

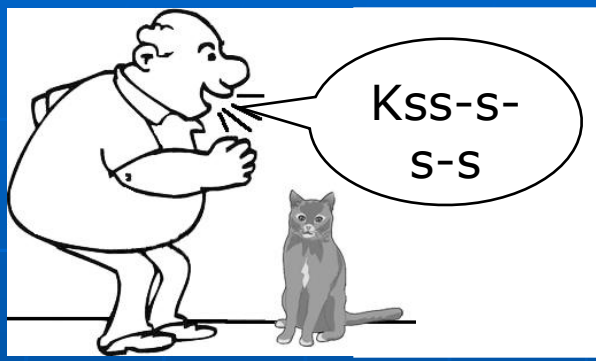
**Лаборатория акустических
процессов и аппаратов**

Ультразвук

***Физические основы
и технологическое применение***

Что такое ультразвук

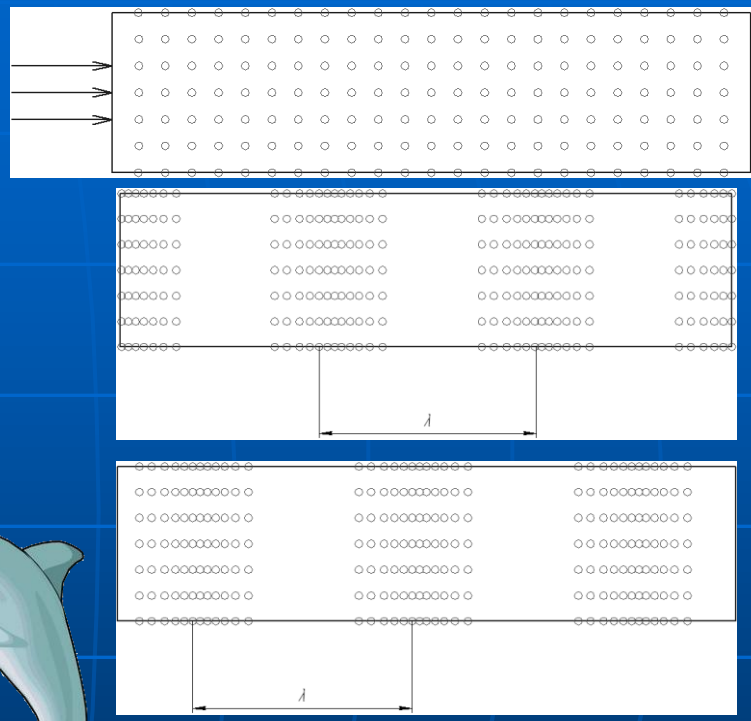
Человек и ультразвук



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

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

Физический смысл



Ультразвук в природе



Упругие колебания в материальных средах

Граница ультразвукового диапазона

16...20 кГц

Граница слышимости человеком

25...100 мГц

Расстояние между молекулами в кристаллах

Ультразвук и звук. Различия

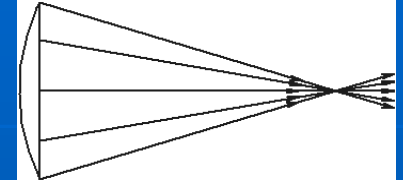
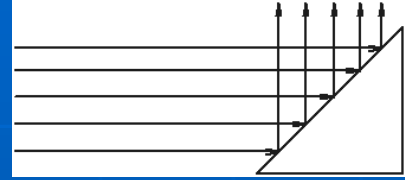
$f_{зв} \sim 1,5-16$ кГц $f_{уз} \sim 25-150$ кГц

