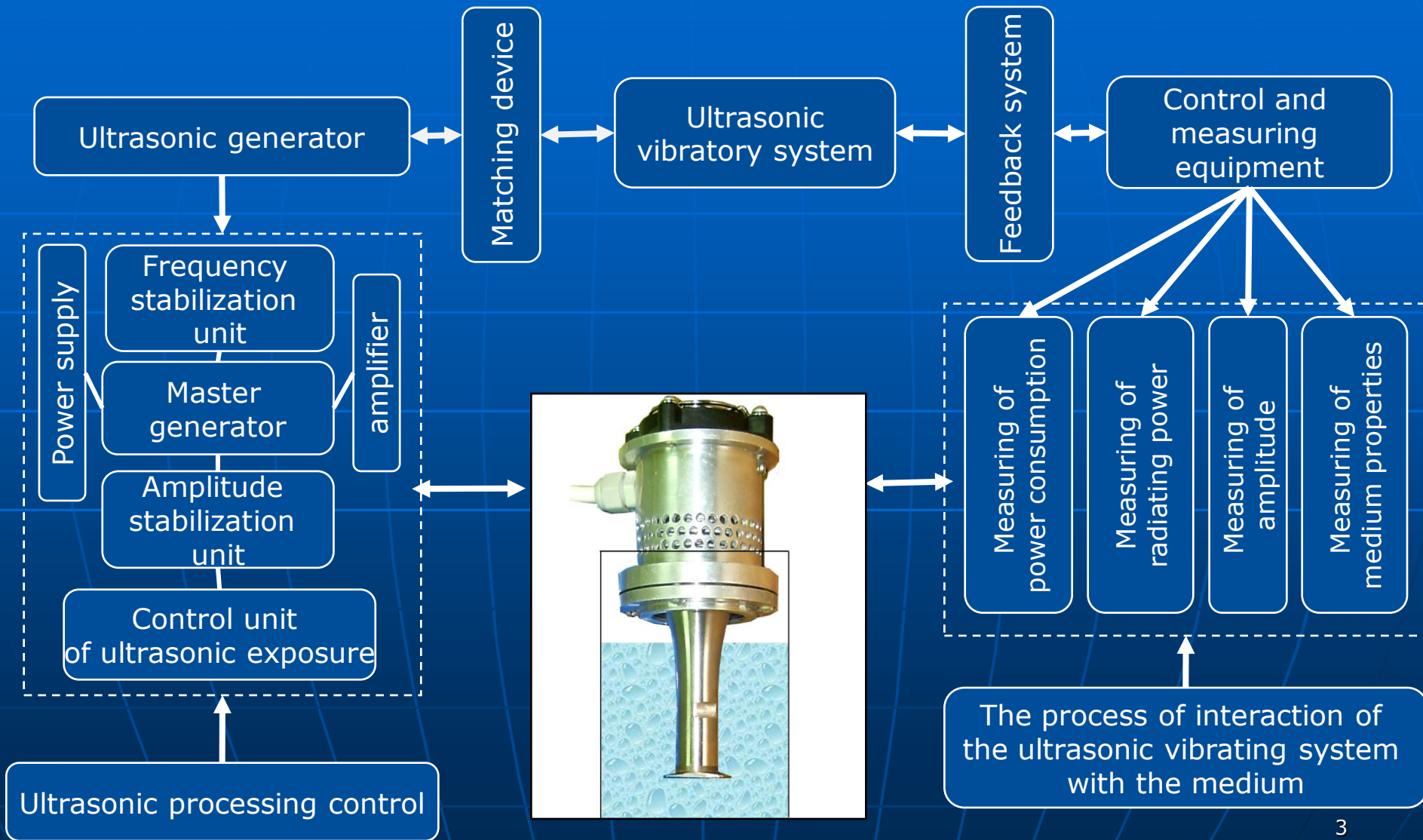
Khmelev Vladimir Nikolaevich



Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Inventor of the Russian Federation, Senior Member IEEE. Laureate of the Russian Government Award in the field of science and technology, author of more than 900 scientific publications (including more than 100 patents, more than 20 monographs and textbooks), Deputy Director for Scientific Work of the Biysk Technological Institute of the Altai State Technical University.

+7 9039925120
vnh@u-sonic.ru

Ultrasonic industrial device



Work of ultrasonic device



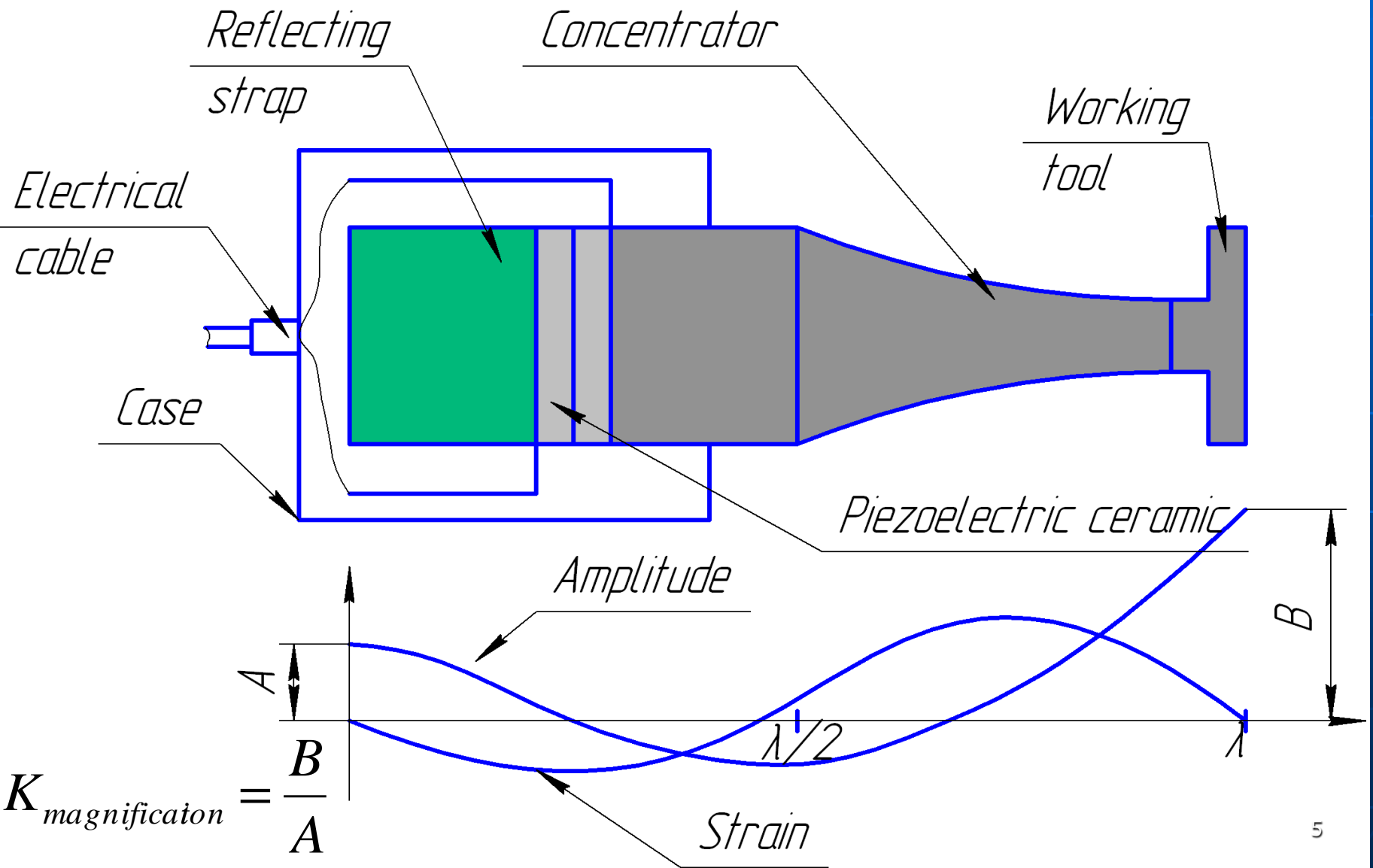
When using modern ultrasonic devices, the simultaneous volume of the processed liquid is:

$$V_{\max} \leq 6\pi \cdot h \text{ cm}^3 = 18,8 \cdot h \text{ cm}^3$$

$h = 0,1..10$ cm depend on liquid viscosity.

$$V_{\max} \leq 2...200 \text{ cm}^3$$

Ultrasonic oscillation system



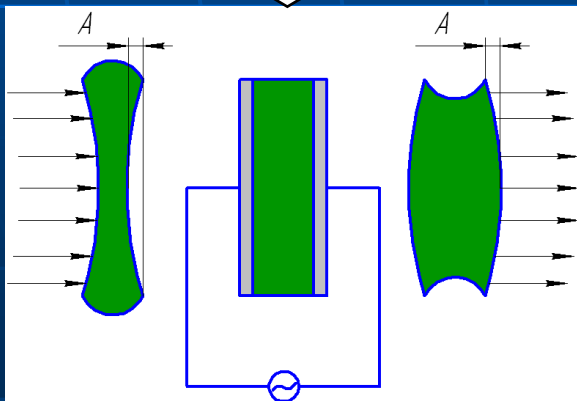
Piezoelectric transducers

Piezoelectric effect

Polarization of a dielectric at squeezing



Inverse piezoelectric effect



Piezoelectric materials



Natural quartz
1000V- 1 μ m/cm

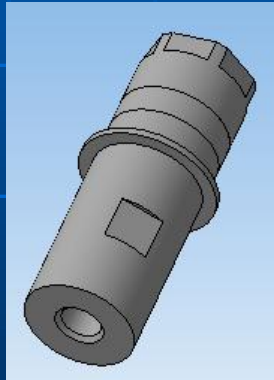
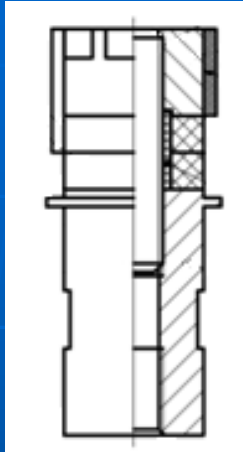


Synthetic piezoelectric materials
1000V-50 μ m/cm
Zirconate - titanate of plumbum
PZT-5, PZT-8
(ZTP-23), APC-841

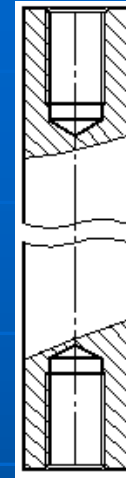
Piezoelectric elements



Составные части УЗ колебательной системы



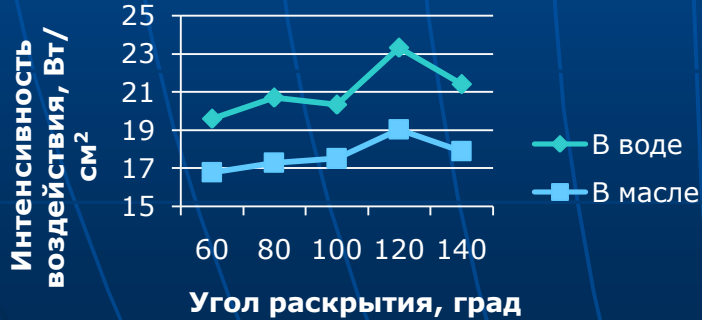
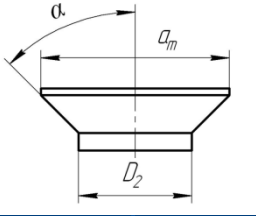
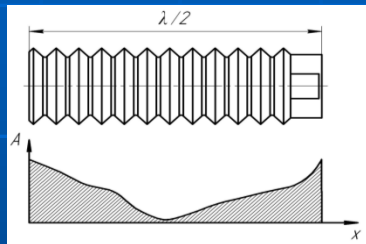
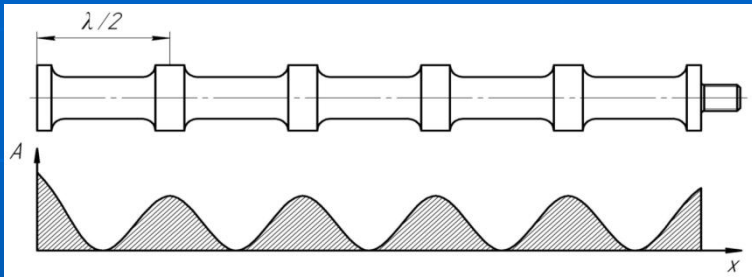
Пьезоэлектрический преобразователь



Волновод-проставка

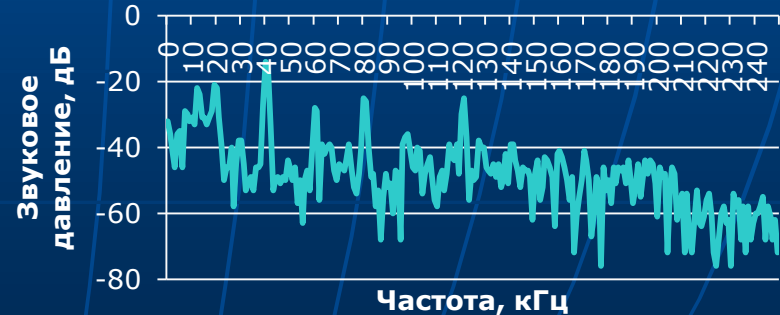
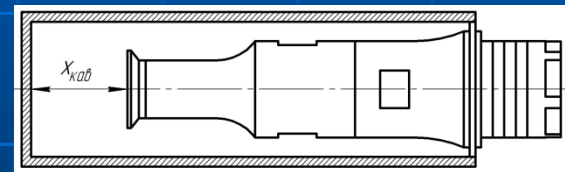
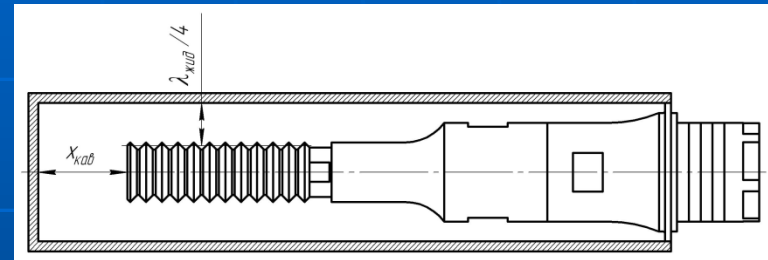
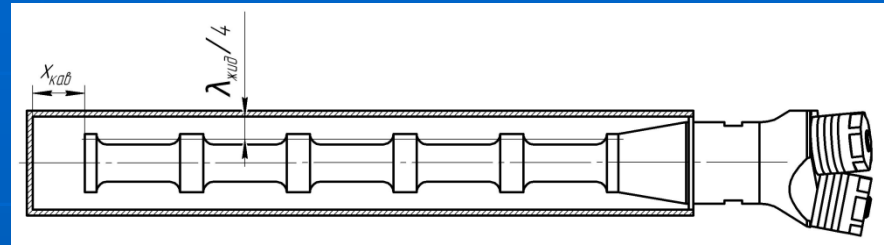
Ультразвуковые излучатели

