

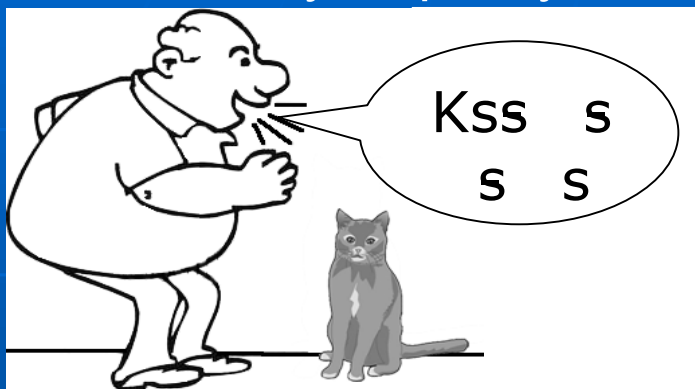
**Лаборатория акустических процессов
и аппаратов**

Ультразвук

***Физические основы
и технологическое применение***

Что такое ультразвук

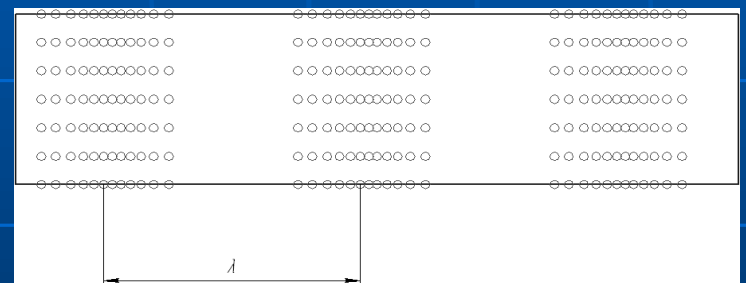
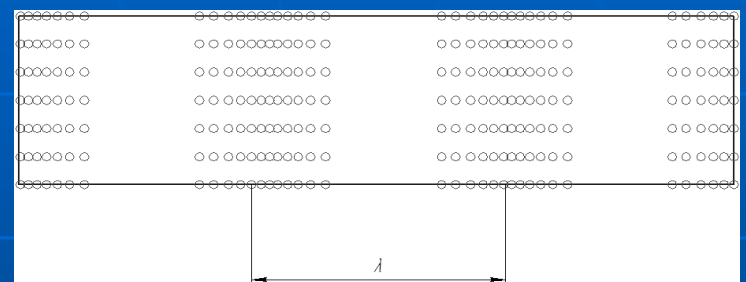
Человек и ультразвук



$$l = \frac{c}{f}$$

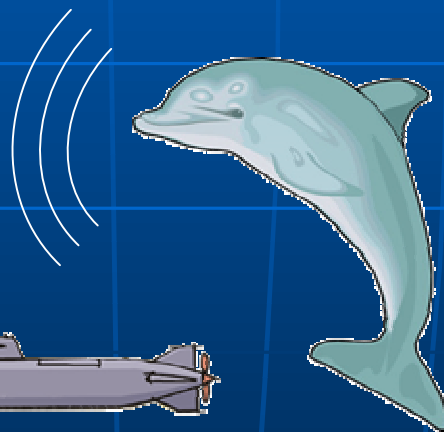
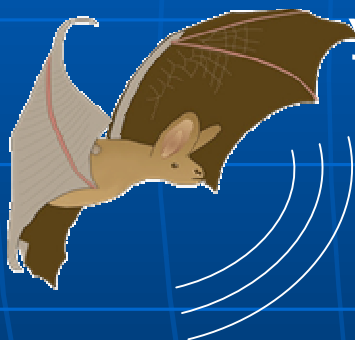
$$T = \frac{1}{f}$$

Физический смысл



Упругие колебания в материальных средах

Ультразвук в природе



Граница ультразвукового диапазона

16...20 кГц

Граница слышимости человеком

25...100 мГц

Расстояние между молекулами в кристаллах

Ультразвук и звук. Различия

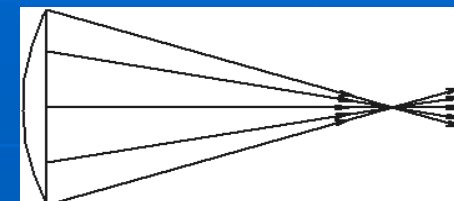
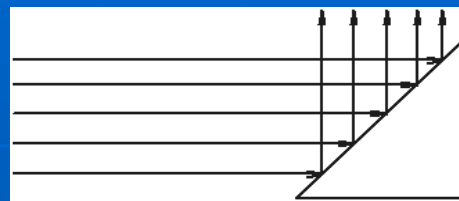
$$f_{зв} \sim 1,5 \text{ - } 16 \text{ кГц} \quad f_{уз} \sim 25 \text{ - } 150 \text{ кГц}$$