Достоинства ультразвука

ВОДА $c=1500$ м/с

$$\lambda_{зв} = \frac{c}{f} = \frac{1500}{1500} = 1м$$

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



Возможность: направлять фокусировать

Твердые тела – жидкости - газы

- Металлы
- Полимеры
- Проводники
- Диэлектрики
- Прозрачные
- Непрозрачные

$P \sim f^2$



0,000001 Вт/см²



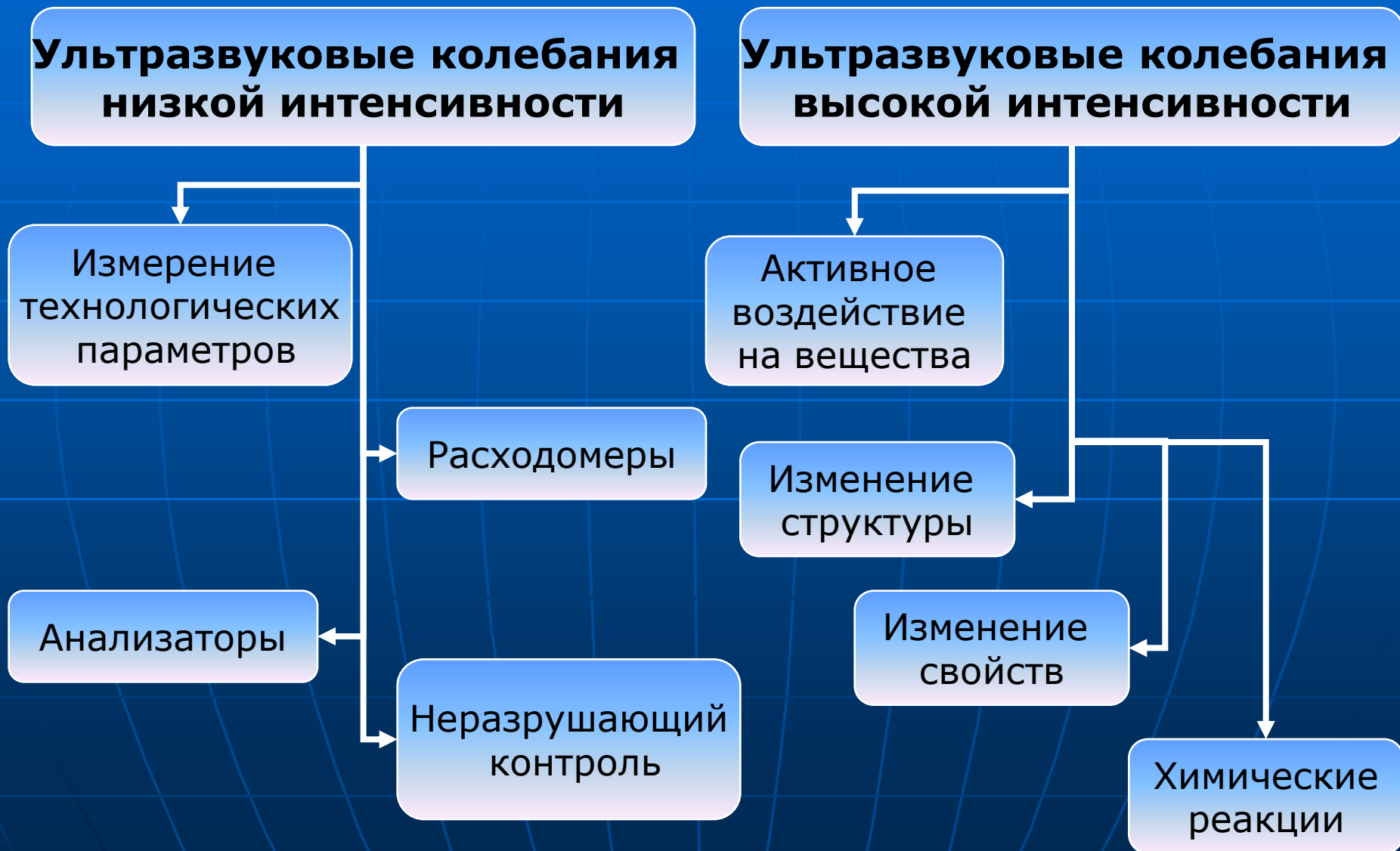
0,01 Вт/см²



100 Вт/см²

$P=5-50$ атм
 $f=20000$ Гц

Промышленное применение



Источники ультразвуковых колебаний высокой интенсивности

Аэродинамические

Гидродинамические

Электромеханические

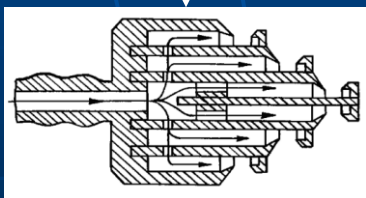
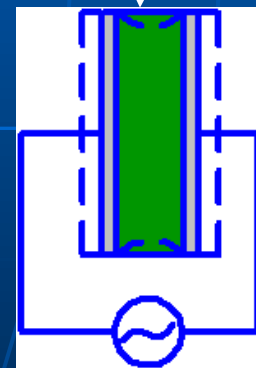
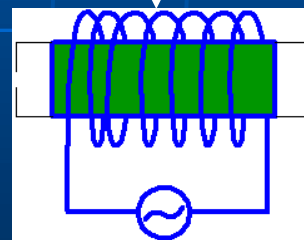
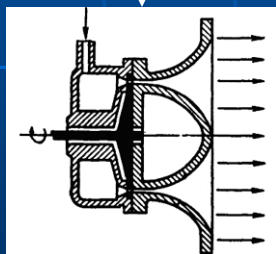
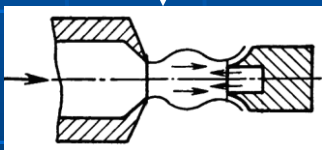
Статические
сирены.
Газоструйные
излучатели

Динамические
сирены

Пластинчатые

Магнитострикционные

Пьезоэлектрические



$f \leq 20$ кГц
Низкий КПД < 25%

$f \leq 10$ кГц
Низкий КПД < 10%

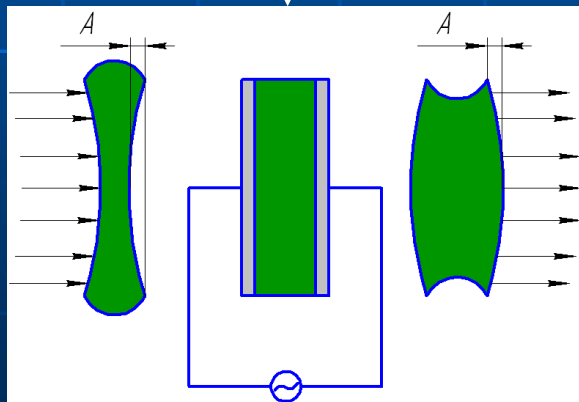
$f \leq 100$ кГц
Водяное
охлаждение
КПД < 40%