Моночастотные УЗ излучатели



Зависимость интенсивности вводимых излучателем УЗ колебаний с грибовидным рабочим инструментом от угла раскрытия 2α

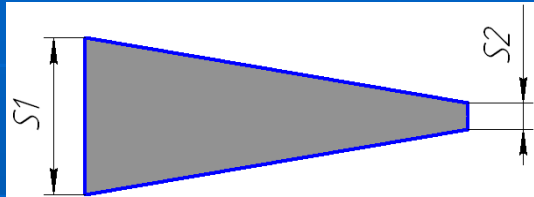
УЗ излучатели широкополосных колебаний



Амплитудно-частотная характеристика колебаний поверхности звукопроводящего объема

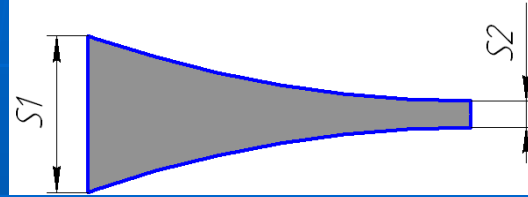
Magnifiers of ultrasonic oscillations

Conical



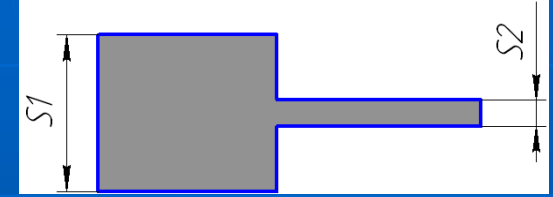
$$K = 0.8 \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} \quad Q = 40$$

Exponential



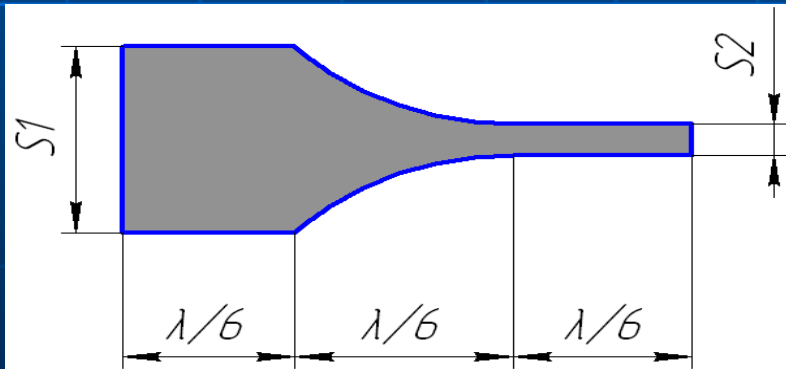
$$K = 1.1 \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} \quad Q = 20$$

Stepping



$$K = \frac{S_1}{S_2} \quad Q = 150$$

Stepping-exponential concentrator



$$K = (0.8 - 0.9) \frac{S_1}{S_2}$$



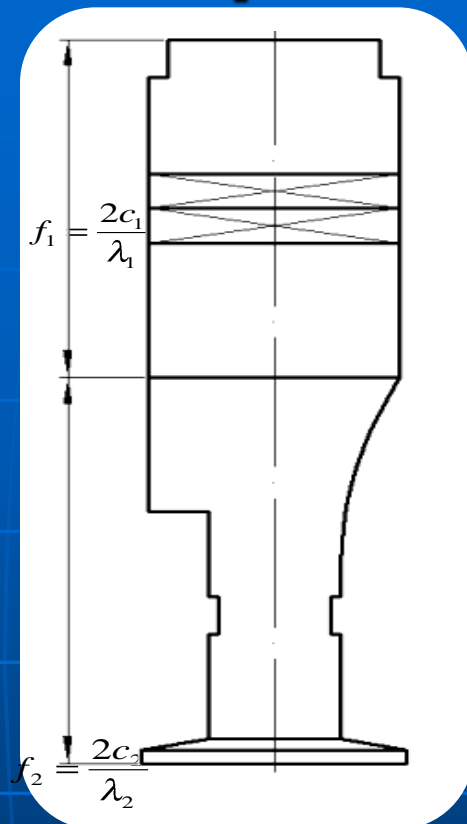
Влияние на параметры системы

Внешнее
воздействие

Нагрев металла
 $\Delta F \sim f(P_{ак})$

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

Влияние среды
(вязкость, дисперсность)



Конструктивное
воздействие

Тип керамики
 $\Delta F = f(c_{кер}, \theta)$

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

Площадь и форма
инструмента

Влияние
технологического
процесса

Режим воздействия

$F_{\text{генератора}} - ?$
($22 \pm 1,65$ кГц)

Докавитационный
23,65 кГц

Кавитационный
22 кГц

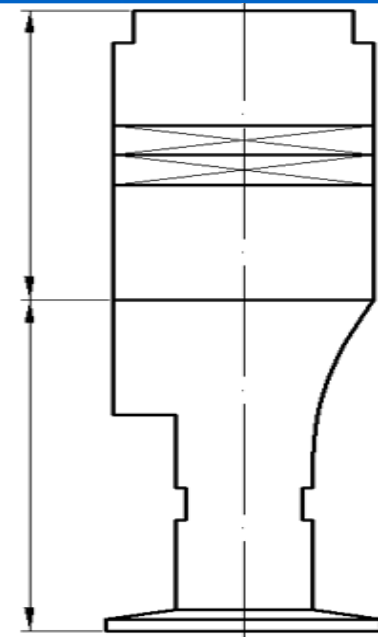
Развитая кавитация
20,35 кГц

Основная проблема колебательной системы

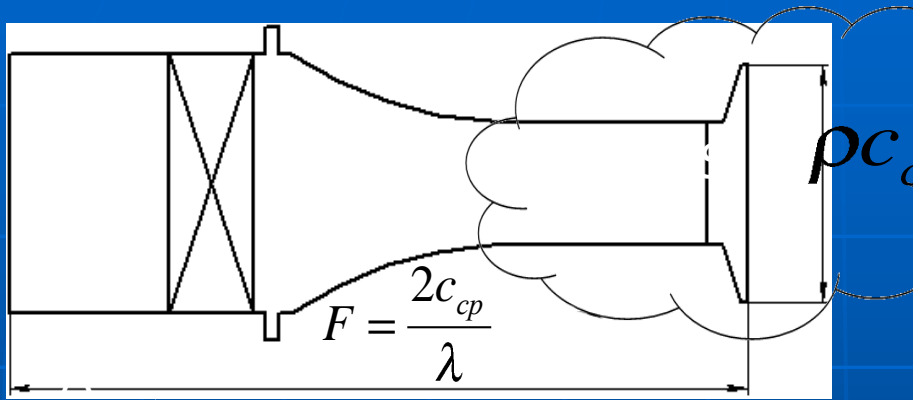
1. Низкий КПД (<50%)
2. Большая масса и продольный размер
3. Рассогласование

$$f_1 = \frac{2c_1}{\lambda_1}$$

$$f_2 = \frac{2c_2}{\lambda_2}$$



Полуволновая колебательная система



КПД $\leq 80\%$

Амплитуда ≤ 100 мкм

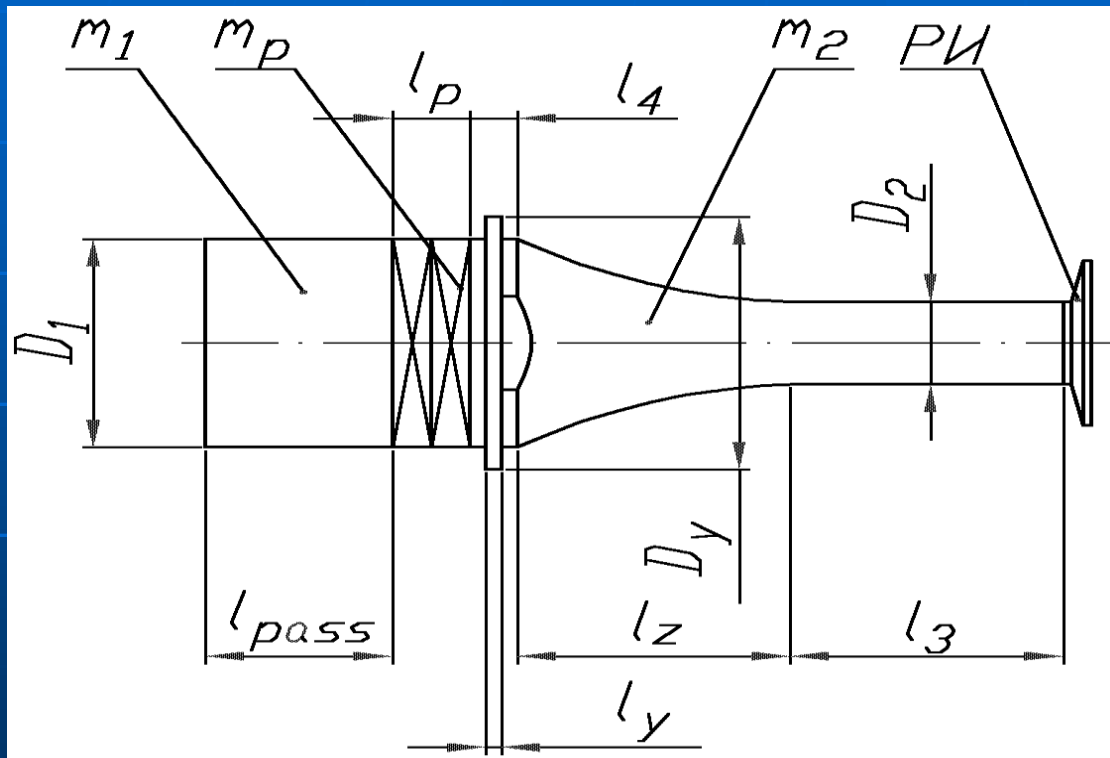
Коэффициент усиления ≥ 20



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

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

Конструктивная схема полуволновой 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

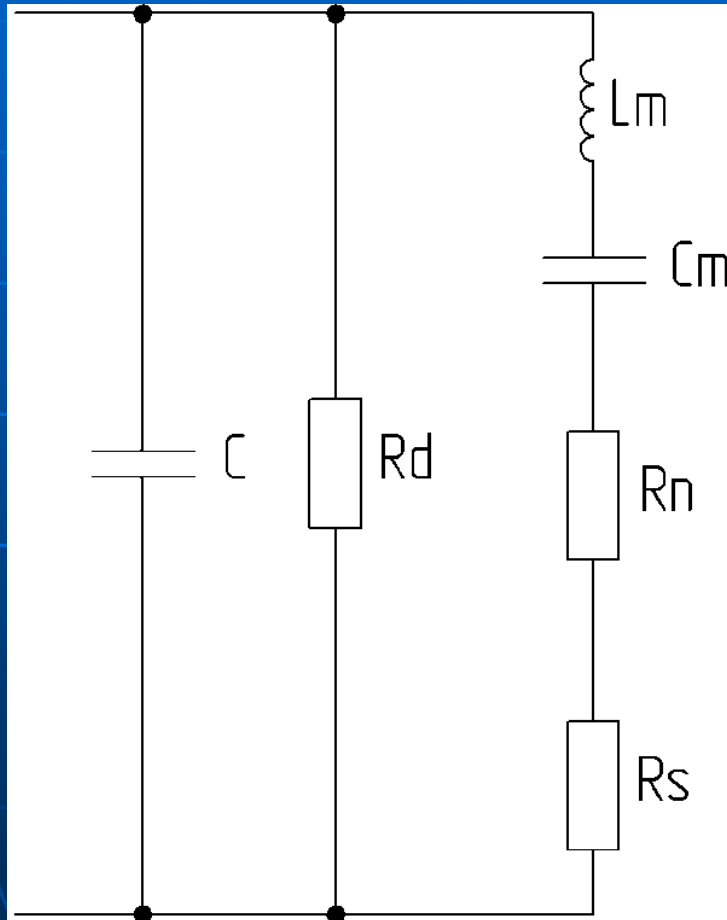
l_{pass} – длина отражающей пассивной накладки (материал m_1) диаметром D_1

l_p – толщина пакета пьезоэлектрических элементов (материал m_p)

l_z – длина участка с плавным переходом

РИ – сменный рабочий инструмент

Модель системы в виде физической эквивалентной схемы



C – статическая емкость пьезокерамики;

R_d – сопротивление диэлектрических потерь;

L_m индуктивность механической ветви (эквивалент колеблющейся массы преобразователя);

C_m – емкость механической ветви (эквивалент гибкости);

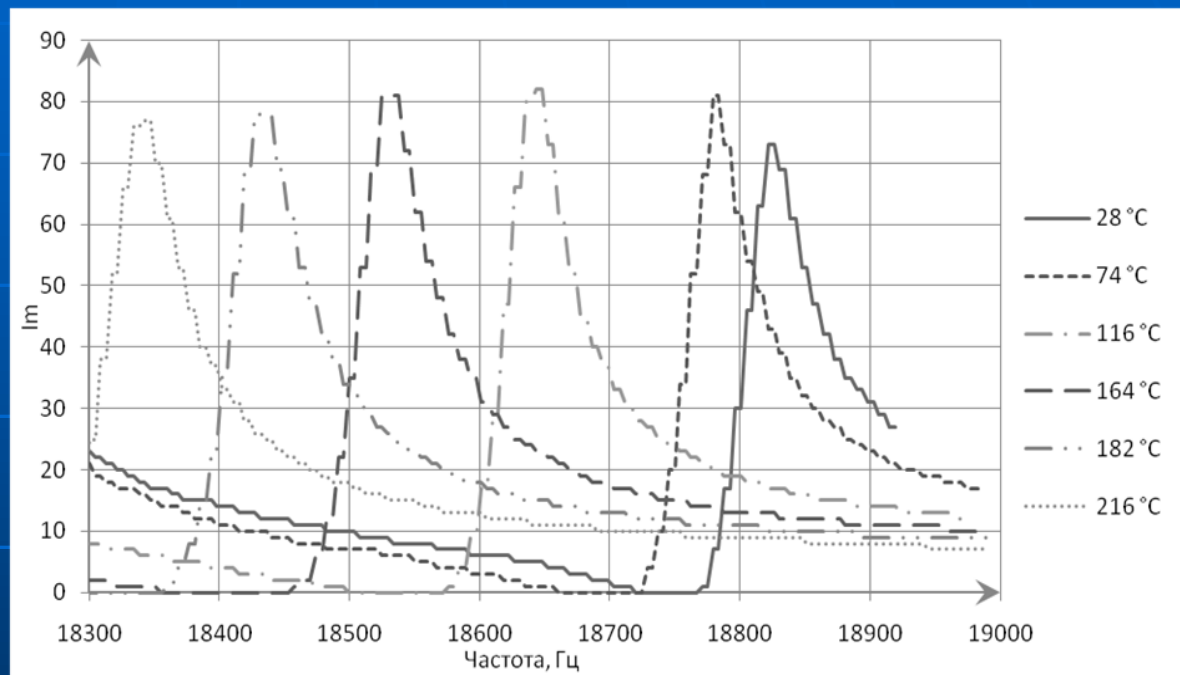
R_n – сопротивление механических потерь;

R_s – сопротивление излучению.