ВОДА $c = 1500 \text{ м/с}$

$$l_{зв} = \frac{c}{f} = \frac{1500}{1500} = \underline{1 \text{ м}}$$

$$l_{уз} = \frac{1500}{1,5 \cdot 10^3} = \underline{1 \text{ см}}$$

Достоинства ультразвука



Возможность: направлять

фокусировать

Твердые тела – жидкости- газы

Металлы

Полимеры

Проводники

Диэлектрики

Прозрачные

Непрозрачные

$$P \sim f^2$$



$0,000001 \text{ Вт/см}^2$



$0,01 \text{ Вт/см}^2$



100 Вт/см^2

$P = 5 \text{ Вт}$

$f = 20000 \text{ Гц}$

Промышленное применение

**Ультразвуковые колебания
низкой интенсивности**

Измерение
технологических
параметров

Расходомеры

Анализаторы

Неразрушающий
контроль

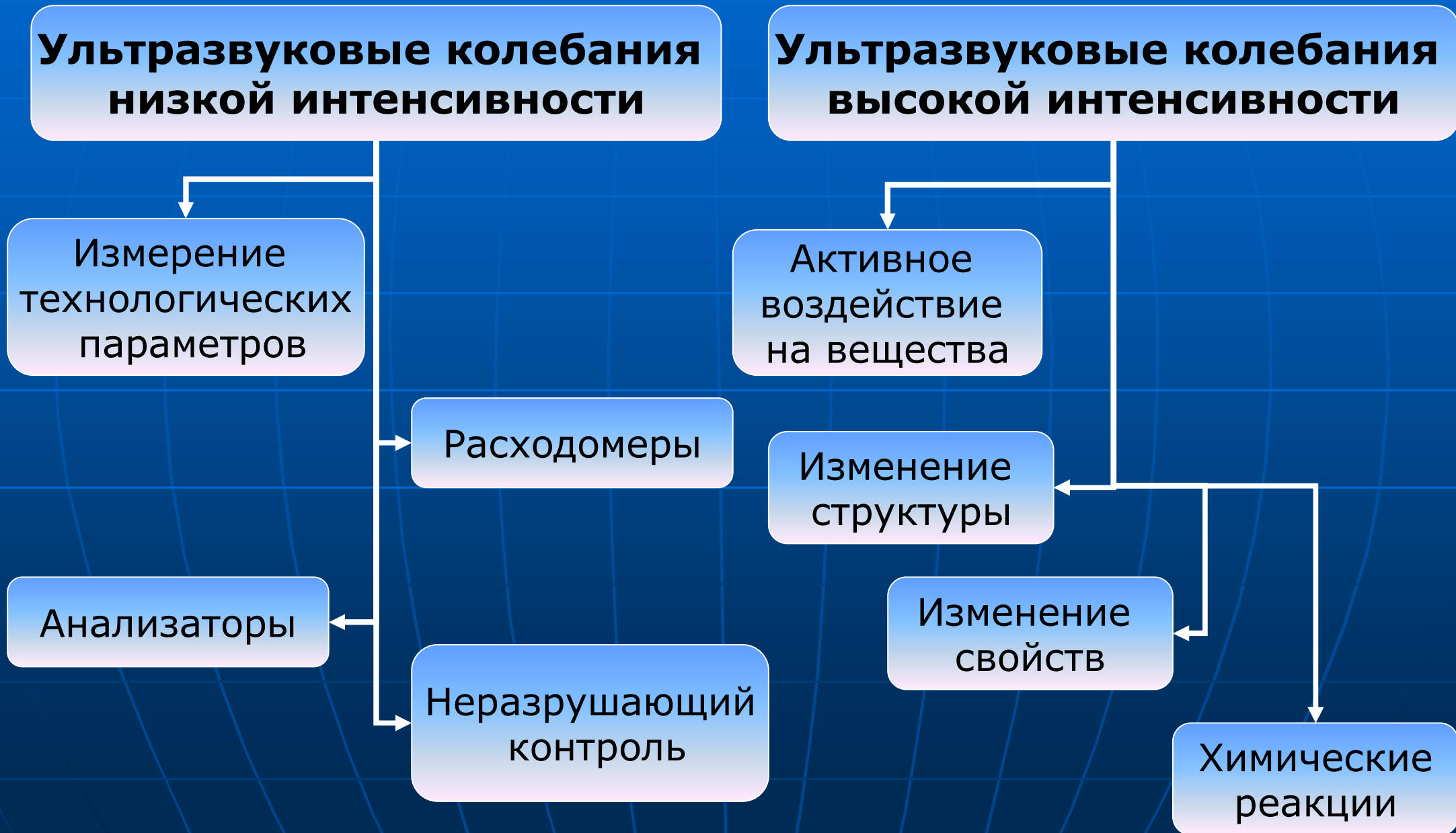
**Ультразвуковые колебания
высокой интенсивности**

Активное
воздействие
на вещества

Изменение
структуры

Изменение
свойств

Химические
реакции



Источники ультразвуковых колебаний ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

5

Аэродинамические

Гидродинамические

Электромеханические

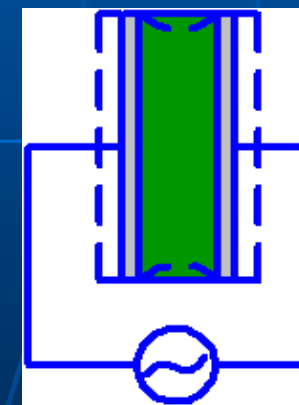
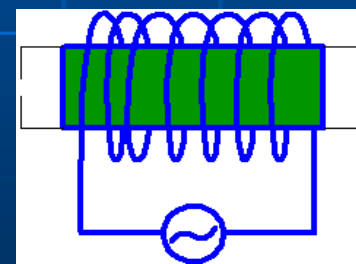
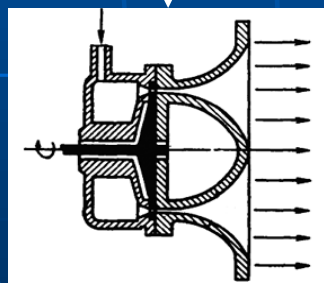
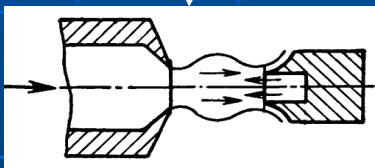
Статические
сирены.
Газоструйные
излучатели

Динамические
сирены

Пластинчатые

Магнитострикционные

Пьезоэлектрические



$f \leq 20$ кГц
Низкий КПД < 25%

$f \leq 10$ кГц
Низкий КПД < 10%

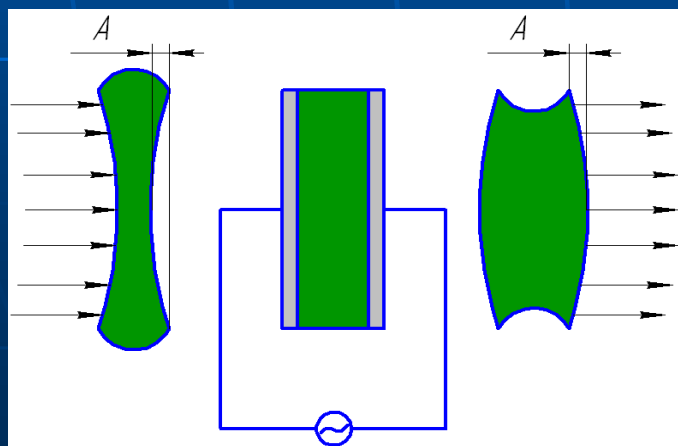
$f \leq 100$ кГц
Водяное
охлаждение
КПД < 40%