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

Пьезоэлектрические преобразователи

Пьезоэффект
Поляризация
диэлектрика при
сжатии

Обратный
пьезоэффект

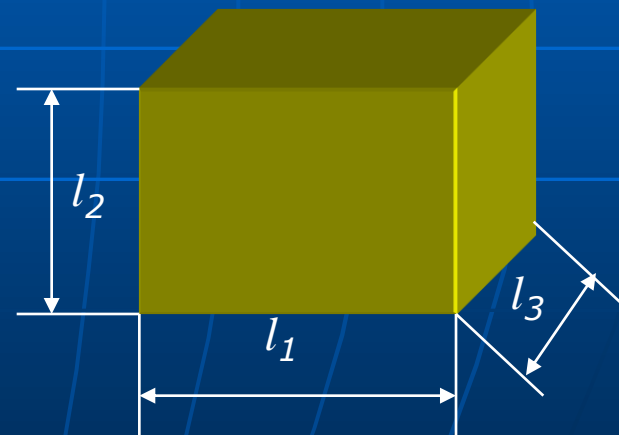
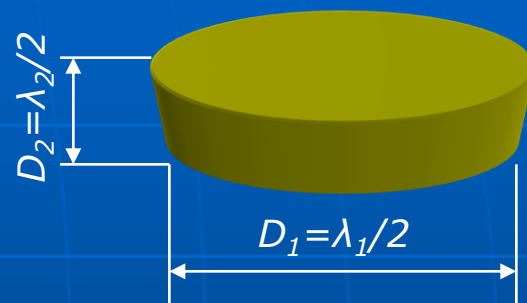


Пьезоматериалы

Природный кварц
1000В- 1мкм/см

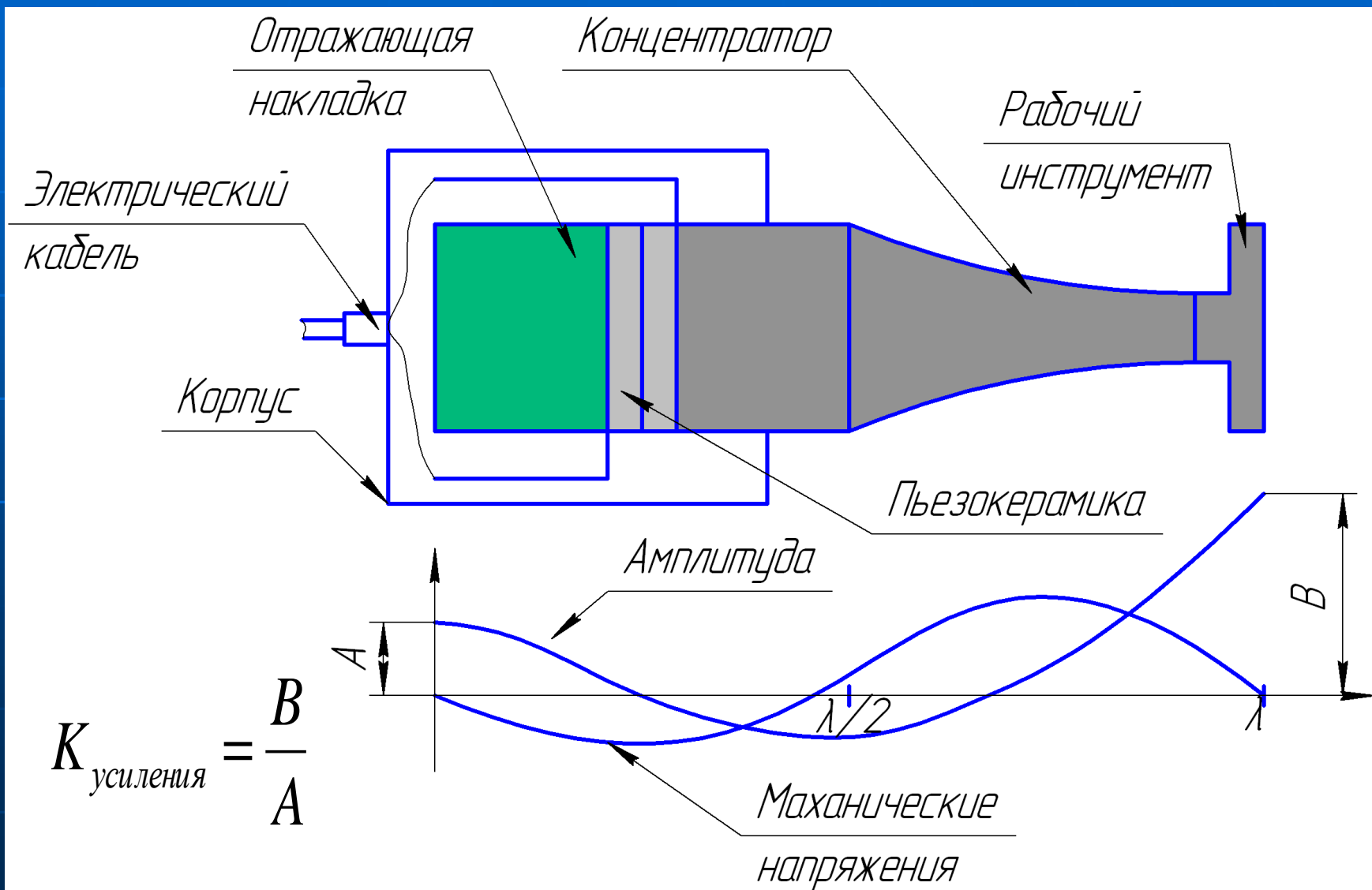
Искусственные
Пьезоматериалы
1000В-50мкм/см
Цирконат-титанат
свинца
PZT-5, PZT-8 (ЦТС-
23), APC-841