Влияние нагрева излучающей поверхности

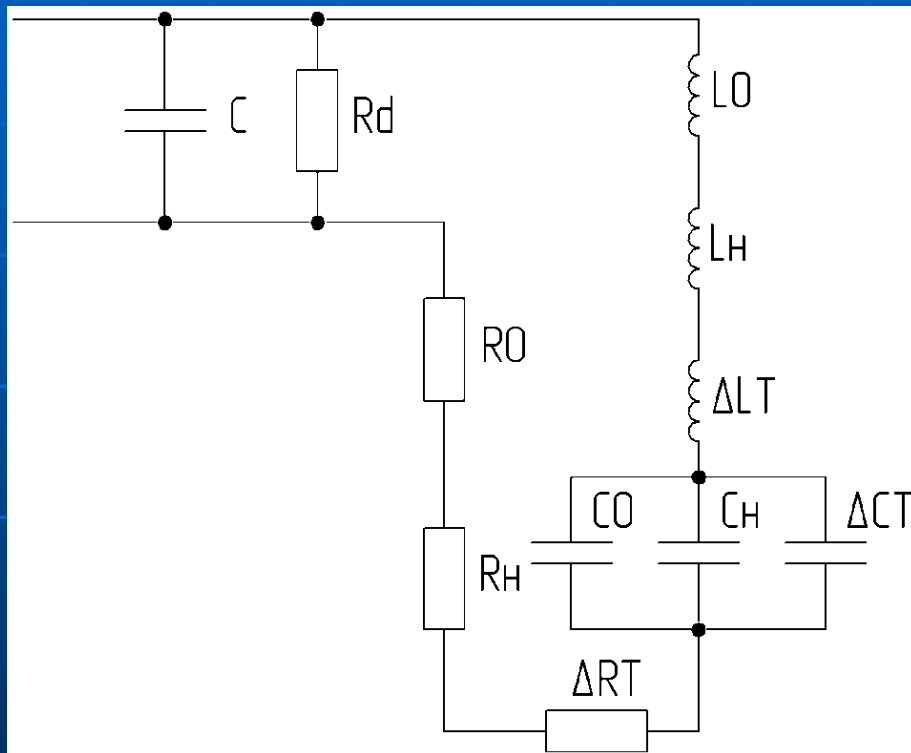


Система ультразвукового аппарата серии «Соловей»



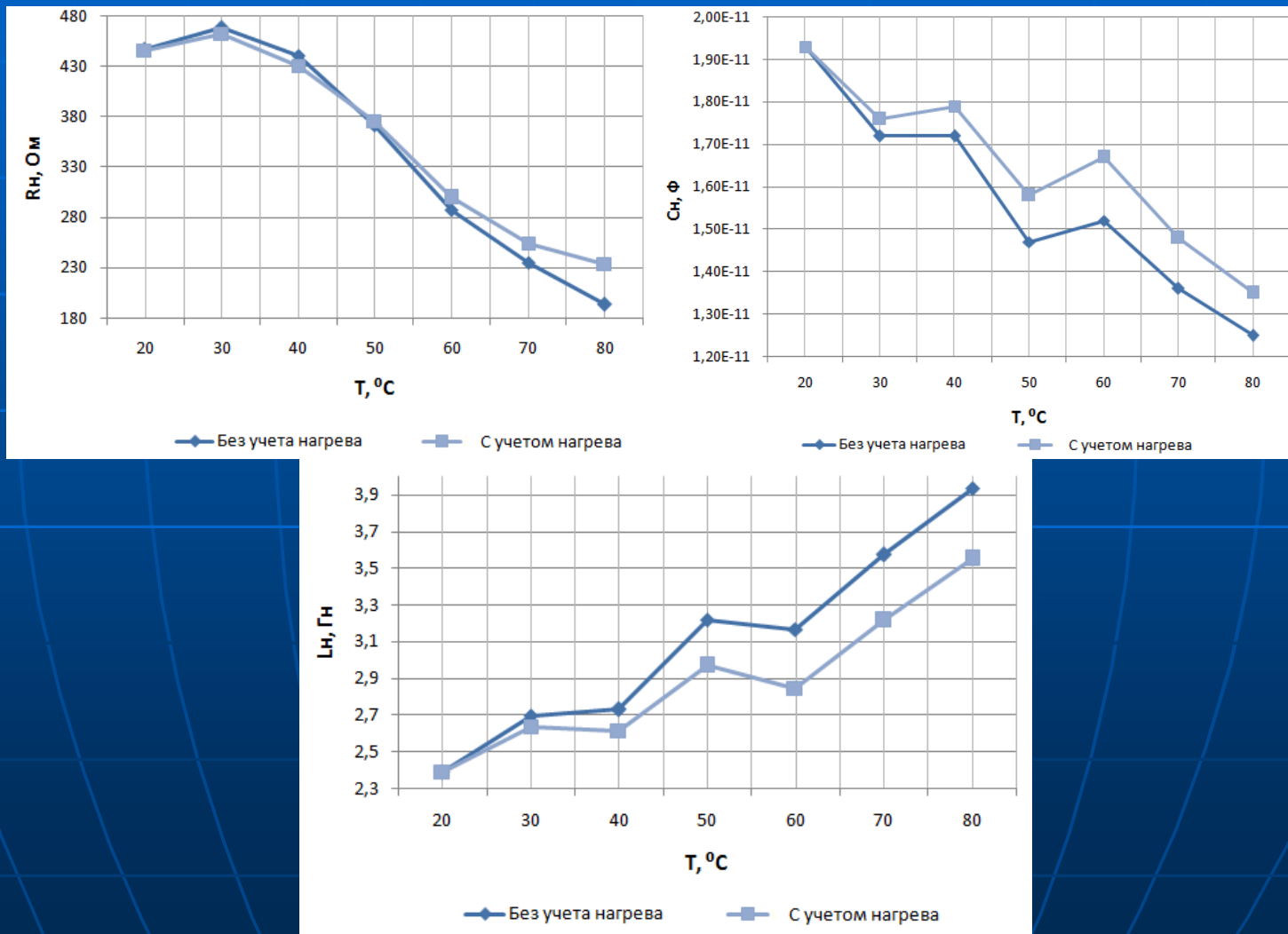
АЧХ тока механической ветви при различной температуре УЗ излучателя (излучение в газовую среду)

Модель системы, учитывающая влияние нагрева



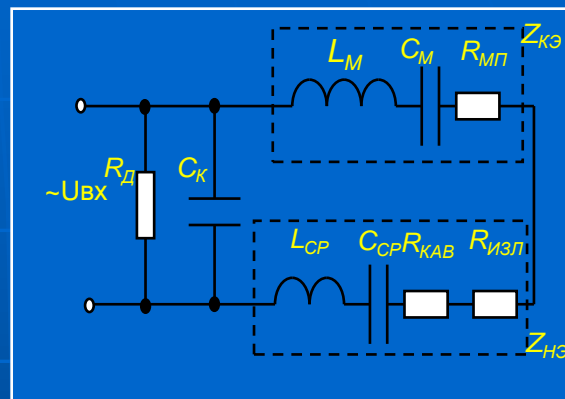
C – статическая емкость пьезокерамики;
 R_d – сопротивление диэлектрических потерь пьезокерамики;
 L_0 – индуктивность УЗКС;
 C_0 – емкость УЗКС;
 R_0 – активное сопротивление УЗКС;
 L_H – индуктивность акустической нагрузки;
 C_H – емкость акустической нагрузки;
 R_H – активное сопротивление акустической нагрузки;
 ΔL_T – добавочная индуктивность, вызванная нагревом УЗКС;
 ΔC_T – добавочная емкость, вызванная нагревом УЗКС;
 ΔR_T – добавочная емкость, вызванная нагревом УЗКС;

Влияние нагрева на параметры элементов эквивалентной схемы



Колебательная система - датчик параметров технологических сред

18



R_d – сопротивление диэлектрических потерь;

C_k – емкость пьезокерамических элементов;

$R_{мп}$ – сопротивление механических потерь;

C_m – эквивалент гибкости 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.

$$Z = (Z_{кэ} + Z_{нэ});$$

$$Z_{нэ} = f(R_{кав}; R_{изл}; L_{ср});$$

$$R_{изл} = f(\rho_{ср} C_{ср}) - \text{выход энергии};$$

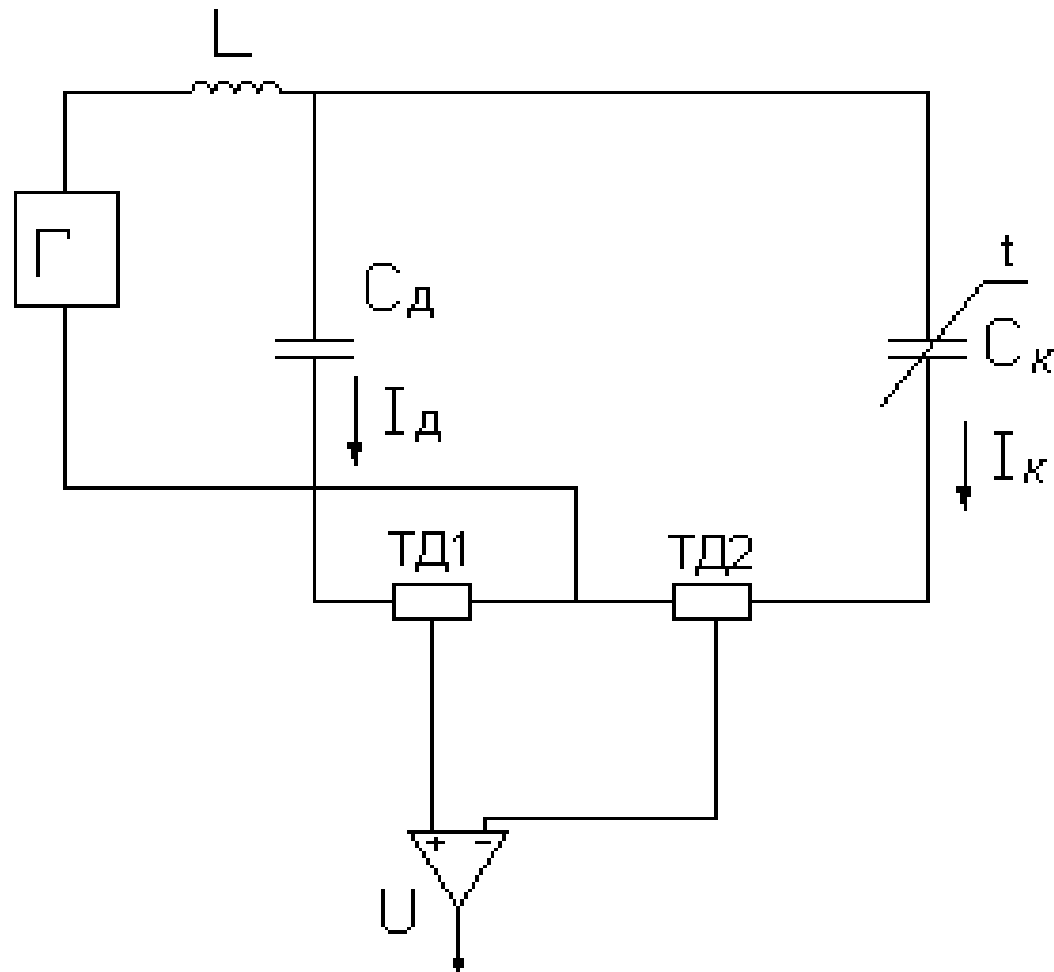
$$L_{ср} = f(m_{присоед.}) = f(\rho_{ср})$$

резонансные свойства;

$$f_{рез} = f(\rho_{ср}).$$

На основе электрической эквивалентной схемы УЗКС получены зависимости ее электрических параметров от характеристик акустической нагрузки и собственных свойств, что позволяет измерять акустические характеристики сред

Система контроля



Предельные возможности

Предельная амплитуда колебаний излучателя для выбранного материала

$$A_{MAX} = \frac{\sigma_{MAX}}{2\pi f \cdot \rho_{II} c_{II}}$$

Предельная интенсивность на поверхности излучателя

$$I_{max} = \frac{1}{2} \sigma_{max} \frac{\rho_{cp} c_{cp}}{\rho_u^2 c_u^2}$$

Площадь излучателя

$$S$$

Мощность электронного генератора

МОЩНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ

$$P_{MAX} = \int_S I_{max} dS$$

Потери энергии

Затухание в материале

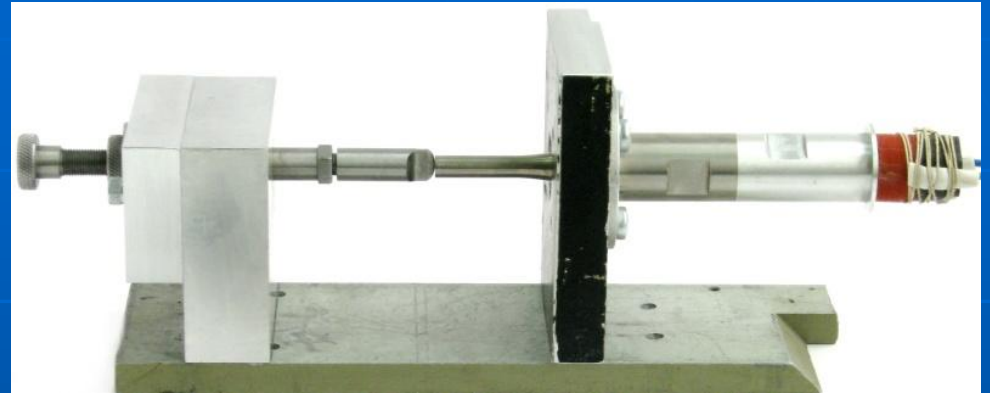
Пределные амплитуды колебаний для различных металлов

	Сталь 40X	Алюминиевый сплав Д16Т	Титановый сплав BT16
Плотность, кг/м ³	7700	2700	4200
Акустическое сопротивление для продольных волн, кг/(м ² с)10 ⁷	4,5	1,7	2,8
Акустическое сопротивление для поперечных волн, кг/(м ² с)10 ⁷	2,5	0,82	1,3
Предел прочности, МПа	380-490	100	350
Затухание, %	4-5	2,2-2,6	1,7-2
Максимальная амплитуда колебаний, мкм	100...120	50...70	200...300