$f \leq 25$ мГц
Ткюри ~ 300К
КПД $\geq 50\%$
Безинерционность

Пьезоэлектрические преобразователи

Пьезоэффект
Поляризация
диэлектрика при
сжатии

Обратный
пьезоэффект

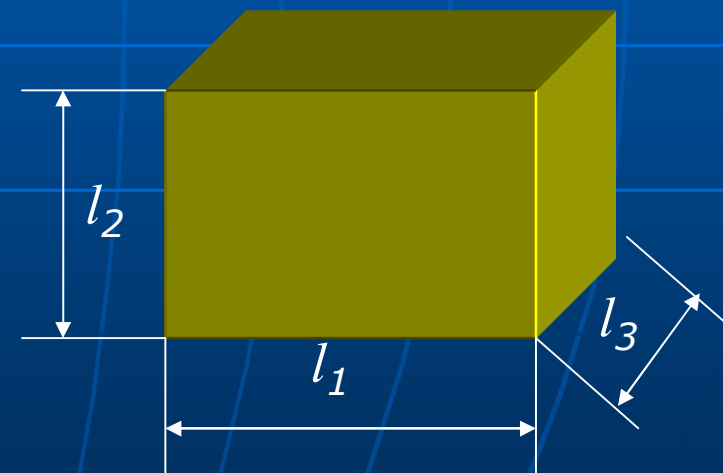
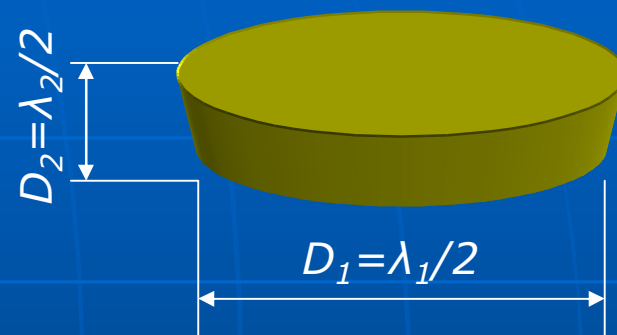


Пьезоматериалы

Природный кварц
1000В 1мкм/см

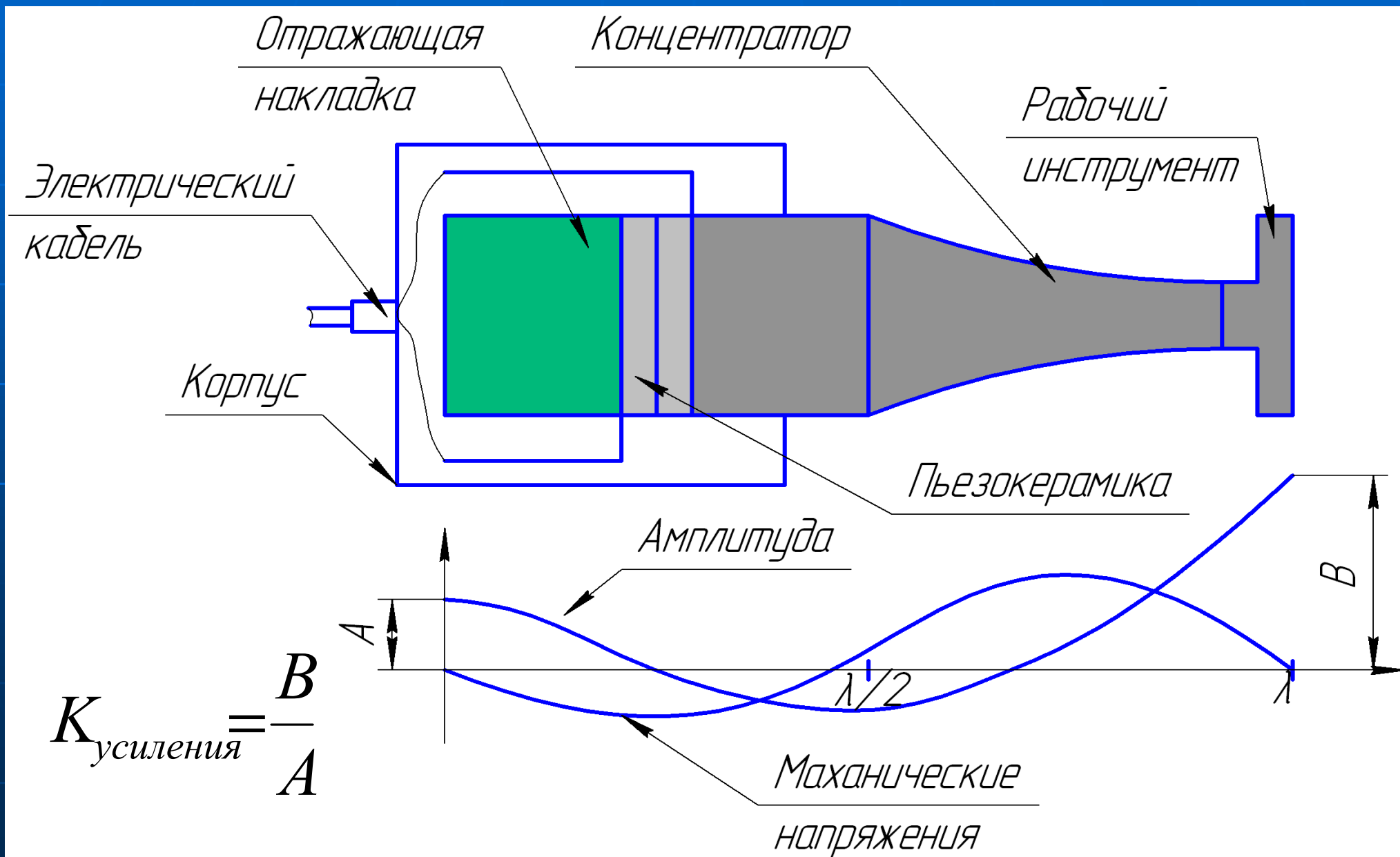
Искусственные
Пьезоматериалы
1000В-50мкм/см
Цирконат-титанат
свинца
PZT-5, PZT-8 (ЦТС-
23), APC-841

Пьезоэлементы



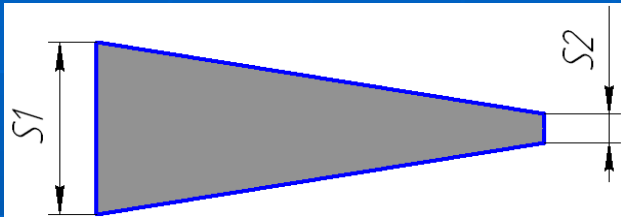
$$f_1 = \frac{2c}{l_1}, f_2 = \frac{2c}{l_2}, f_3 = \frac{2c}{l_3}$$