Пьезоэлементы



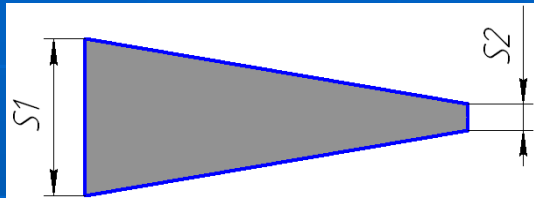
$$f_1 = \frac{2c}{l_1}, f_2 = \frac{2c}{l_2}, f_3 = \frac{2c}{l_3}$$

Ультразвуковая колебательная система

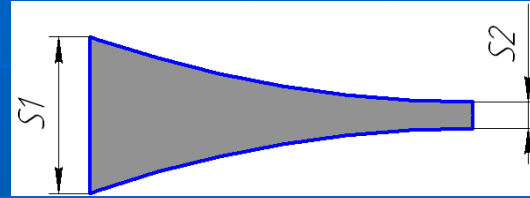


Усилители ультразвуковых колебаний ⁸

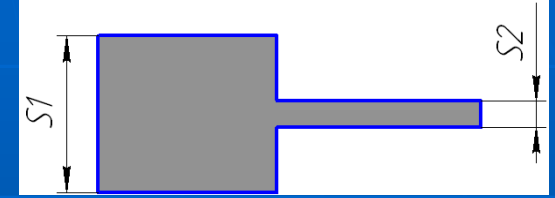
Конический



Экспоненциальный



Ступенчатый

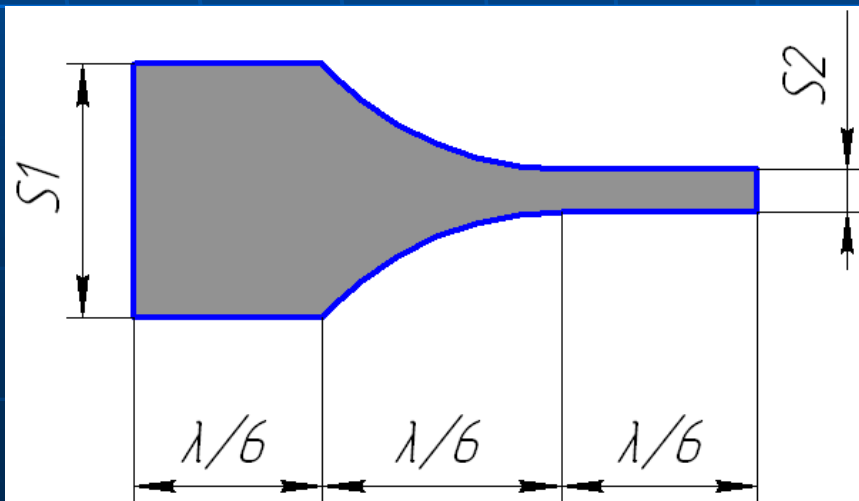


$$K = 0.8 \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} \quad Q = 40$$

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

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

Ступенчато-экспоненциальный концентратор



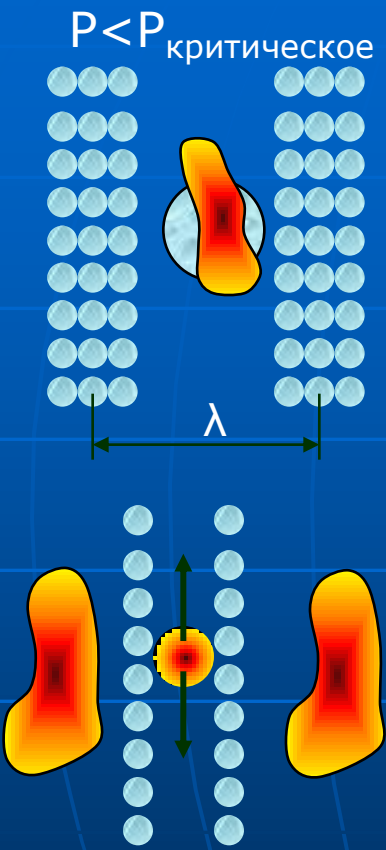
$$K = (0.8 - 0.9) \frac{S_1}{S_2} \quad K = 10 \dots 15$$