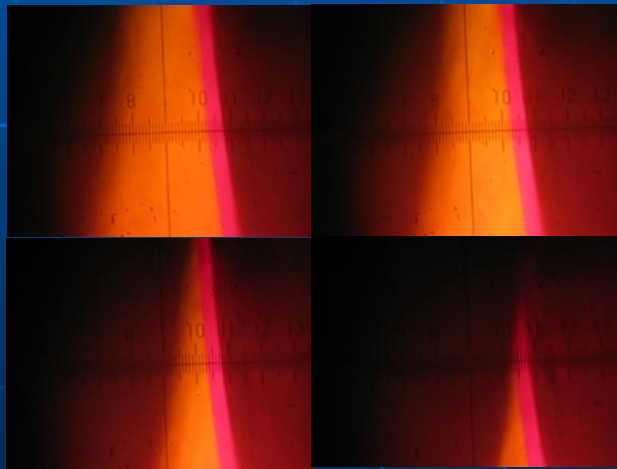
Измерение амплитуды колебаний



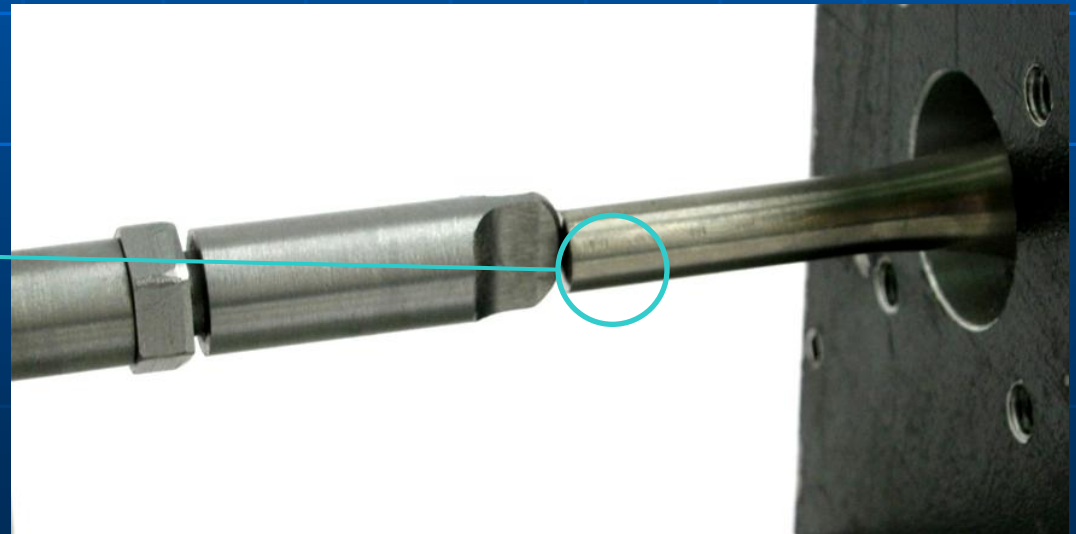
Ультразвуковой аппарат серии «Гиминей-ультра»



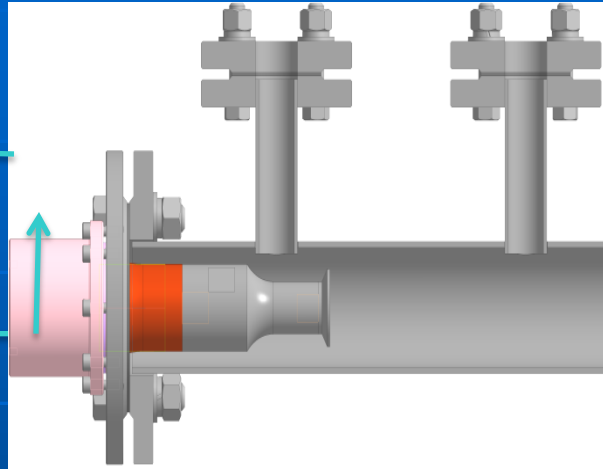
Внешний вид установки, позволяющей изменять усилие прижима к излучающей поверхности



Серия светотеневых изображений колебательного процесса, полученных при изменении усилия прижима



Проблемы косвенных методов измерения амплитуды

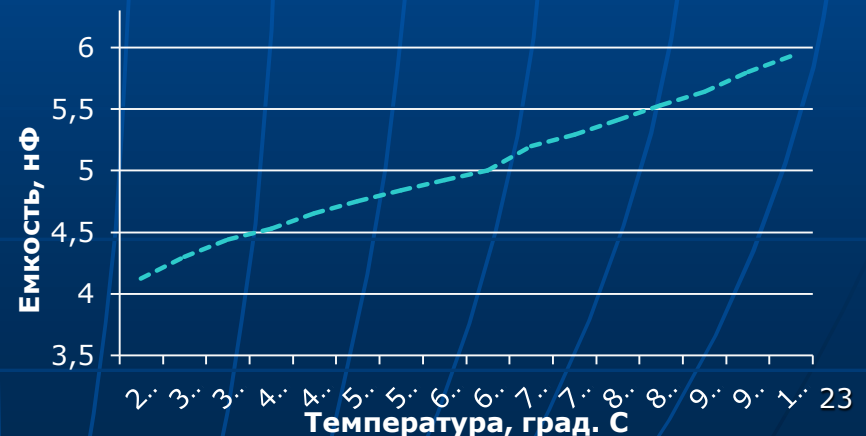
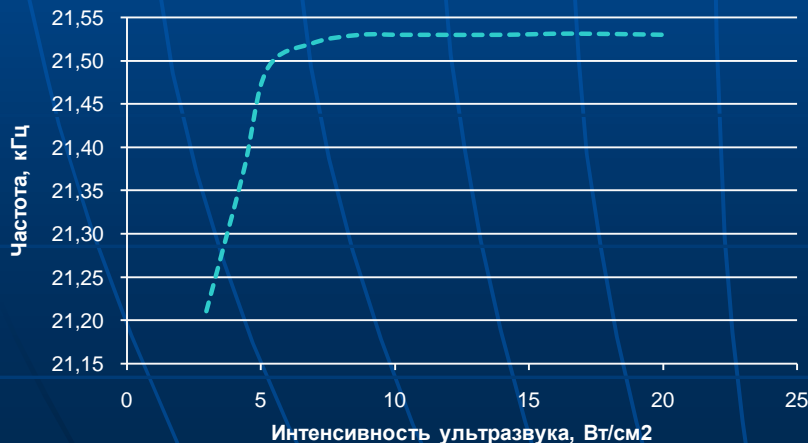


Проточный УЗ аппарат

Проблемы:

- отсутствие теоретического и экспериментального подтверждения
- изменение параметров колебательной системы;
- изменение свойств среды.

Характерные зависимости параметров пьезопреобразователей



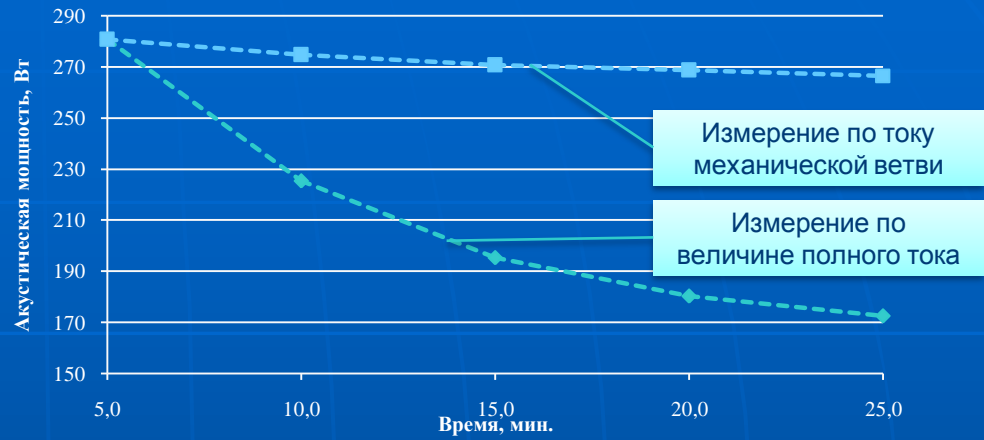
Управление на основе контроля



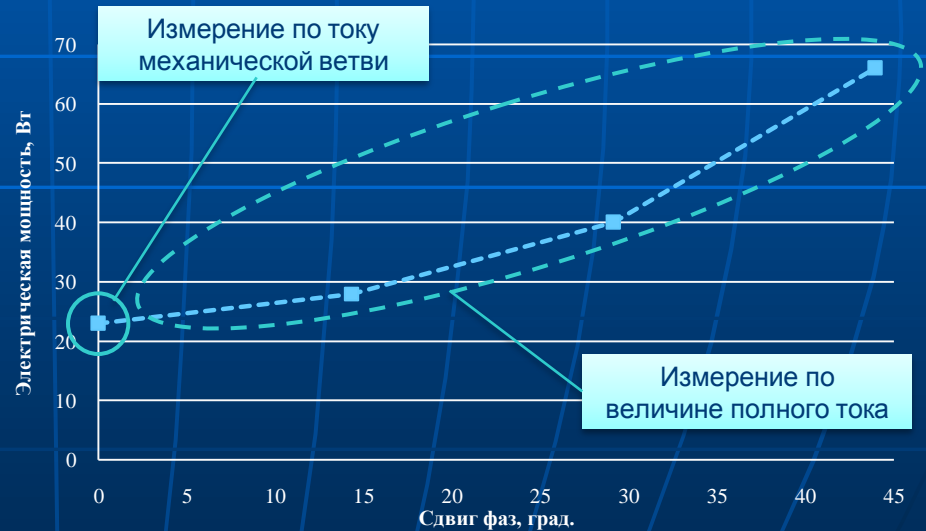
Ультразвуковой аппарат серии «Волна» для кавитационной обработки жидких сред



Ультразвуковой аппарат серии «Гимней-ультра» для сварки термопластичных материалов



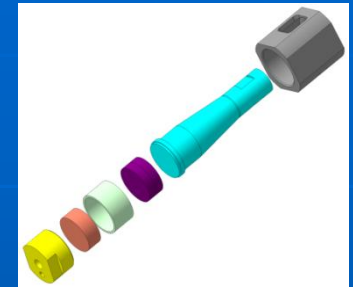
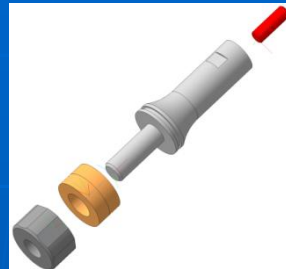
Изменение вводимой акустической мощности в процессе реализации технологического процесса



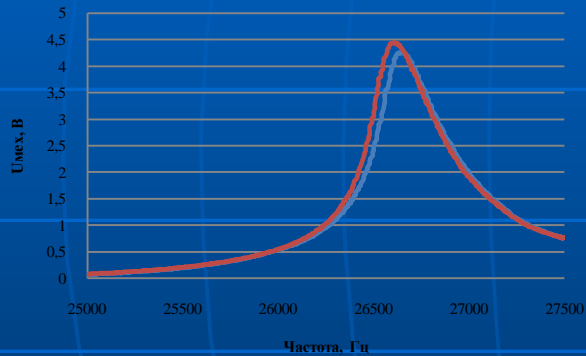
Изменение потребляемой пьезопреобразователем электрической мощности от сдвига фаз между питающим током и напряжением при стабилизации амплитуды колебаний

Проектирование на основе контроля

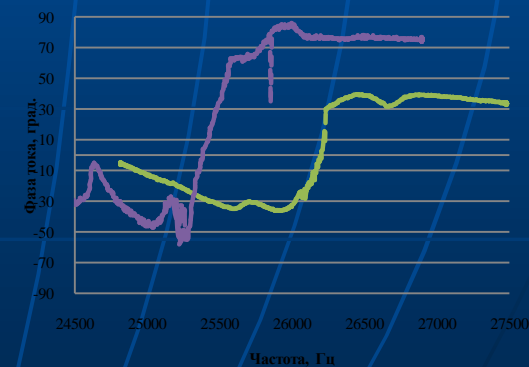
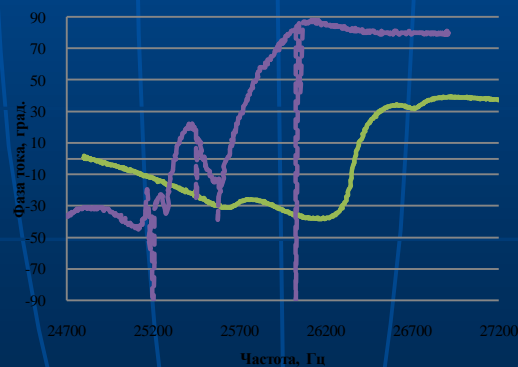
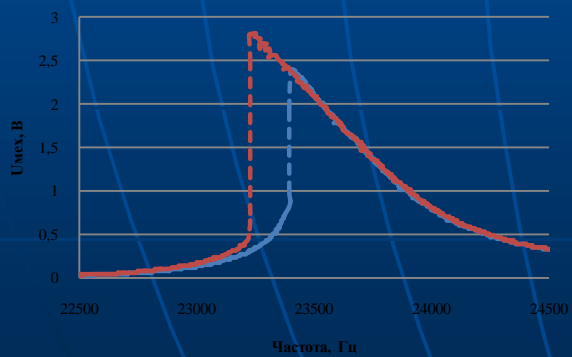
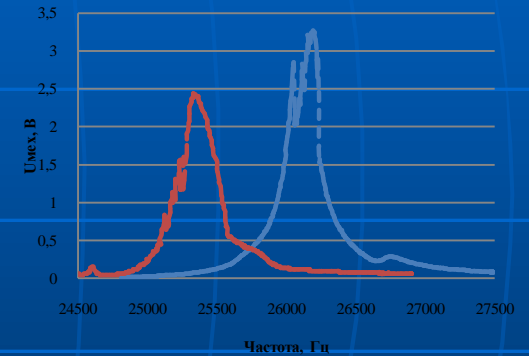
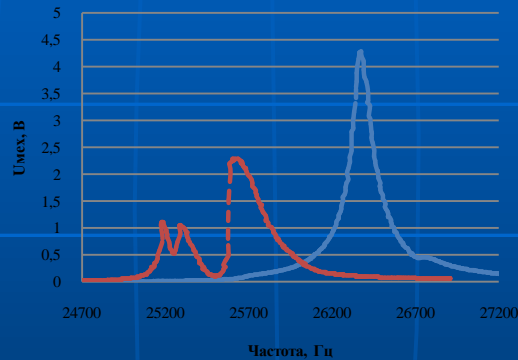
Внешний вид и схема расположения элементов двух сравниваемых преобразователей