Ультразвуковая колебательная система



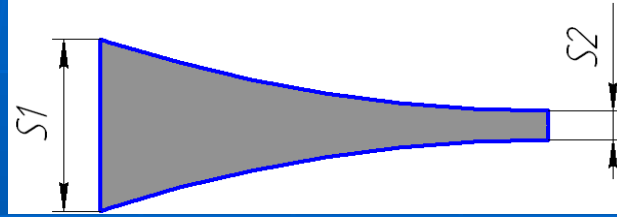
Усилители ультразвуковых колебаний

Конический



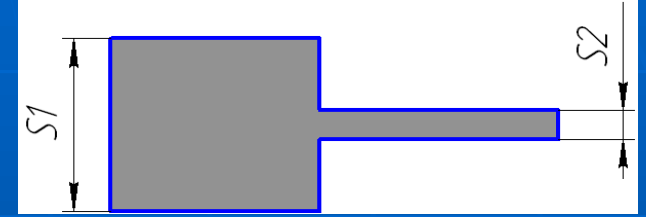
$$K = 0.8 \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} \quad Q=40$$

Экспоненциальный



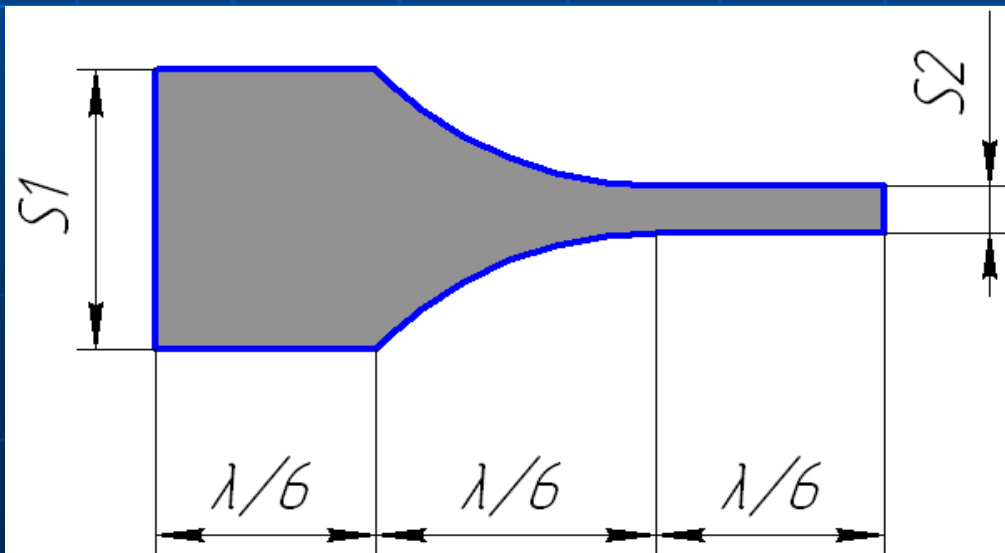
$$K = 1,1 \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} \quad Q=20$$

Ступенчатый



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

Ступенчато-экспоненциальный концентратор



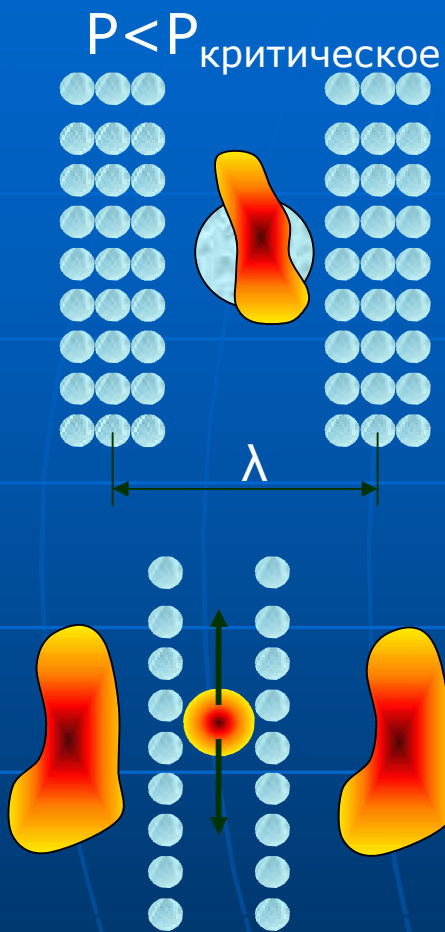
$$K = (0.8-0.9) \frac{S_1}{S_2} \quad K=10 \dots 15$$

$$\rho_{\text{С пьезо керамики}} =$$

$$= \rho_{\text{С среды (воды)}}$$

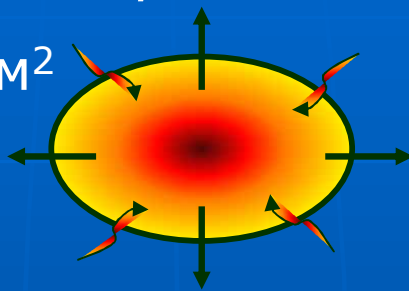
Кавитация

Образование

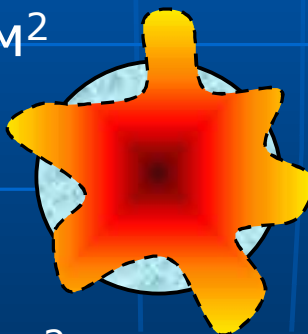
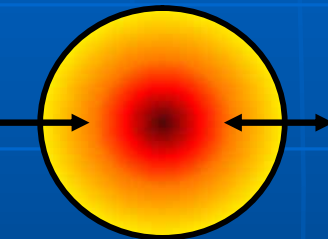


Стадии развития

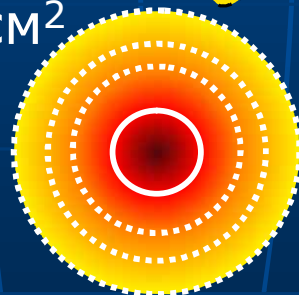
$I \sim 1 \text{ Вт/см}^2$



$I > 1,5 \text{ Вт/см}^2$



$I > 2,5 \text{ Вт/см}^2$

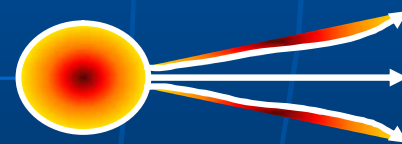
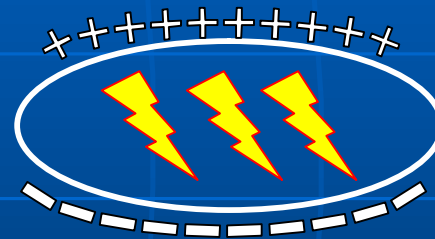