$$\rho c_{\text{пьезо керамики}} =$$

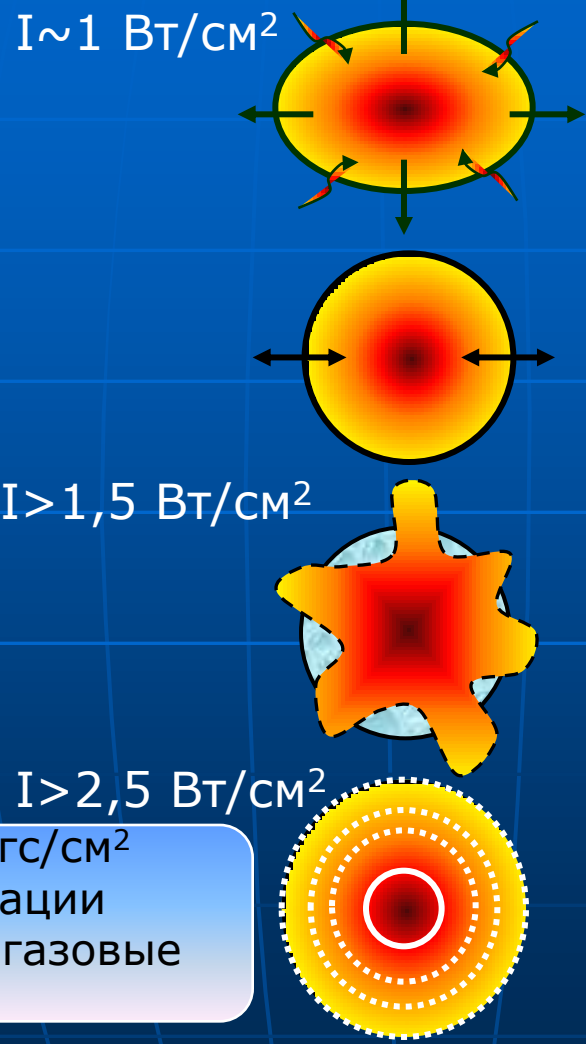
$$= \rho c_{\text{среды (воды)}}$$

Кавитация

Образование

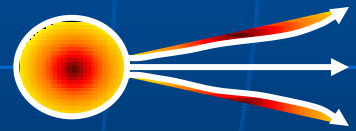
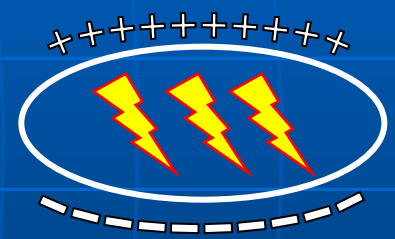


Стадии развития

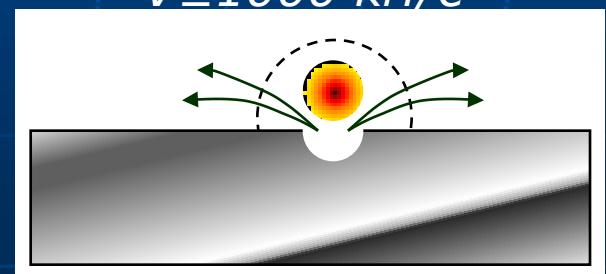


Действующие факторы

$P \geq 5000 \text{ атм}$
 $T \geq 10\ 000 \text{ К}$
 $U > 1\ 000\ 000 \text{ В}$



$V \geq 1000 \text{ км/с}$



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

Достигаются условия протекания термоядерных реакций

Эффекты кавитации

Колеблющиеся
пузырьки

Захлопывающиеся
пузырьки

Изменения
плотности в среде

Волны
давления

Ударные
волны

Перепады акустического
давления в среде

Быстрые микропотоки и общие течения

Механохимические
реакции

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

Реакции с разрывом
химических связей

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

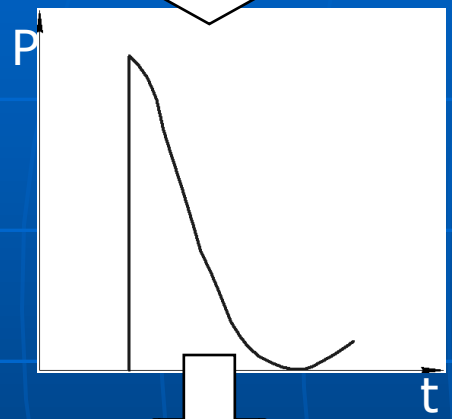
1. Увеличения поверхности взаимодействия
2. Уменьшения пограничного слоя

Проявления кавитации

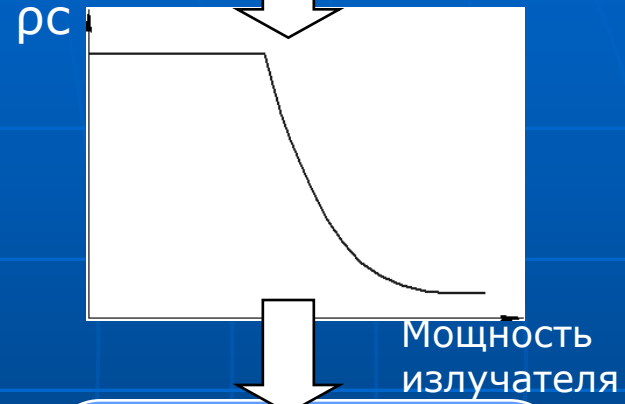
Разрушение (твердых тел, поверхностей)