АЧХ преобразователей без рабочего инструмента



Характеристики преобразователей с рабочими инструментами

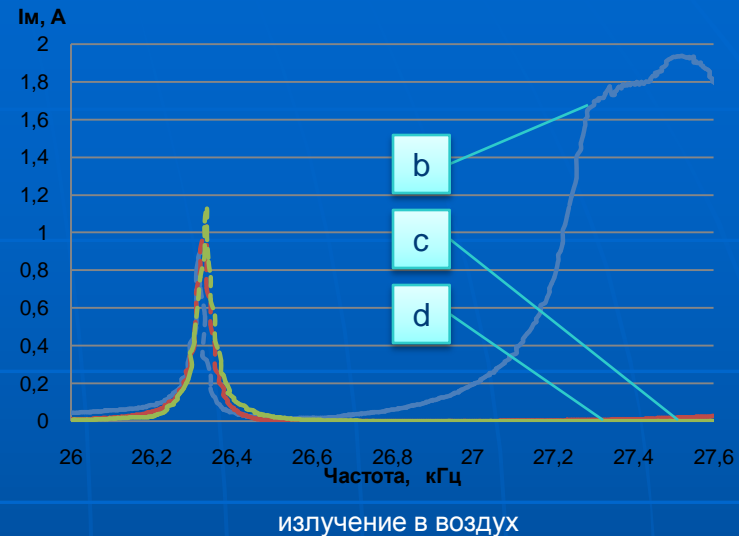
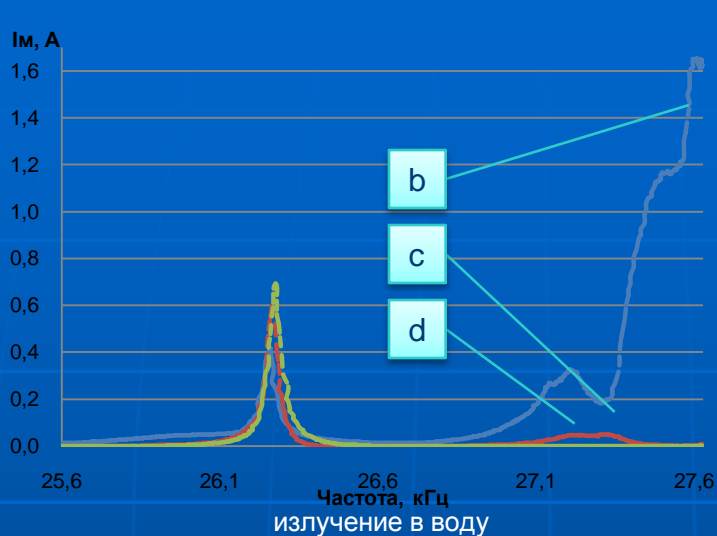
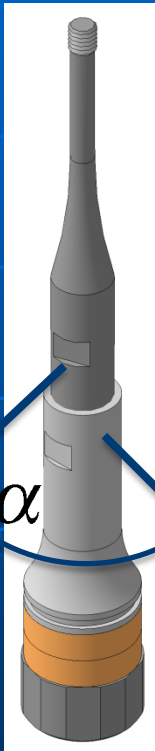


а – АЧХ при увеличении частоты
б – АЧХ при уменьшении частоты

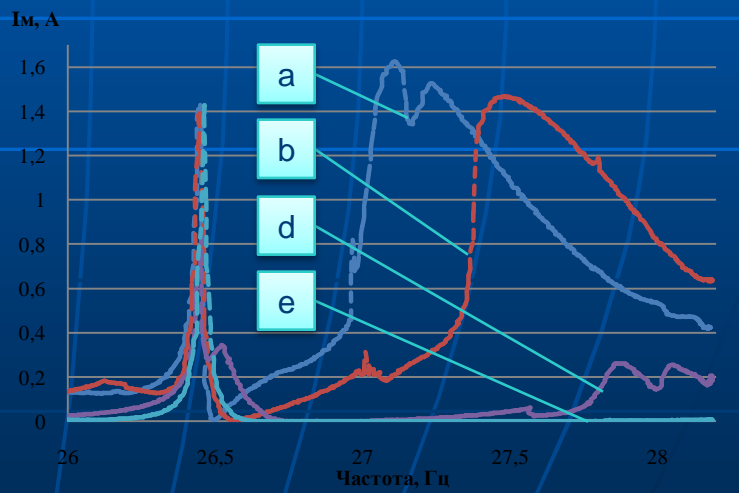
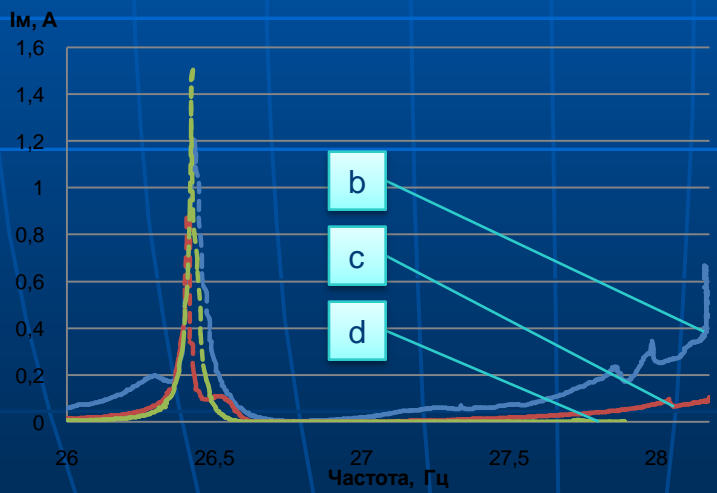
полувольтной рабочий инструмент (воздух)

полувольтной рабочий инструмент (вода)

Эксплуатация при контроле



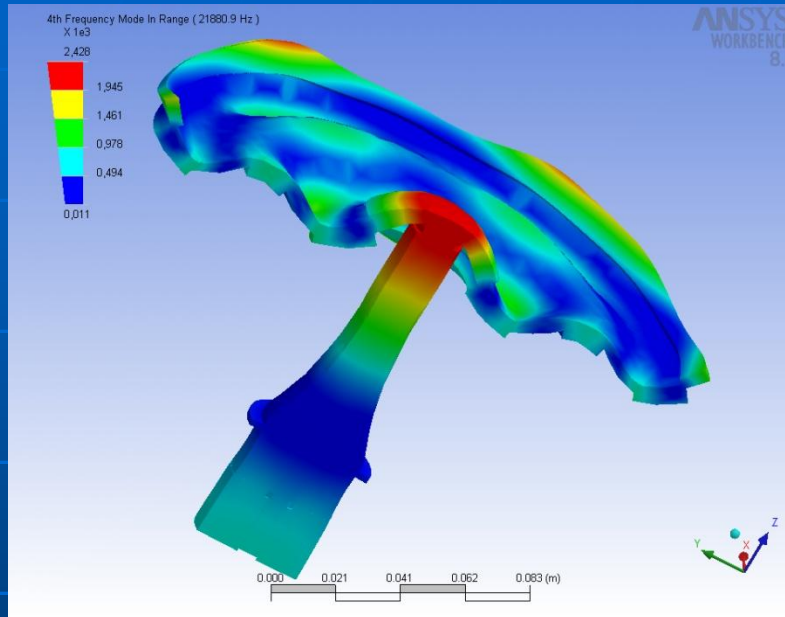
Рабочие инструменты двухполуволновой длины



Рабочие инструменты трехполуволновой длины

a – угол поворота 0° , b – угол поворота 8° , c – угол поворота 16° , d – угол поворота 24° , e – угол поворота 32°

Ограничения эффективности излучения



Использование стали:

- + высокая прочность
- большое затухание
- большая масса

Основные ограничения:

- акустическая мощность < 130...300 Вт,

Наличие резьбового соединения диска и концентратора
- возможность механического разрушения

Ограниченный диаметр – мм:

- + возможность установки в существующие установки
- ограниченная мощность

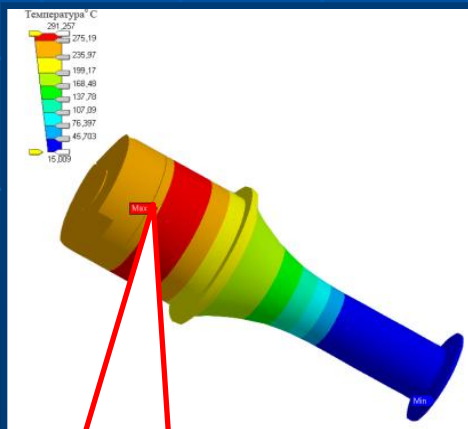
Недостатки колебательных систем

Недостаточная площадь поверхности излучения

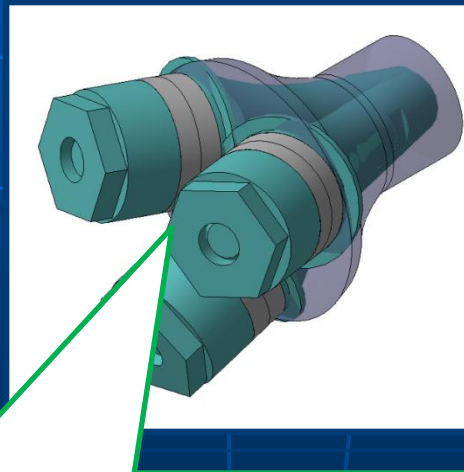
Плохое согласование с обрабатываемой средой

Необходимость разработки новых конструкций излучающих элементов

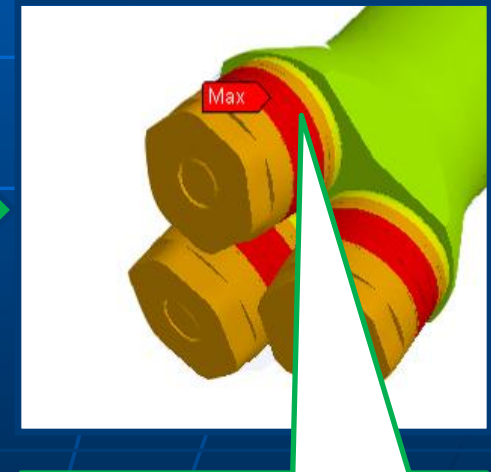
Недостаточная мощность



Перегрев при мощности более 150 Вт



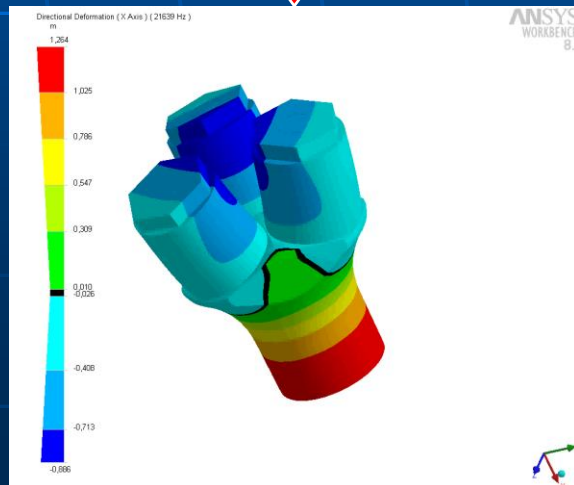
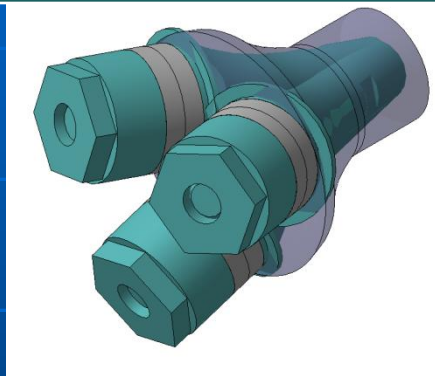
Разработка многоэлементного преобразователя – электрическая мощность распределяется по элементам, механические колебания суммируются



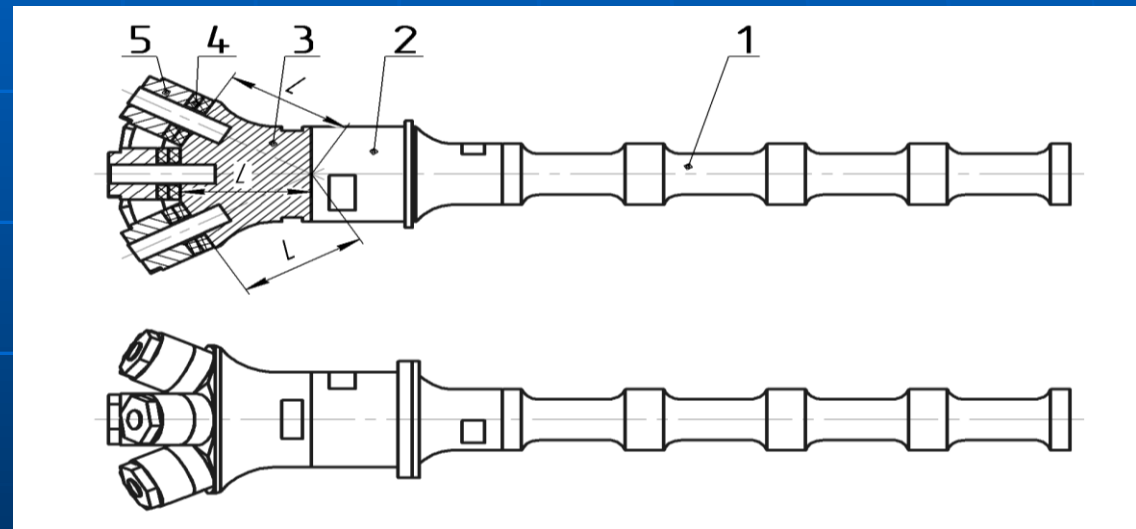
Отсутствие перегрева до 300 Вт без принудительного охлаждения

Повышение мощности и увеличение излучающей поверхности

Многоэлементный пьезоэлектрический преобразователь

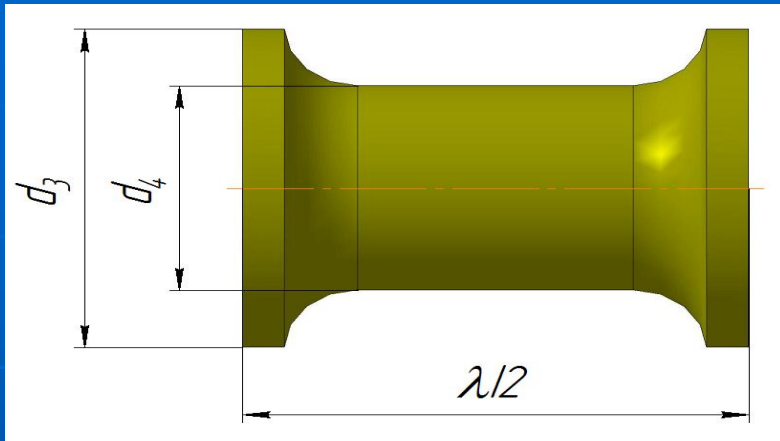


Многоэлементный пьезоэлектрический преобразователь с многополуволновым рабочим инструментом



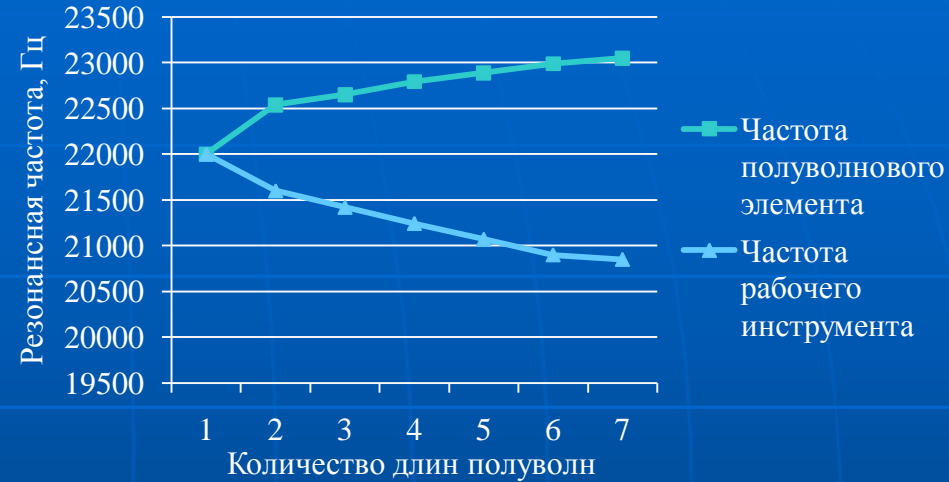
1 – активный рабочий инструмент с увеличенной поверхностью излучения; 2 – согласующий акустический трансформатор (концентратор); 3 – рабочая частотнопонижающая накладка; 4 – пьезоэлектрические элементы; 5 – отражающие частотнопонижающие накладки