Действующие факторы

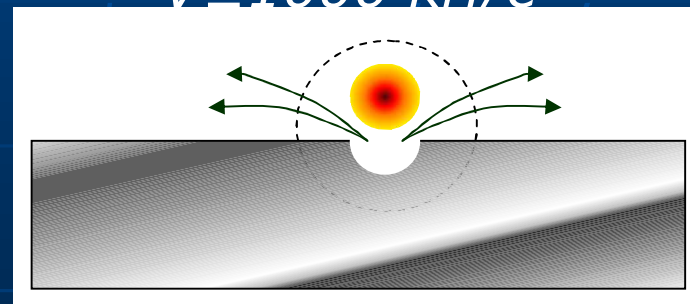
$P \geq 5000 \text{ атм}$

$T \geq 10\ 000 \text{ К}$

$U > 1\ 000\ 000 \text{ В}$



$V \geq 1000 \text{ км/с}$



$P_{\text{критическое}} = 1500 \text{ кгс/см}^2$
 Зародыши кавитации
 (микроскопические газовые
 пузырьки)

Достигаются условия протекания термоядерных реакций

Эффекты кавитации

Колеблющиеся
пузырьки

Волны
давления

Захлопывающиеся
пузырьки

Ударные
волны

Изменения
плотности в среде

Перепады акустического
давления в среде

Быстрые микропотоки и общие течения

Механохимические
реакции

1. Люминисценция
2. Эрозия
3. Активные радикалы
4. Диссоциирование молекул

Появление новых
веществ

1. Надперикиси
2. Ионы азотной кислоты
3. $(\text{H}_2\text{O}-\text{O}_2)(\text{ONO}_2)$
4. Свободные электроны

Звукохимические
реакции

1. Реакции в парогазовой среде пузырька
2. Диффузия в жидкость
3. Реакции в жидкости

Ускоряются реакции
протекавшие без
ультразвука за счет

1. Увеличения поверхности взаимодействия
2. Уменьшения пограничного слоя

Реакции с разрывом
химических связей

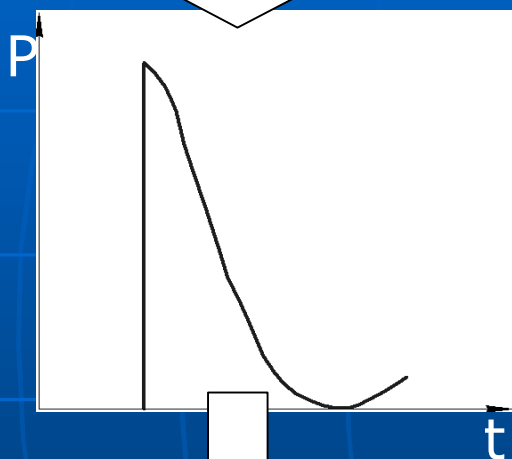
1. Изменение ориентации молекул
2. Изменение свойств молекул
3. Разрыв молекул

Проявления кавитации

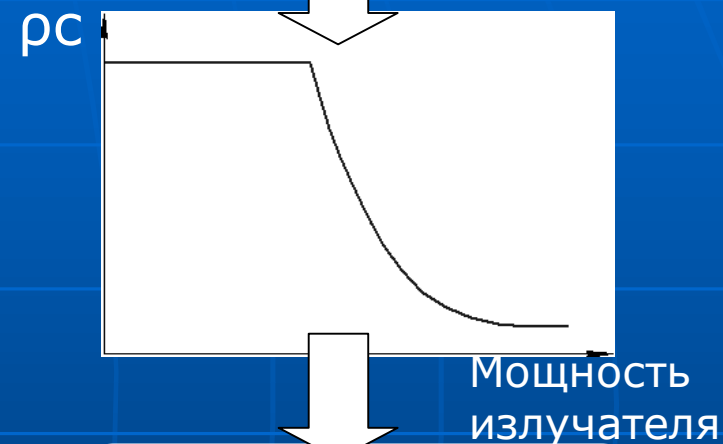
Разрушение
(твердых тел,
поверхностей)

Локальный
разогрев

Уменьшение волнового
сопротивления среды



Выделение газа с
атомарной и
ионизированной
составляющей



Рост частоты
уменьшает
разрушение, но
усиливает потоки

Рост статического
давления приводит
к росту числа
кавитационных
пузырьков

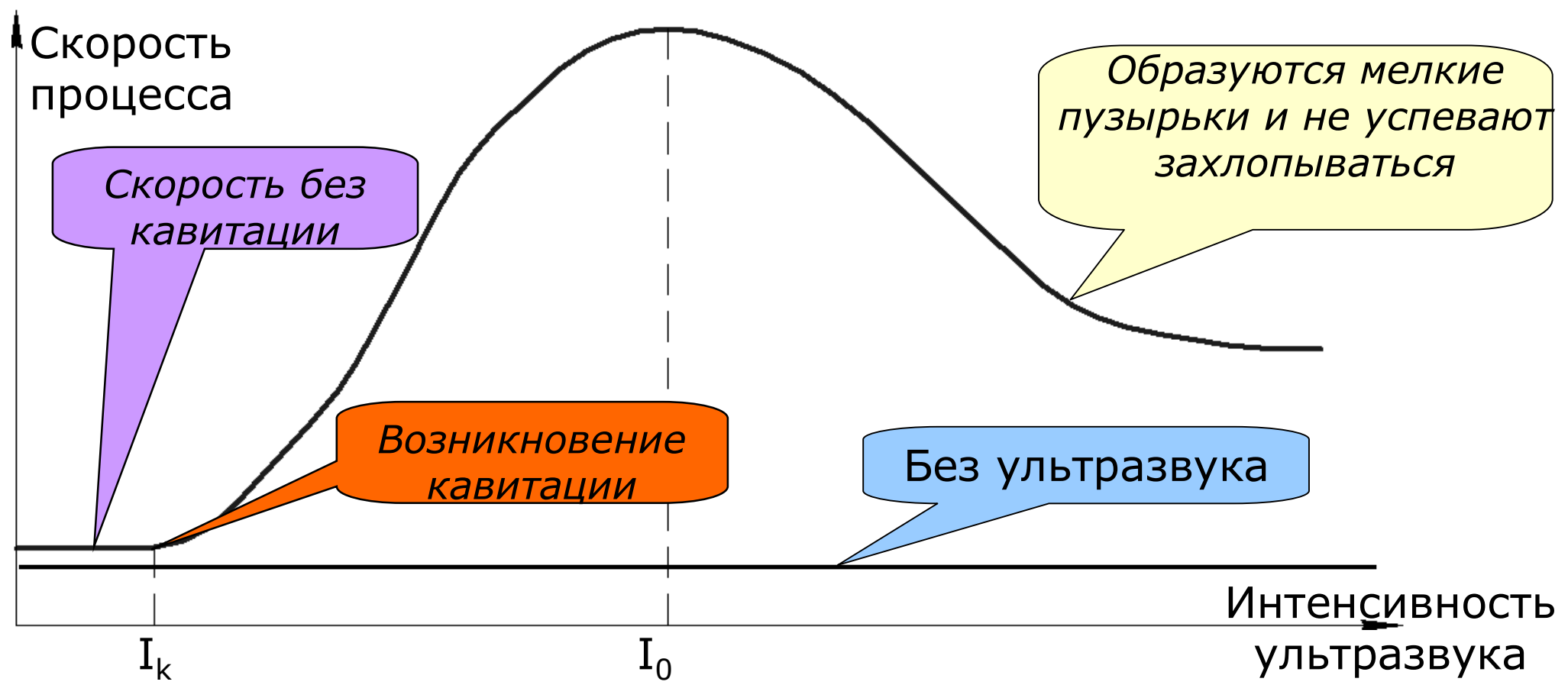
Рост мощности
излучателя
ограничивает
интенсивность
излучения в среду