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

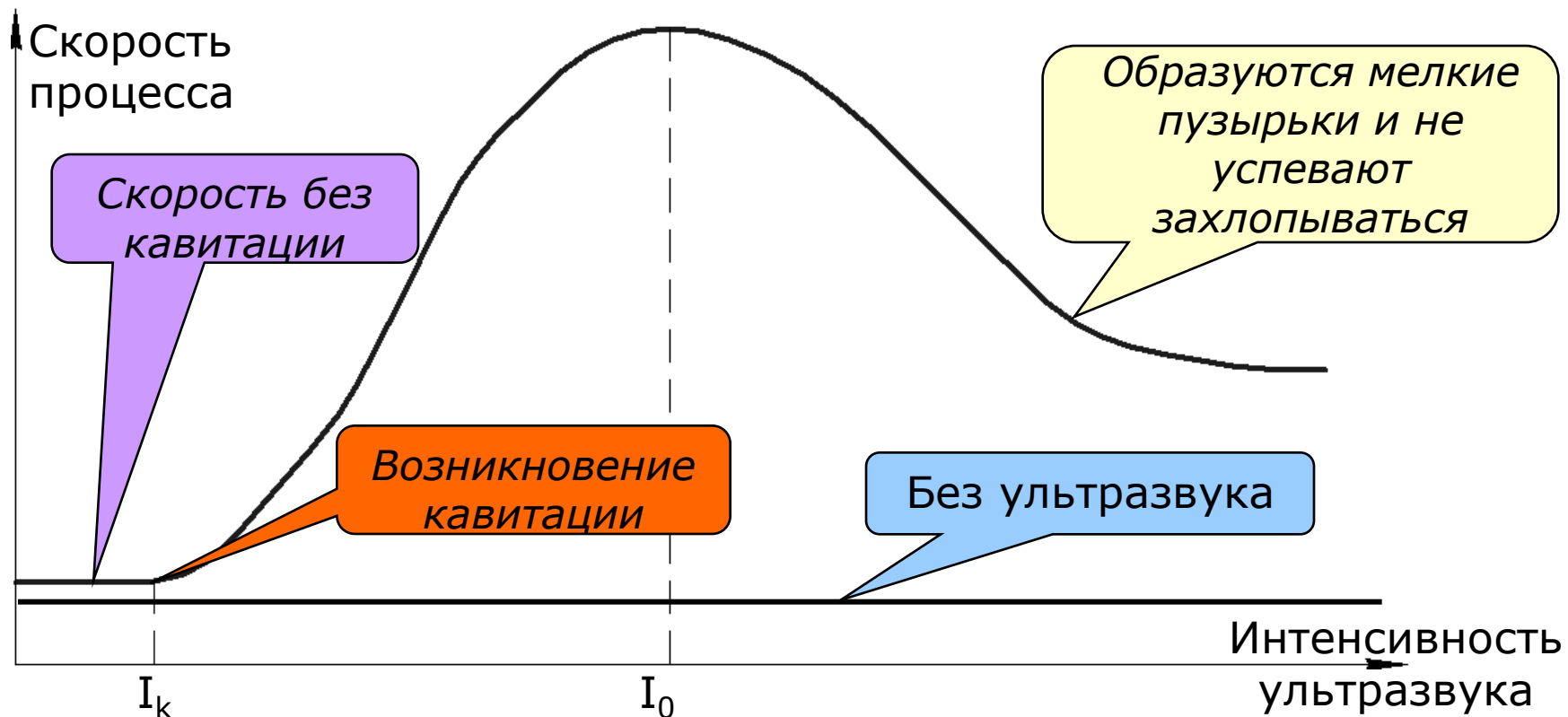
Рост мощности излучателя ограничивает интенсивность излучения в среде

Частота ультразвуковых колебаний

Создание условий для увеличения кавитационных пузырьков

Оптимизация ультразвукового воздействия по интенсивности излучения

Зависимость скорости процессов от параметров кавитации ¹²



$I_k = 1 \text{ Вт/см}^2$ – Вода

$I_k = 4 \text{ Вт/см}^2$ – Масло

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

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

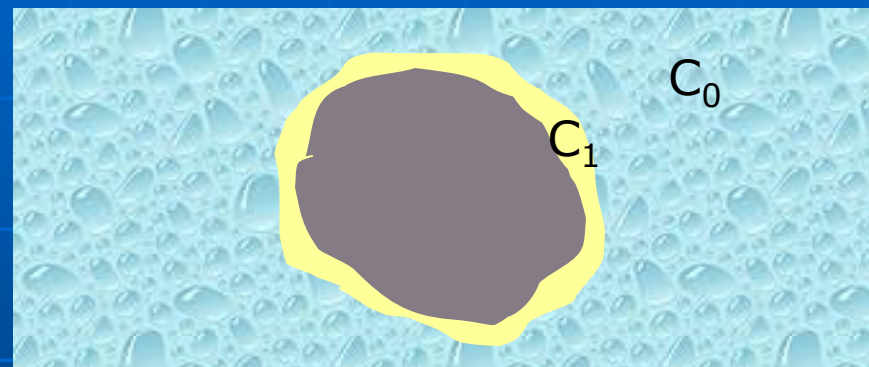
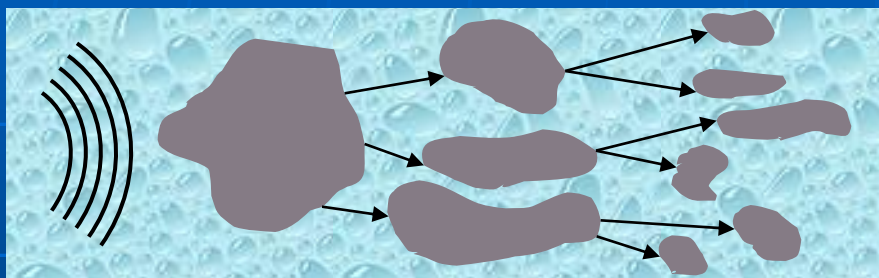
Скорость процесса = Скорость образования радикалов