Увеличение поверхности излучения



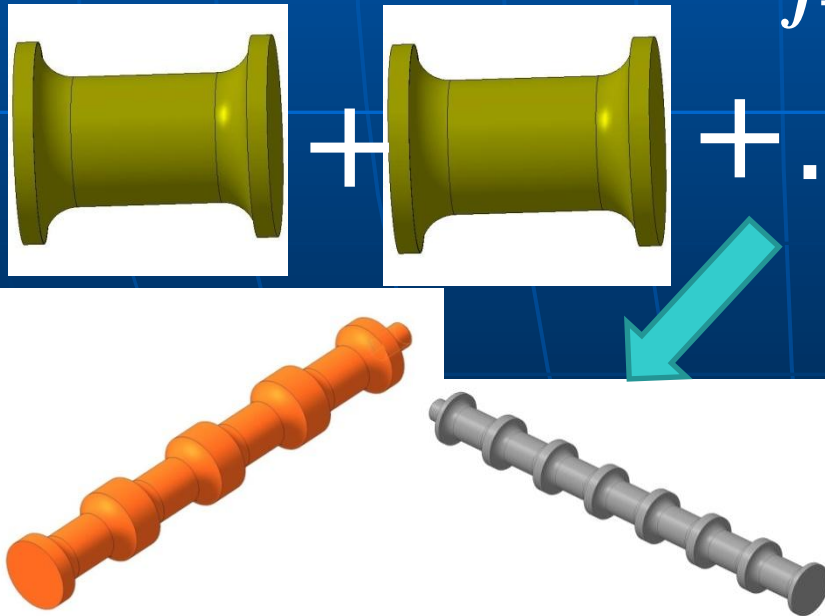
d_3 – в зависимости от выбранного бустерного звена и излучающей накладки;
 d_4 – в зависимости от требуемой площади излучения но не менее $0,6d_3$.

Зависимость резонансной частоты рабочего инструмента от количества длин полуволн



$$f = f_0 n^{-0,026}$$

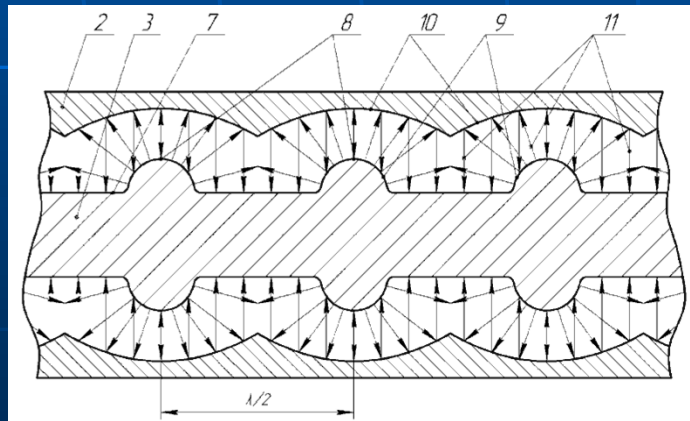
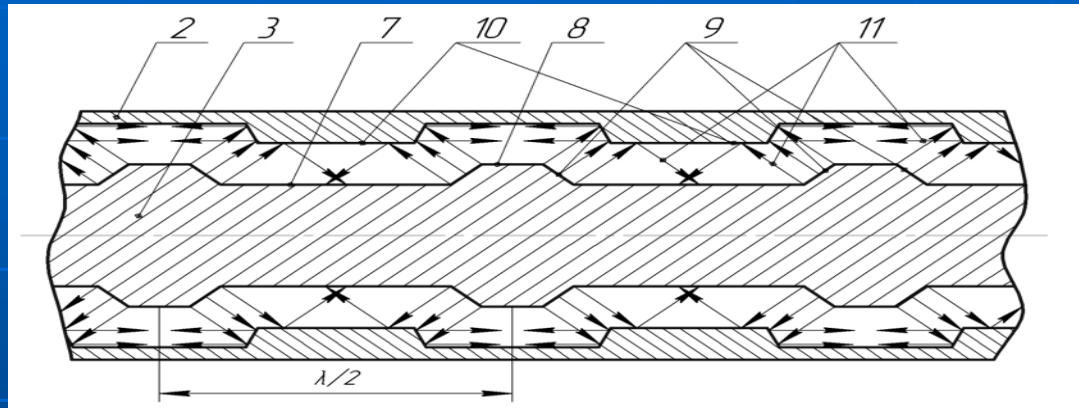
где f – резонансная частота n -го волновода;
 f_0 – необходимая рабочая частота рабочего инструмента;
 n – количество полуволн ($n = 1, 2, \dots, 7$).



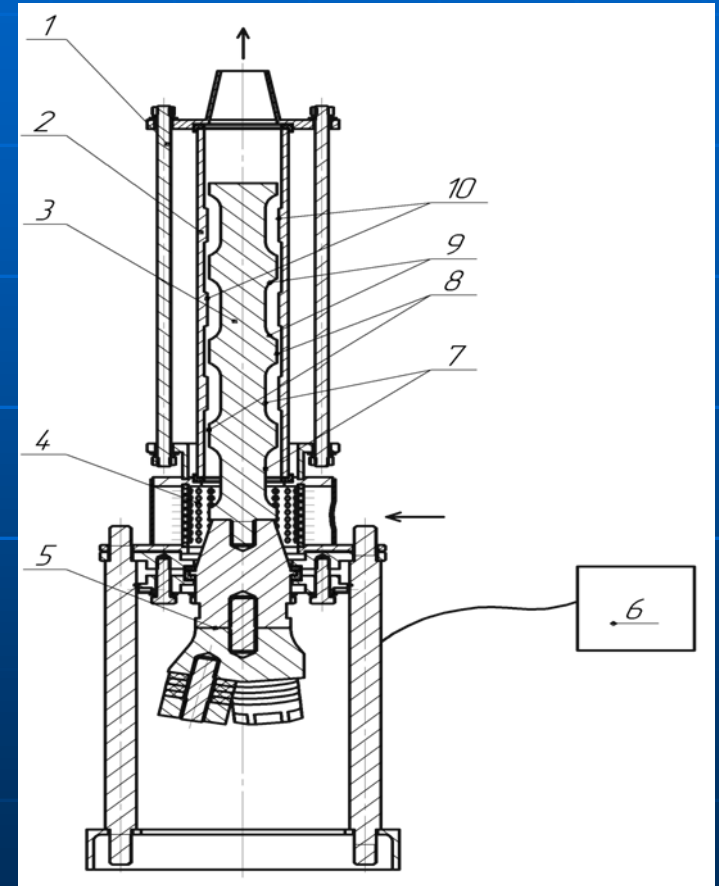
... Параметры разработанных рабочих инструментов

Мощность преобразователя, Вт	d_3/d_4 , мм	$S_{изл}$, см ²	$n\lambda/2$
3000	50/35	100	4
4000	50/35	150	6
7000	70/50	310	6
	70/45	350	7 ³⁰

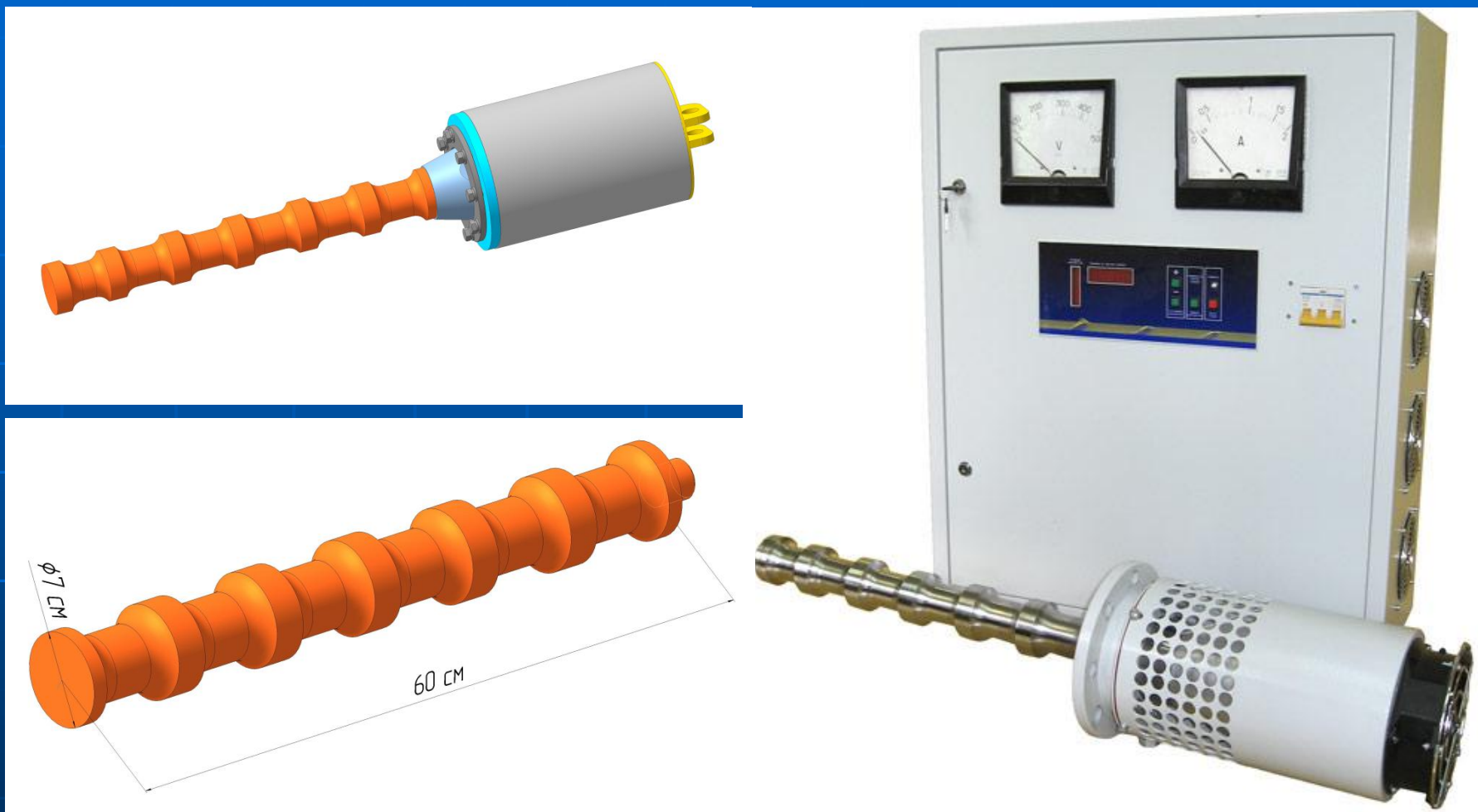
Увеличение эффективности за счет резонансных явлений



Ожидаемый
результат:
 $V_{\max} \geq 1000 \text{ см}^3$

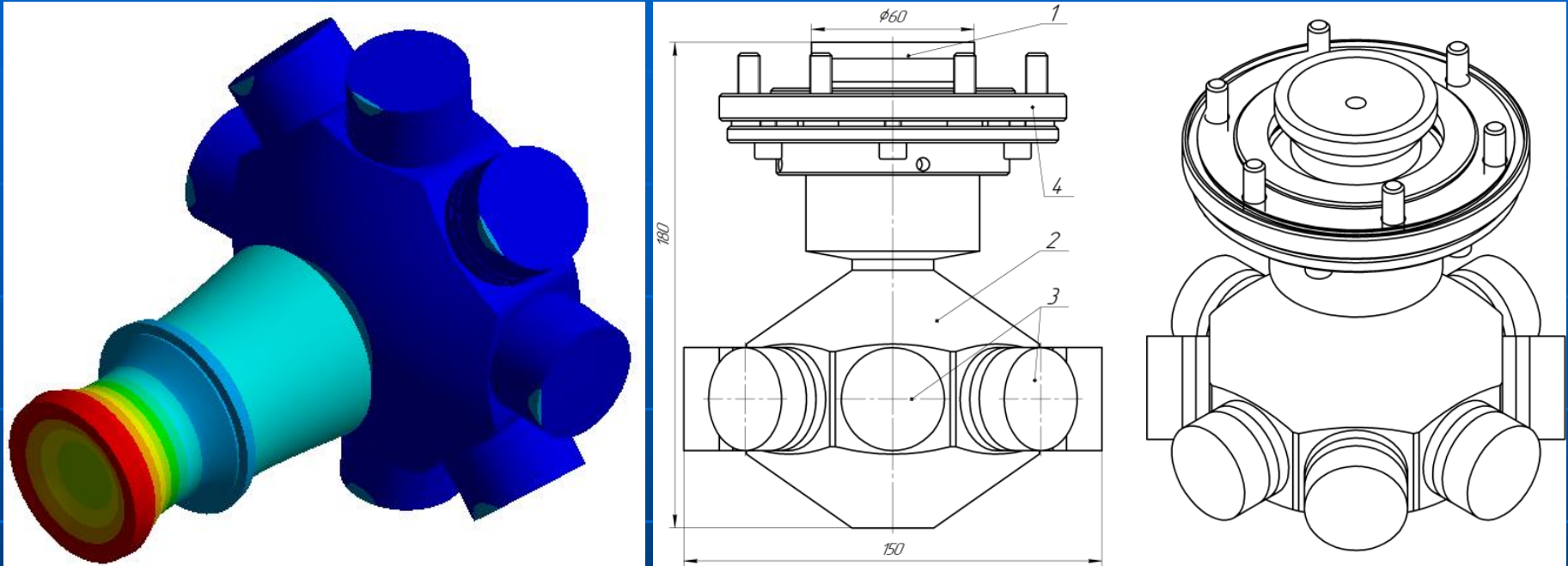


Использование многозонных излучателей



Проблема: выбор оптимальных форм излучателя и проточных объемов, режимов и условий обработки.³²