Частота
ультразвуковых
колебаний

Создание условий
для увеличения
кавитационных
пузырьков

Оптимизация
ультразвукового
воздействия по
интенсивности излучения

Зависимость скорости процессов от параметров кавитации



$I_k = 1 \text{ Вт/см}^2$ – Вода

$I_k = 4 \text{ Вт/см}^2$ – Масло

$$I_k \sim f(\omega)$$

$$I_0 = f(P, \rho, c, \eta)$$

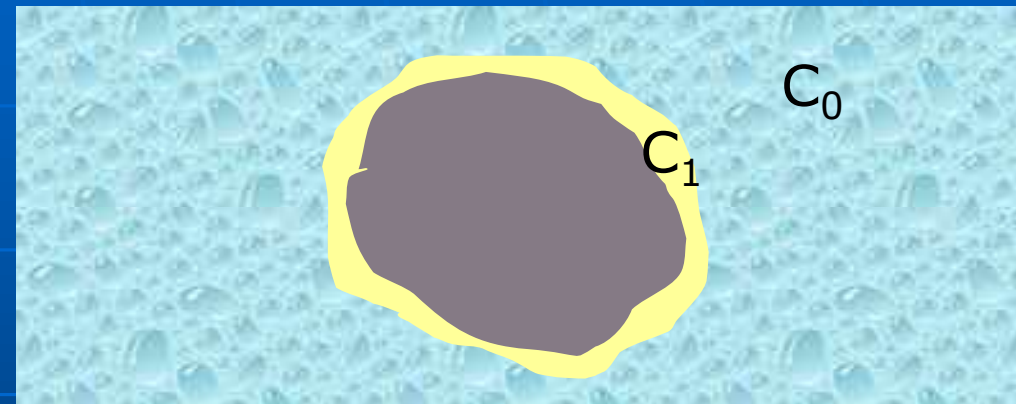
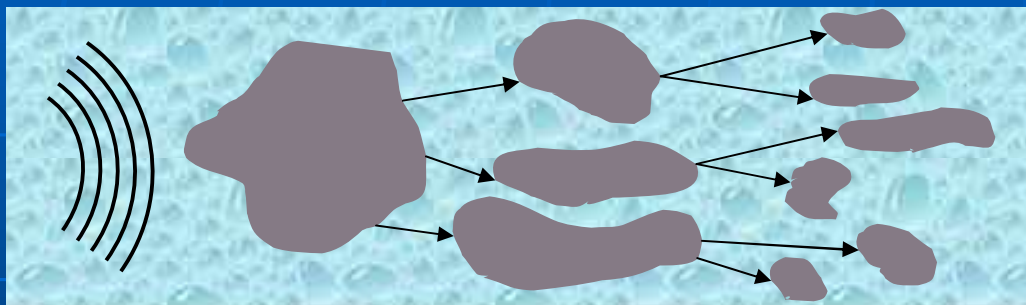
Скорость процесса = Скорость образования радикалов

Механизм ускорения процессов в жидкостях

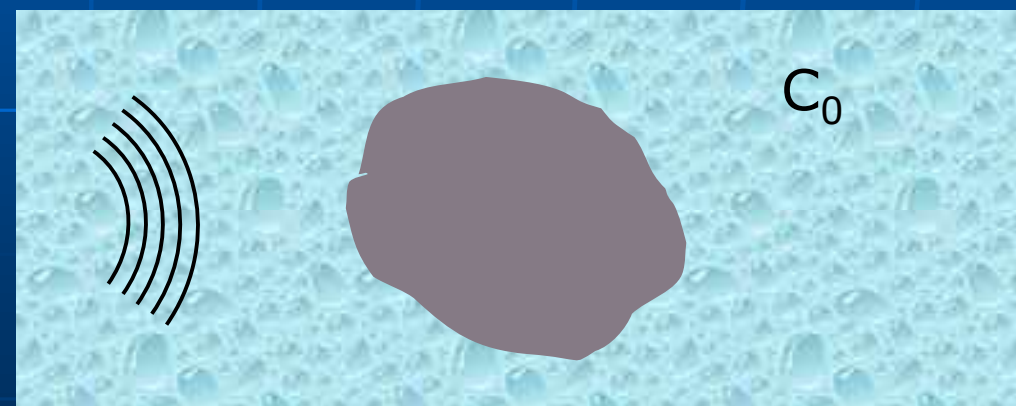
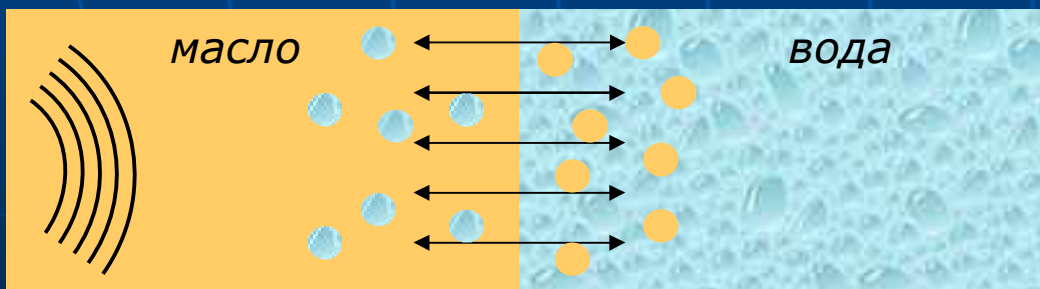
Воздействие на поверхность взаимодействия