Механизм ускорения процессов в жидкостях

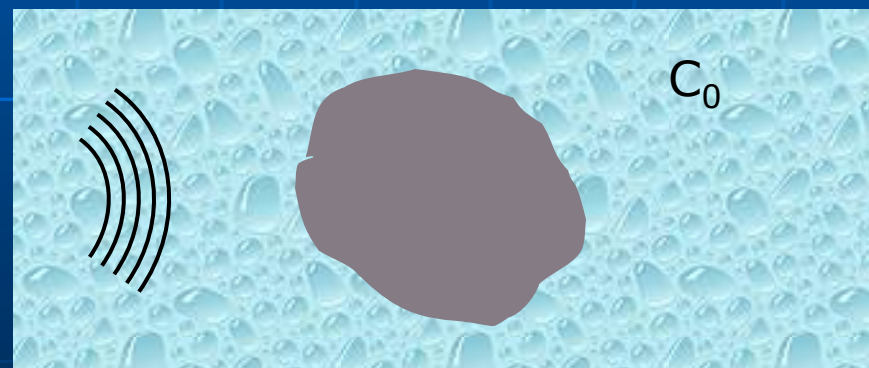
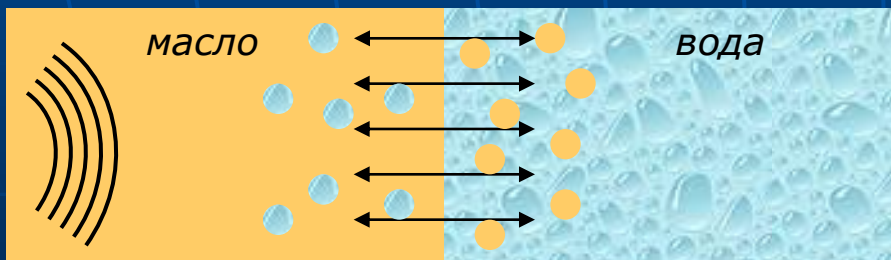
Воздействие на поверхность
взаимодействия

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

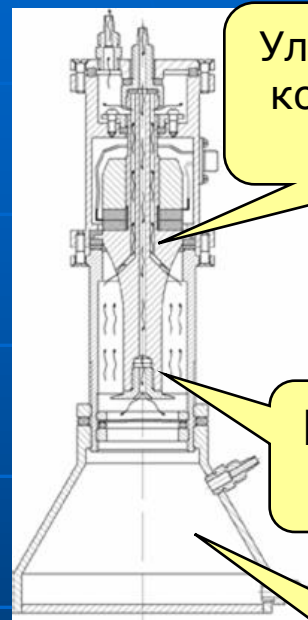
Процессы массообмена

Химические реакции

Требования к аппаратуре

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

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



Ультразвуковая колебательная система

Проточный объем

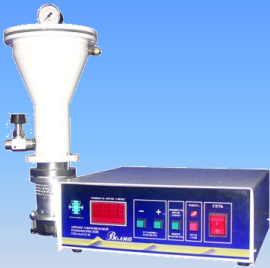
Объем



120Вт



200Вт



400Вт



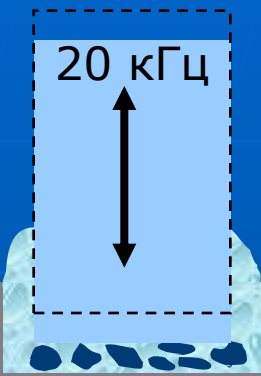
1000Вт



3000Вт

Интенсификация процессов в твердых телах

Обработка хрупких и особо твердых материалов



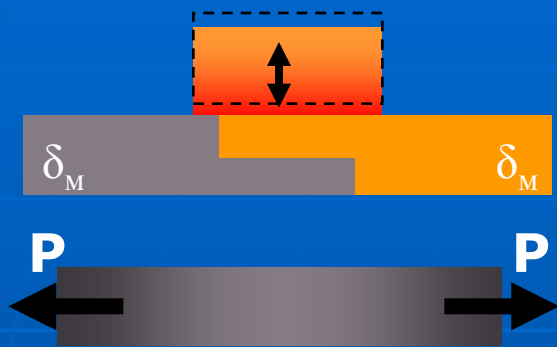
- ### Результаты
- Энергоемкость < 10 Дж/см³
 - Скорость > 10 мм/с
 - Отсутствие трещин
 - Диаметр от 1 до 120 мм

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

«Сапфир»



Интенсификация сварки



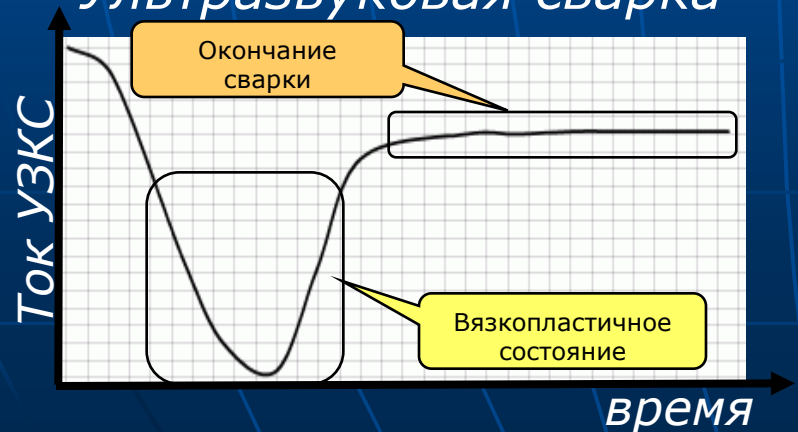
$$\delta_{\text{шва}} > 70\% \delta_{\text{материала}}$$