Высокочастотная (30 кГц) УЗКС повышенной мощности

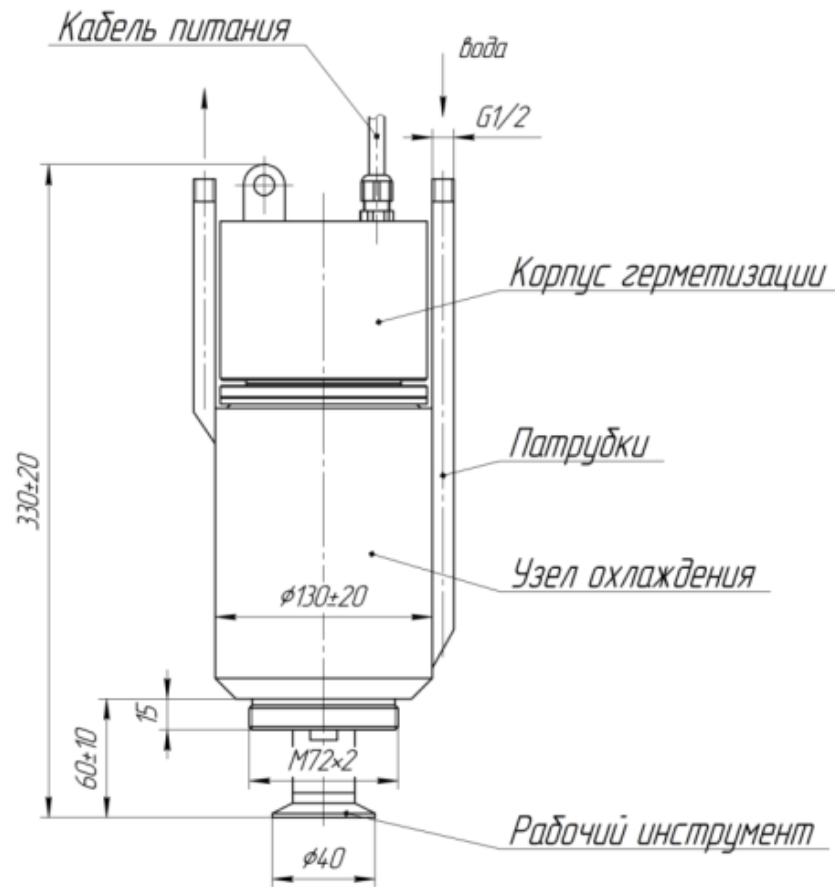
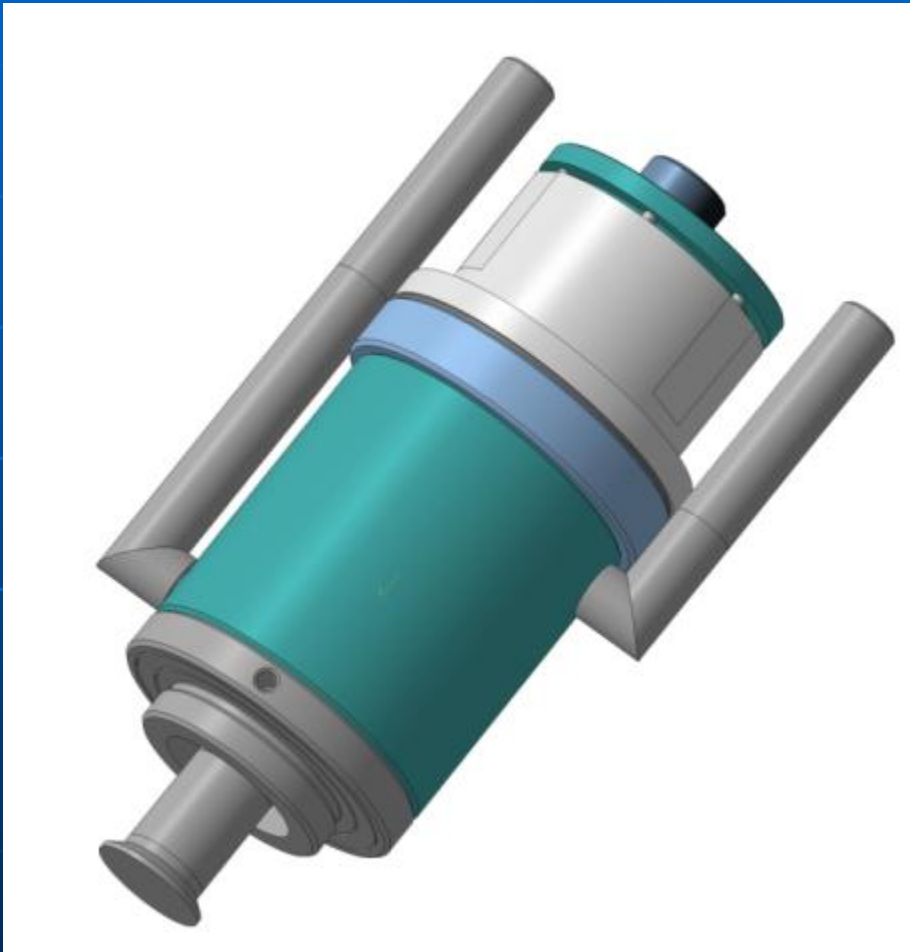


- 1 – концентратор-рабочий инструмент;
2 – частотопонижающая общая накладка; 3 – пакеты пьезоэлектрических элементов с отражателями

Практическая реализация колебательных систем

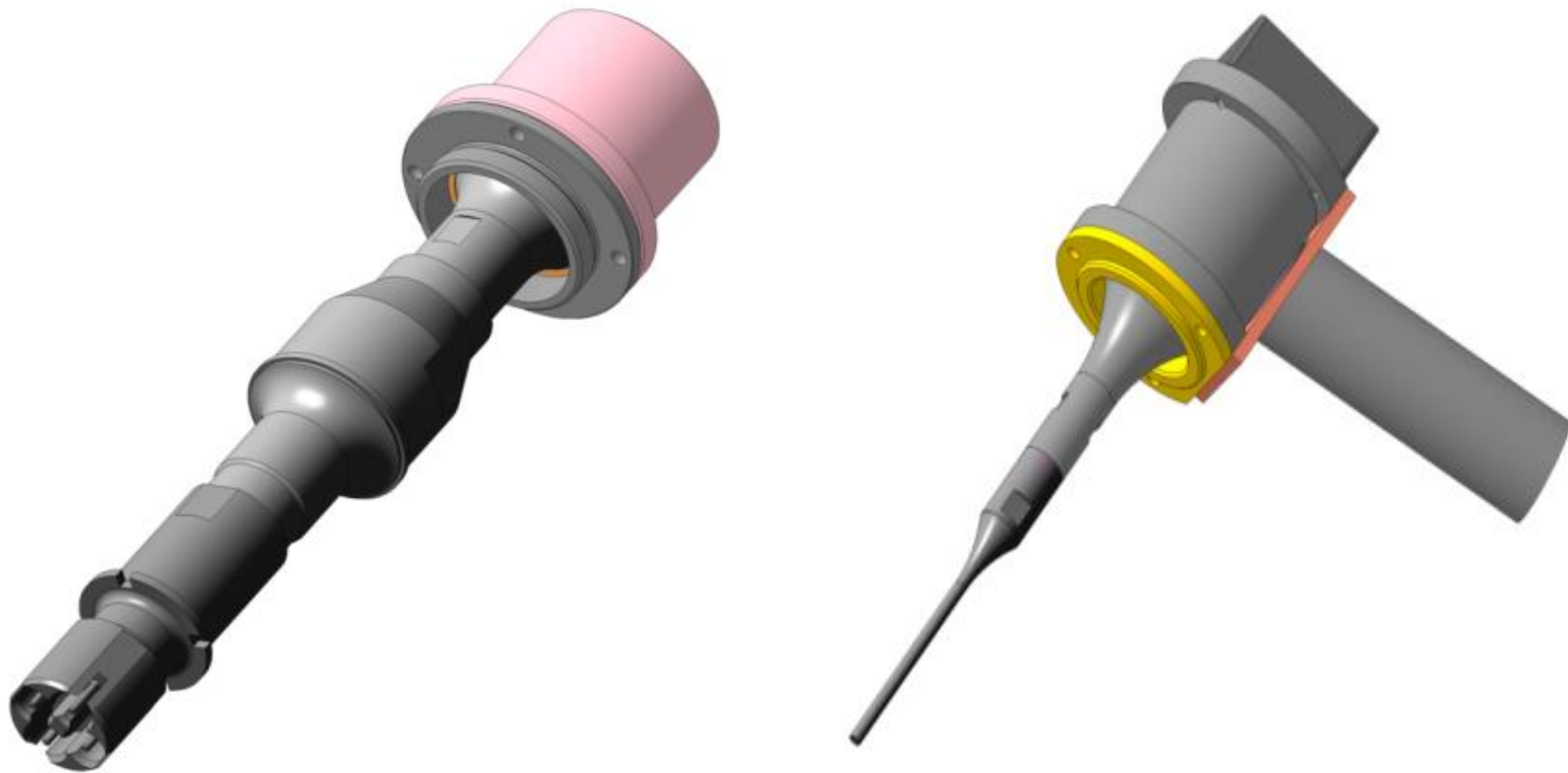


Система в герметичном корпусе с жидкостным охлаждением



1. Длина кабеля питания – 25 м.

Системы для очистки каналов форсунок дизельных двигателей



Особенности:

- Установка на технологическую линию очистки;
- Одновременная отмывка 4-х форсунок.

Системы для хирургии через проколы



ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Питание от сети переменного тока напряжением, В	220
Частота механических колебаний, кГц	27±3,3
Максимальная потребляемая мощность, ВА, не более	100
Количество уровней установки амплитуды от номинальной мощности	5
Габаритные размеры электронного блока, мм	300x269x130

Вес колебательной системы, кг	0,5
Амплитуда колебаний на торцевой поверхности рабочего инструмента при максимальной мощности, мкм, не менее	150
Количество сменных рабочих инструментов, шт	8
Масса электронного блока, кг, не более	3
Время непрерывной работы, мин, не более	10

Система для УЗ липосакции



13 рабочих инструментов вместо 4
в аппарате американского
производства



Патенты РФ
№2141386, 2239383.

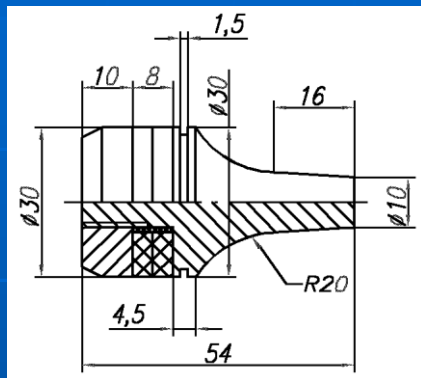
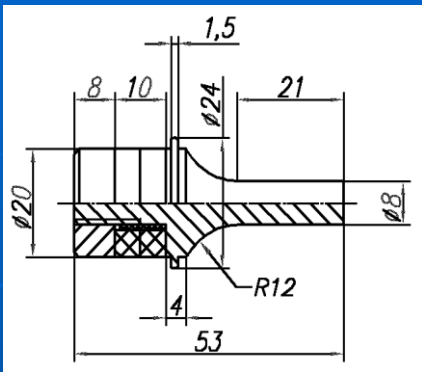


Эффективность излучения₃₈
увеличена в 10 раз

Ультразвуковые системы для сварки

(герметизация контейнеров с кровью)

Полуволновые УЗКС для герметизации гемоконтейнеров



а) – эскиз УЗКС ручного исполнения ;

б) – эскиз УЗКС стационарного исполнения;

в) - внешний вид УЗКС

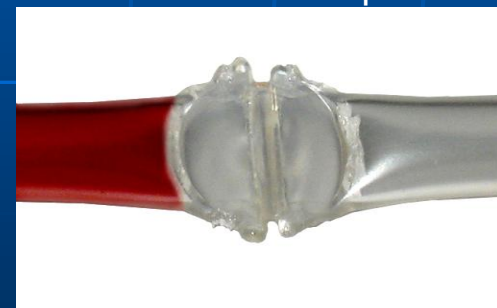
Гемоконтейнеры для хранения компонентов крови



Ультразвуковые сварочные аппараты для герметизации гемоконтейнеров



Сварное соединение гемоконтейнеров

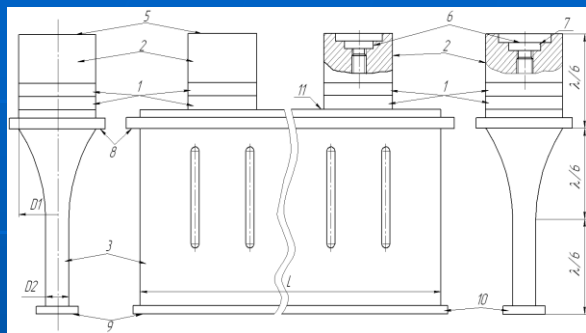


а) - ручной вариант; б) - стационарный вариант; в) – комбинированный вариант

Технические решения, защищены пат. РФ 2267316 «Устройство УЗ герметизации и сегментации трансфузионных систем»

Ультразвуковые истсемы для прессовой шовно-шаговой сварки

Полуволновые и двухполуволновые системы для выполнения протяженных швов длиной 150, 220, 360 мм



а) – эскиз полуволновой УЗКС;

б) - двухполуволновая УЗКС для выполнения швов 150 мм;



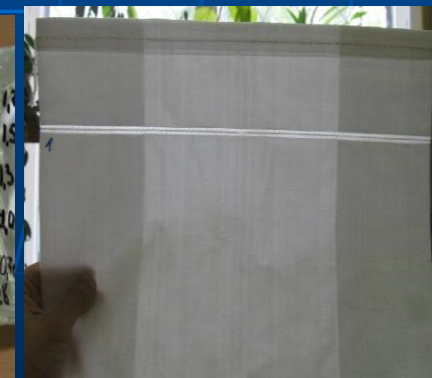
в) - двухполуволновая УЗКС для выполнения швов 220 мм;



г) - двухполуволновая УЗКС для выполнения швов 360 мм;