Воздействие на пограничный слой

1. Диспергирование



2. Эмульгирование



Увеличение межфазной поверхности взаимодействия

Кавитационные потоки воздействуют на пограничный слой (смывают его)

Интенсификация процессов в жидких

средах

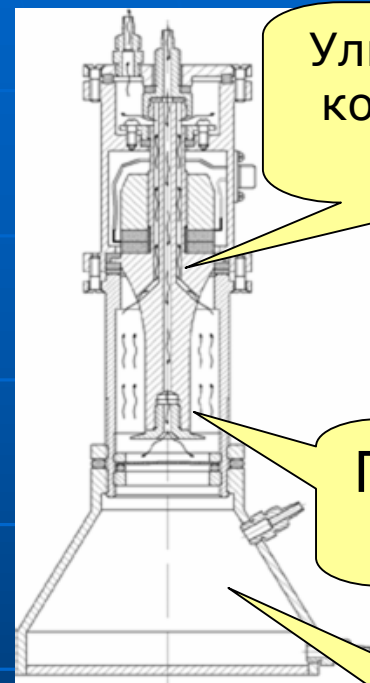
Процессы массообмена

- 1. Экстракция растительного сырья $f=20...300$ кГц
 - 100...10000 раз
 - Увеличение выхода
 - Стерилизация
- 2. Разделение многокомпонентных систем
- 3. Деэмульгирование
- 4. Коагуляция гидрозолей
- 5. Дегазация
- 6. Кристаллизация
- 7. Предотвращение кристаллизации

Химические реакции

- Разрыв химических связей веществ в кавитационном пузырьке и на его поверхности
- 1. Окислительно-восстановительные реакции
 - 2. Деполимеризация
 - 3. Полимеризация

Требования к аппаратуре



Ультразвуковая колебательная система

Проточный объем

Объем



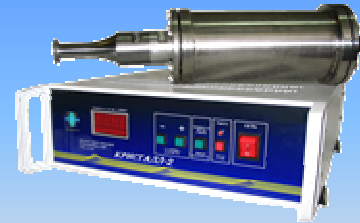
120Вт



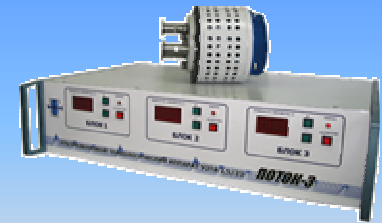
200Вт



400Вт



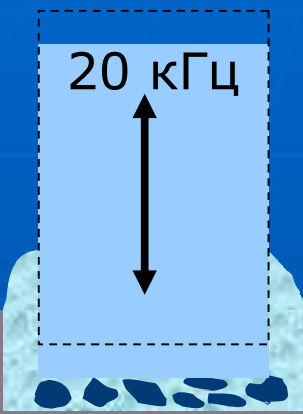
1000Вт



3000Вт

Интенсификация процессов в твердых телах

Обработка хрупких и особо твердых материалов



«Сапфир-2»

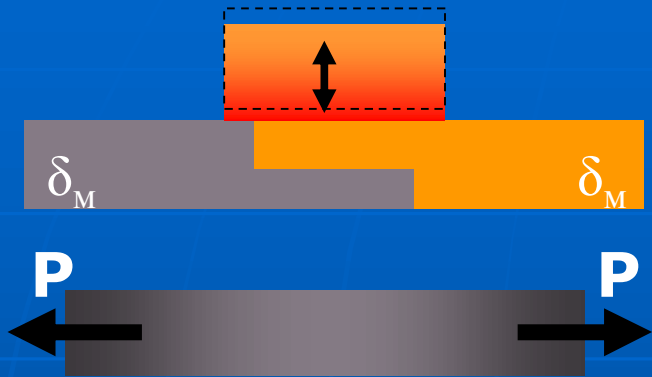
- Результаты**
- Энергоемкость < 10 Дж/см³
 - Скорость > 10 мм/с
 - Отсутствие трещин
 - Диаметр от 1 до 120 мм

1. Ударное воздействие абразивных частиц
2. Циркуляция и смена абразива

«Сапфир»



Интенсификация сварки



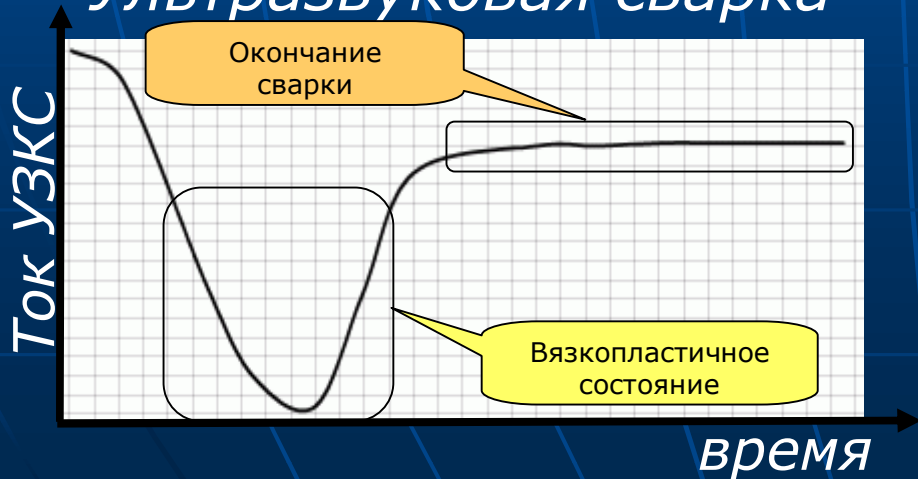
$$\delta_{\text{шва}} > 70\% \delta_{\text{материала}}$$