Ускорение диффузии в
1 000 000 раз

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



Ультразвуковая сварка



Медицина

Получение
лекарственных
аэрозолей

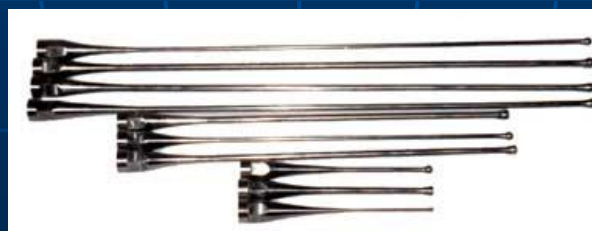
Липосакция

Герметизация
контейнеров
с препаратами крови

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

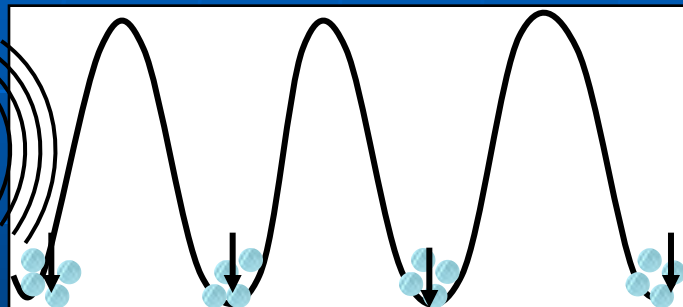
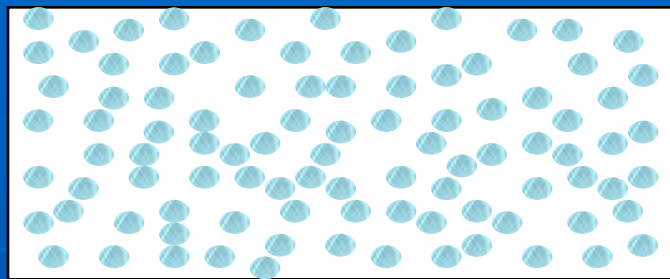
$T < T_{\text{плавления}}$
Отсутствие газов
Сварка по загрязнению

- Скорость
- Качество
- Безопасность



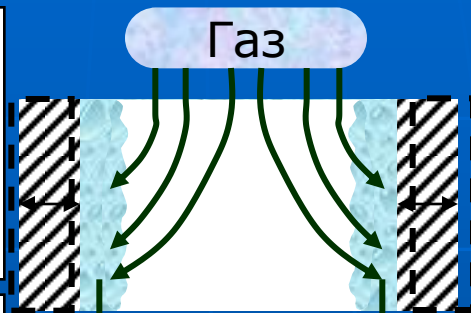
Интенсификация в газах

Акустическая коагуляция



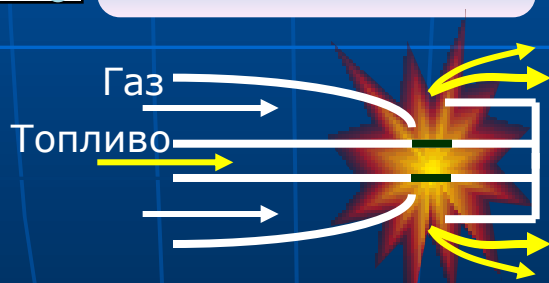
$I = 140...150 \text{ дБ}$

Абсорбция



$I = 150...160 \text{ дБ}$

Горение



$I \sim 150 \text{ дБ}$

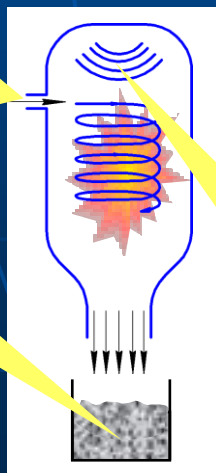
$CO < 1\%$

Ультразвуковая сушка

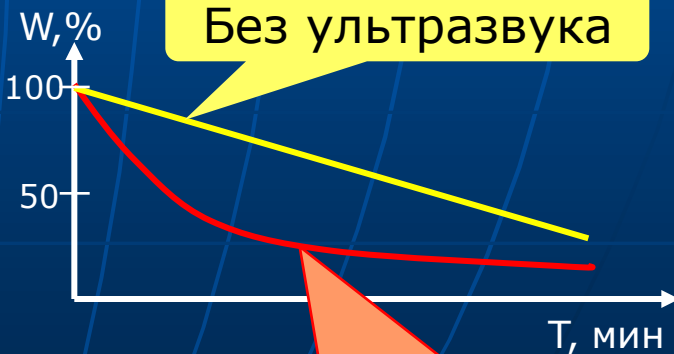
- Сушка без нагрева материала
- Нижняя граница ускорения (135-140 дБ)
- Нет зависимости от частоты
- Тонкий слой (2-3 см)

Газ
50-60 м³

Сажа
90%



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



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.