Ультразвуковые сварочные аппараты для выполнения протяженных швов

Изделия с протяженными швами 220 и 360 мм



Ряд систем для УЗ сварочных аппаратов

630 Вт



800 Вт



1000 Вт



3000 Вт



Длина сварочной поверхности

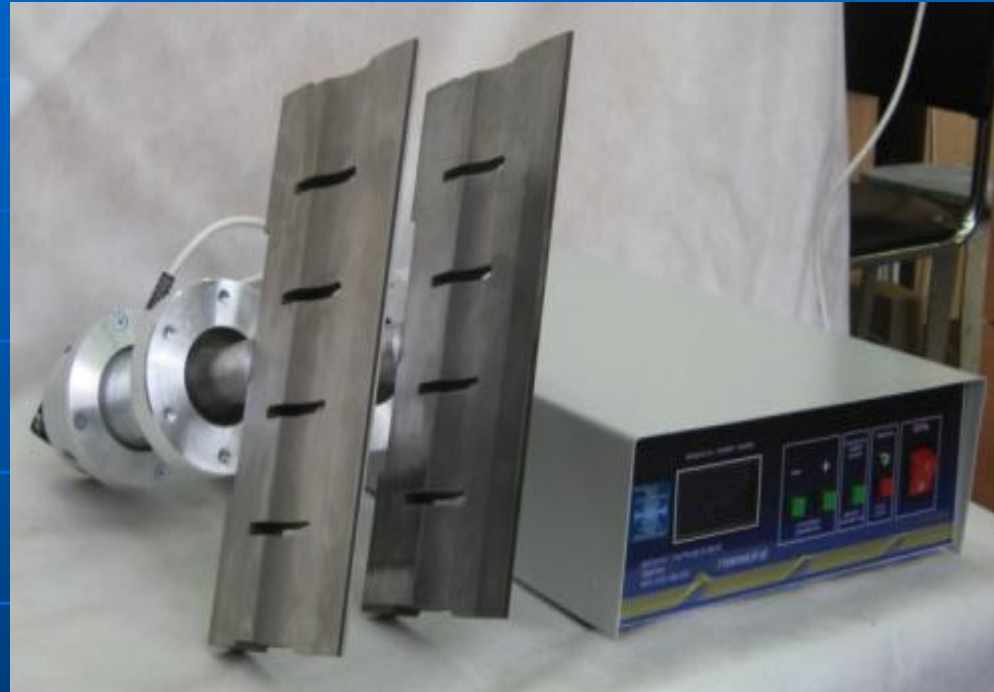
50-100 мм

100-180 мм

180-220 мм

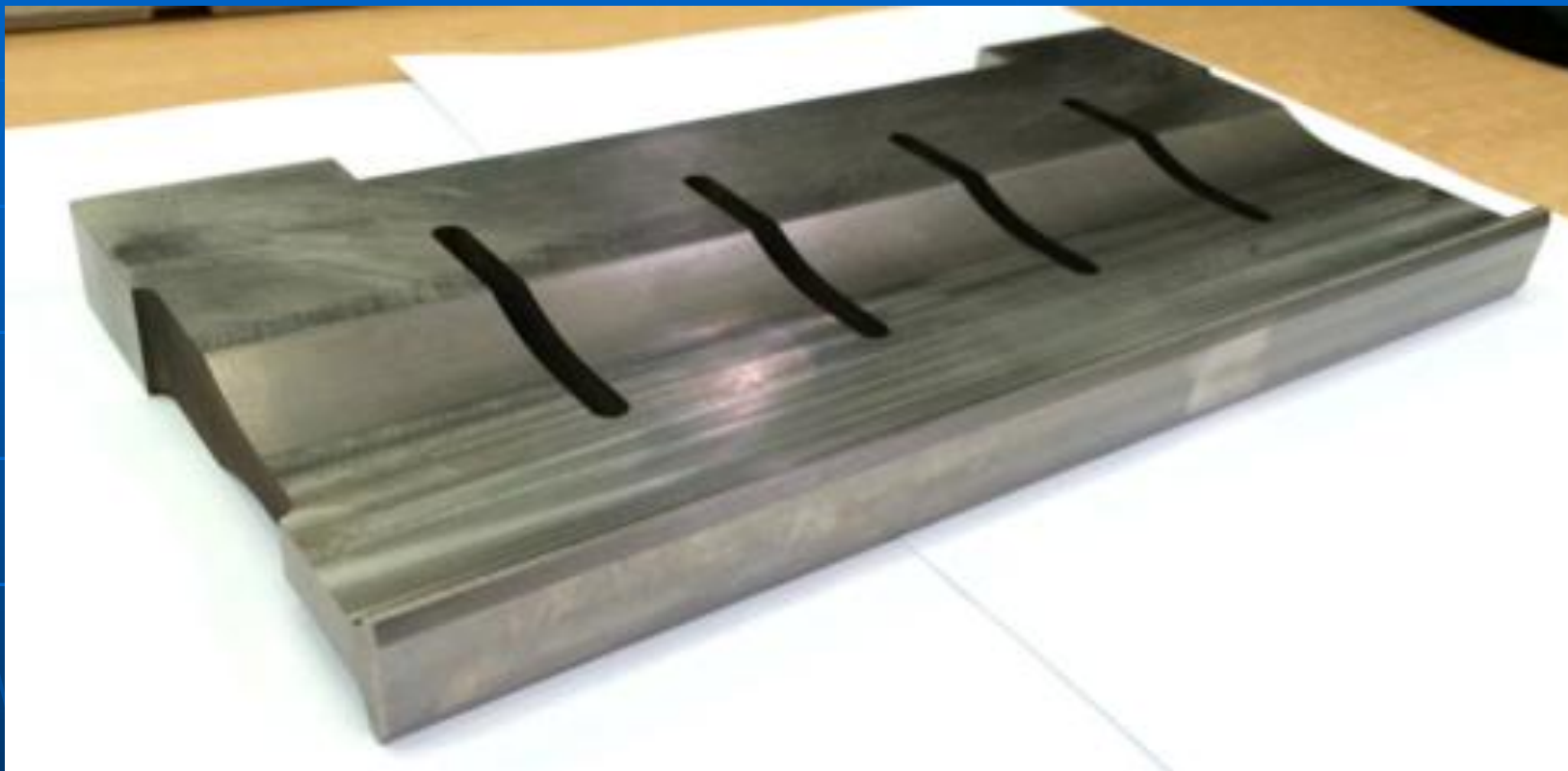
220-350 мм

Системы для УЗ сварки и резки



Ширина излучающей
поверхности – **270...360 мм**

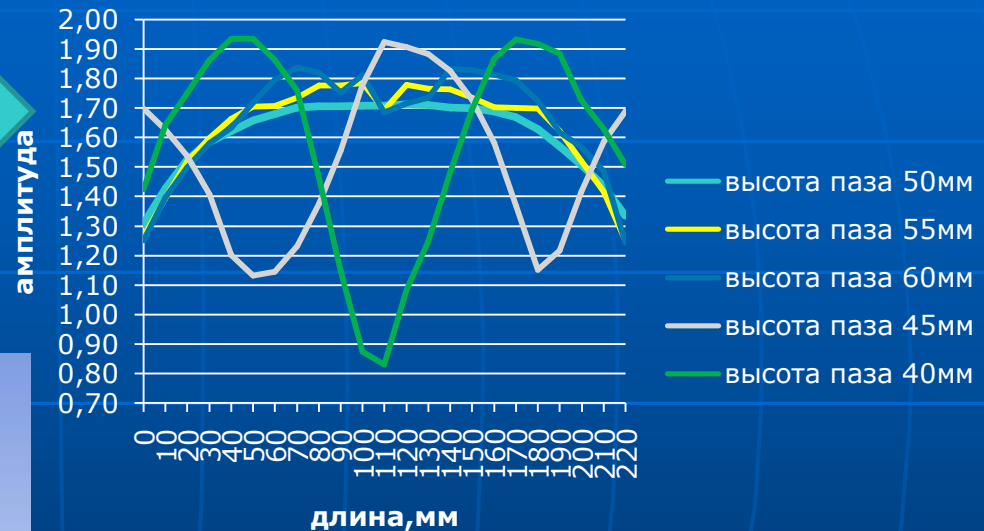
Система для пропитки



Площадь излучающей поверхности – (35×2) см².

Проектирование сварочных инструментов большой ширины

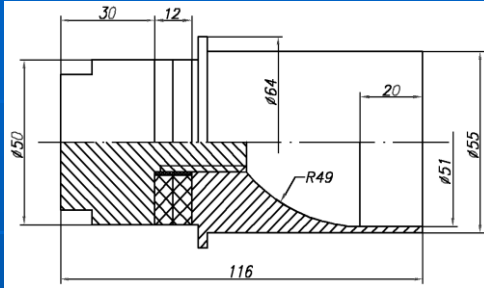
Распределение амплитуды колебаний при изменении высоты пазов



- 1) Выявление наиболее оптимальных соотношений м/у влияющими факторами
- 2) Разработка методики расчета для инструментов шириной 150, 220, 320 мм

Ультразвуковые системы для кольцевой сварки

Полуволновые, двухполуволновые и трехполуволновые УЗКС
для выполнения швов диаметром до 100 мм



а) – эскиз полуволновой УЗКС;

б) - полуволновая УЗКС для швов диаметром 50 мм (внешний вид);



в) - двухполуволновая УЗКС для швов диаметром 60 мм;



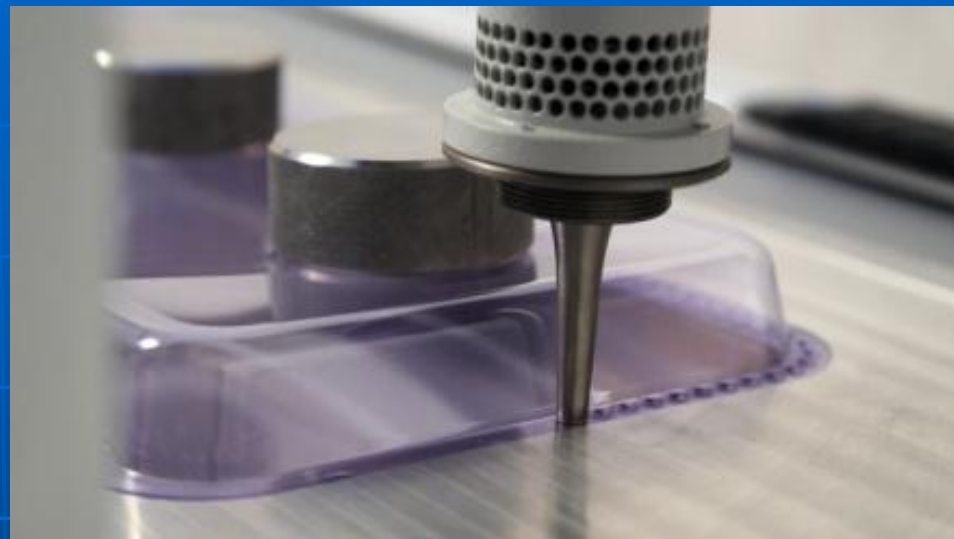
г) - трехполуволновая УЗКС для выполнения швов диаметром 100 мм;

Ультразвуковые сварочные аппараты для выполнения
кольцевых сварных швов

Изделия с кольцевыми сварными швами



Система для автоматизированной сварки изделий по сложному контуру



Системы для УЗ сварки автомобильных клипс

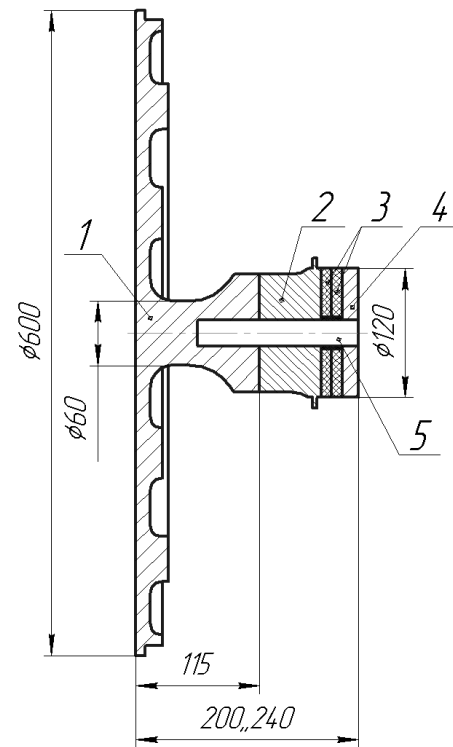


Особенности:

- использование рабочих инструментов сложной формы;
- согласование 2-х типов инструментов на один преобразователь.

Увеличение диаметра излучающей поверхности

- $D=200$ мм $\rightarrow P_{ac}=150$ Вт
- $D=300$ мм $\rightarrow P_{ac}=250$ Вт
- $D=400$ мм $\rightarrow P_{ac}=400$ Вт
- $D=500$ мм $\rightarrow P_{ac}=600$ Вт
- $D=600$ мм $\rightarrow P_{ac}=1000$ Вт



1 – излучающий диск, объединенный с концентратором, 2 – передняя частотопонижающая накладка, 3 – пьезоэлектрические элементы, 4 – задняя частотопонижающая накладка, 5 шпилька

На рисунке показаны максимально возможные размеры

Системы для газовых сред



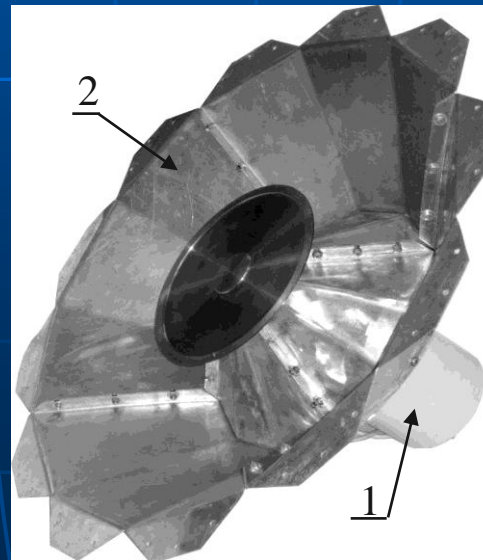
Излучатель в сборе с генератором



Излучатель с фазыравнивающими элементами



Многоэлементная УЗКС с фокусирующим излучателем



Излучатель в сборе с отражателем

1 – ультразвуковая колебательная система;
2 – отражатель

Дисковые системы для распыления

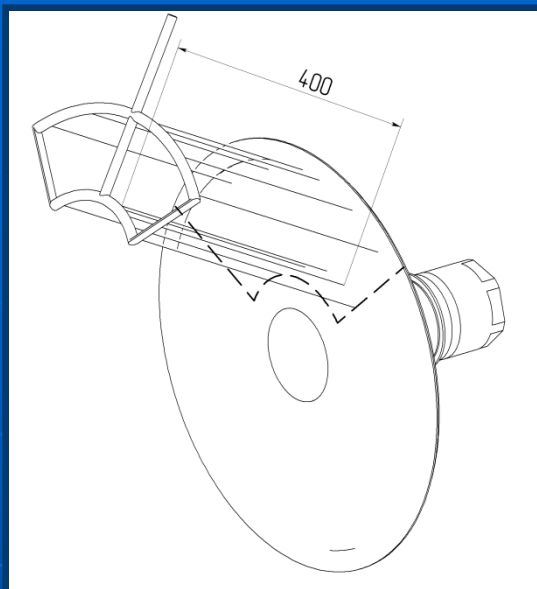


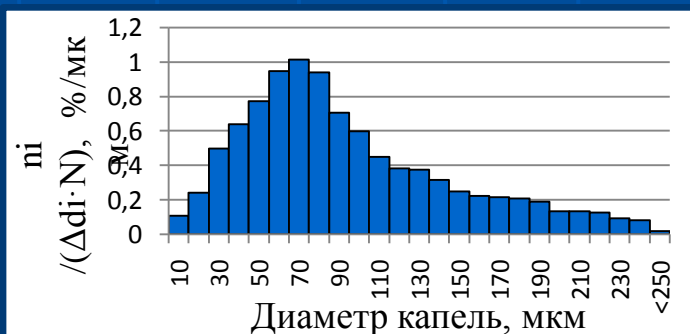
Схема подачи жидкости



Фото распылителя



Переносное



Гистограмма распределения капель

Технические характеристики:

Средний диаметр капель (d_{32}), мкм	100
(197)	
Среднеквадратичное отклонение, мкм	68
Производительность (Диск $D=400$ мм), л/ч	1100
Потребляемая мощность, кВт/час	0,35

Сравнение энергетической эффективности способов диспергирования

Ультразвуковой
от 0,35 кВт
на 1 т.



Гидравлический
2 – 4 кВт на 1 т.



Механический
15–23 кВт на 1 т.



Пневматический
50–60 кВт на 1 т.

Монография про ультразвуковые колебательные системы