Ускорение диффузии в
1 000 000 раз

$$T_{\text{сварки}} < T_{\text{плавления}}$$



Ультразвуковая сварка



Медицина

Получение
лекарственных
аэрозолей

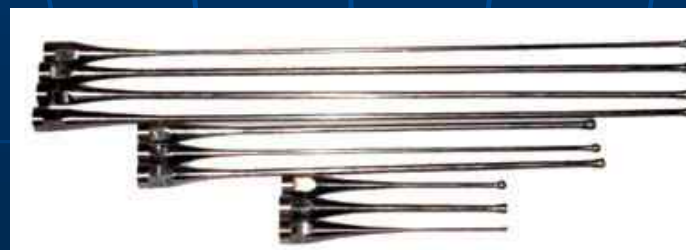
Липосакция

Герметизация
контейнеров
с препаратами крови

Аэрозоли, размер
частиц ~ 50 мкм при
частоте
ультразвукового
воздействия 20 кГц

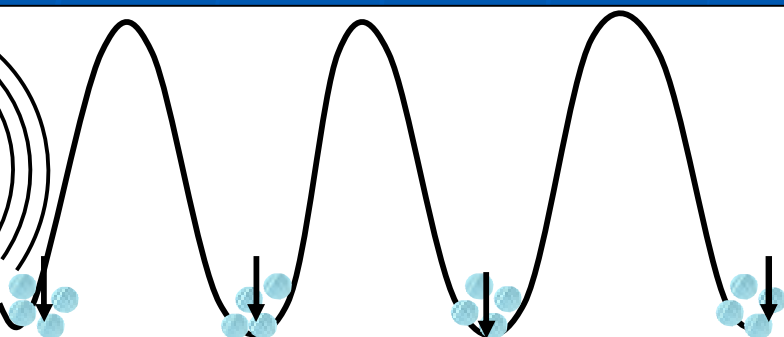
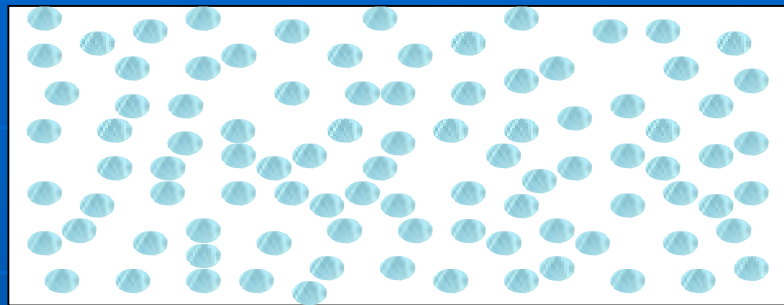
$T < T_{\text{плавления}}$
Отсутствие газов
Сварка по загрязнению

- Скорость
- Качество
- Безопасность



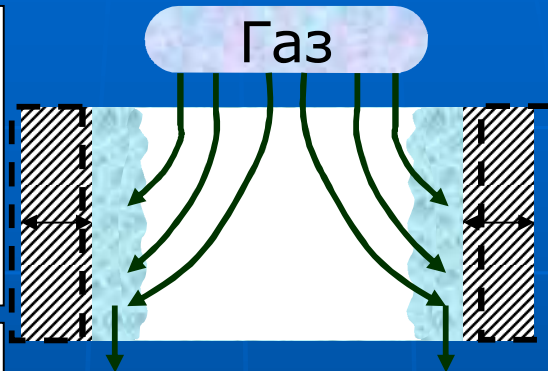
Интенсификация в газах

Акустическая коагуляция



$I = 140 \dots 150$ дБ

Абсорбция



Газ

$I = 150 \dots 160$ дБ

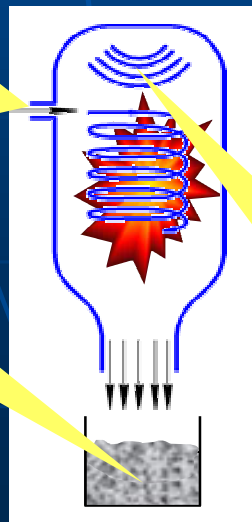
Горение

Ультразвуковая сушка

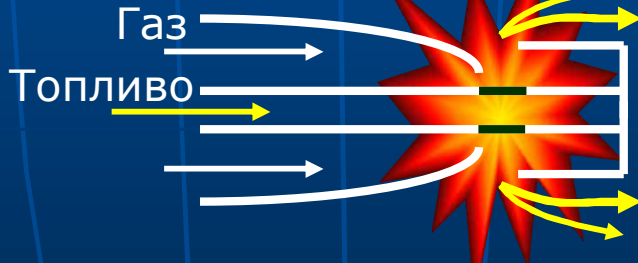
- Сушка без нагрева материала
- Нижняя граница ускорения (135 140 дБ)
- Нет зависимости от частоты
- Тонкий слой (2 3 см)

Газ
50 60 м³

Сажа
90%



$I = 10 \text{ Вт/см}^2$
(160 дБ)
 $f = 35 \text{ кГц}$

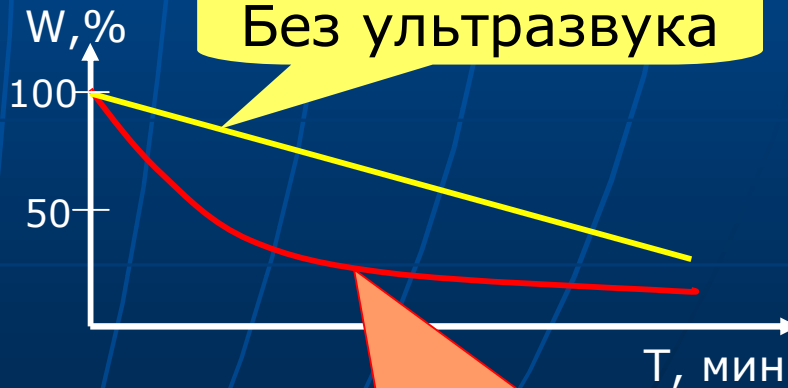


Газ

Топливо

$I \sim 150$ дБ

$\text{CO} < 1\%$



20 кГц, 156 дБ, 20°C

Ультразвук в домашних условиях

Экстракция и перемешивание

- Увеличение скорости экстракции в 100-10000 раз.
- Получение стойких эмульсий типа «Вода-масло».
- Увеличение скорости растворения в сотни раз.



Резка продуктов

Получение минимальных порций пищевых продуктов (тесто, сыры, кексы, колбасы) без образования отходов (крошки).



Обработка молока

- Стерилизация молока.
- Снижение обсемененности
- Повышение питательной ценности молока.
- Уменьшение размера жировых шариков.



Приготовление пищи

1. Получение, кетчупов, соусов, шоколада.
2. Обработка мяса
3. Обработка дрожжей.
4. Засолка, копчение.

