

# Виды газоочистного оборудования

## Фильтрующие устройства

Трудности регенерации, большое гидравлическое сопротивление, недостаточная химическая и термическая стойкость

## Мокрые пылеуловители

Возможно изменение физико-химических свойств улавливаемых частиц, образование шлама, необходимость защиты от коррозии

## Виды газоочистного оборудования

### Инерционное газоочистное оборудование

Большое гидравлическое сопротивление, износ стенок, низкая эффективность

### Электрофильтры

Чувствительность к поддержанию параметров очистки, невозможность очистки взрывоопасных смесей

**Эффективность газоочистки ограничивается размерами частиц**

## Способы повышения эффективности улавливания частиц

### Кондиционирование

Подогрев газов

Охлаждение газов

Увлажнение газов

Укрупнение размеров частиц с помощью различных механизмов коагуляции

Ионизация

Турбулизация потока

Использование эффекта конденсации

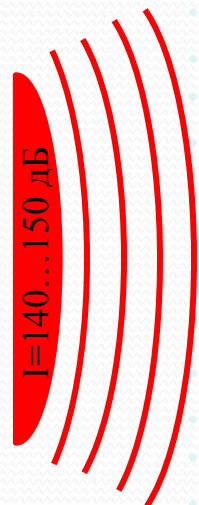
## Акустический способ

### Преимущества:

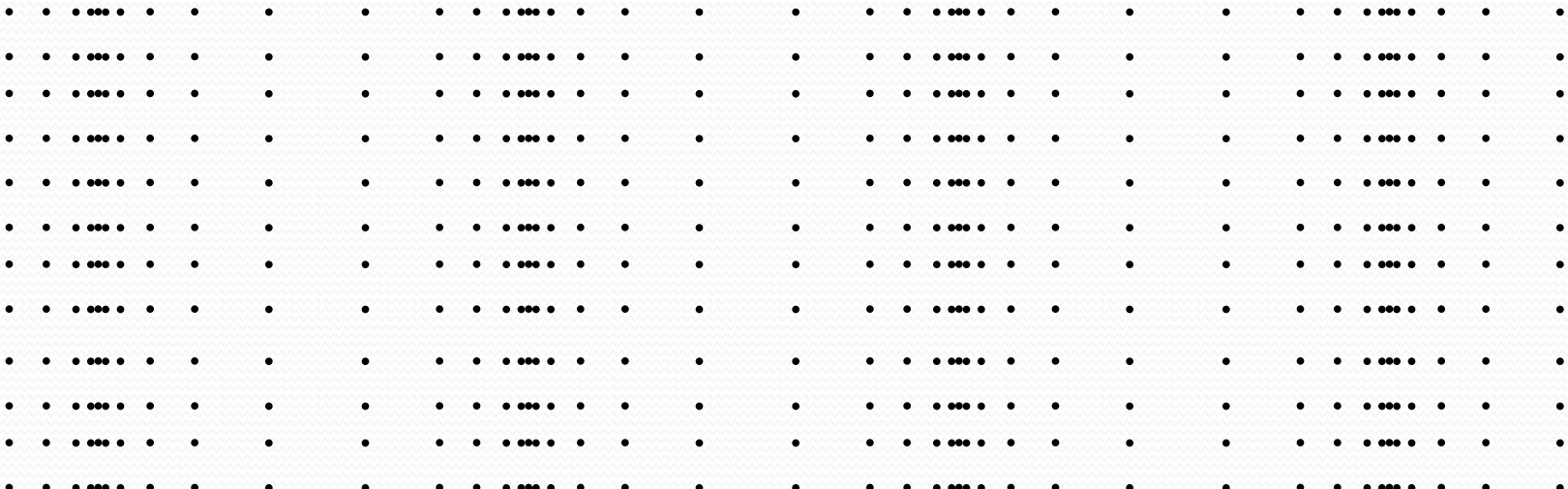
- 1) способность коагулировать аэрозоли различной дисперсности;
- 2) применимость к агрессивным, горючим и взрывоопасным средам;
- 3) не изменяет физико-химические свойства исходного материала
- 4) возможность работы при высоких температурах и давлениях;
- 5) компактность аппаратуры;
- 6) малая энергоёмкость;
- 7) высокая эффективность.

Задача создания специализированного газоочистного оборудования, способного обеспечить повышение эффективности улавливания высокодисперсных частиц из газовых сред за счет воздействия ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности, является актуальной и требующей решения

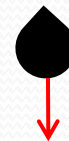
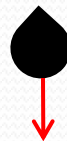
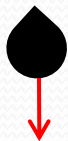
# Акустическая коагуляция



Акустические колебания



Дым  
Туман  
Сажа



# Улавливание дисперсных частиц в газовых средах



## Излучатель Серия «Соловей»

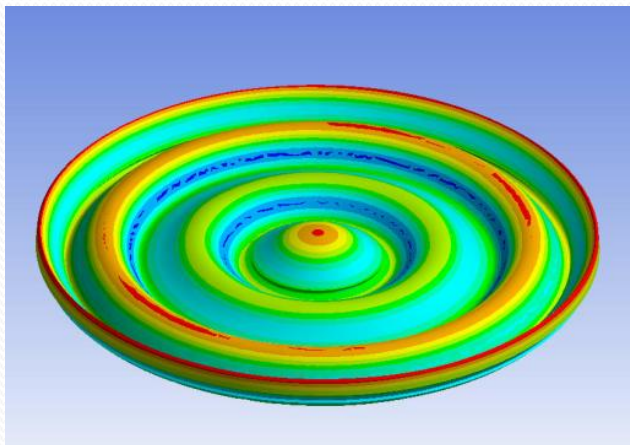
Предназначены для  
бесконтактной сушки материалов, коагуляции  
аэрозолей, гашения пен и т.п. Максимальная  
интенсивность акустических колебаний до 153 дБ.

# Преимущества УЗ излучателей

1. Высокий КПД (более 60%).
2. Широкая диаграмма направленности излучения с высоким уровнем звукового давления (более 150 дБ).
3. Малые массогабаритные характеристики.
4. Простота использования.
5. Широкая распространённость используемых в производстве излучателей материалов.
6. Стабильное по частоте излучение, позволяющее обеспечивать наиболее эффективный режим колебаний – режим стоячей волны.



ультразвуковой дисковый излучатель



Распределение колебаний дискового излучателя

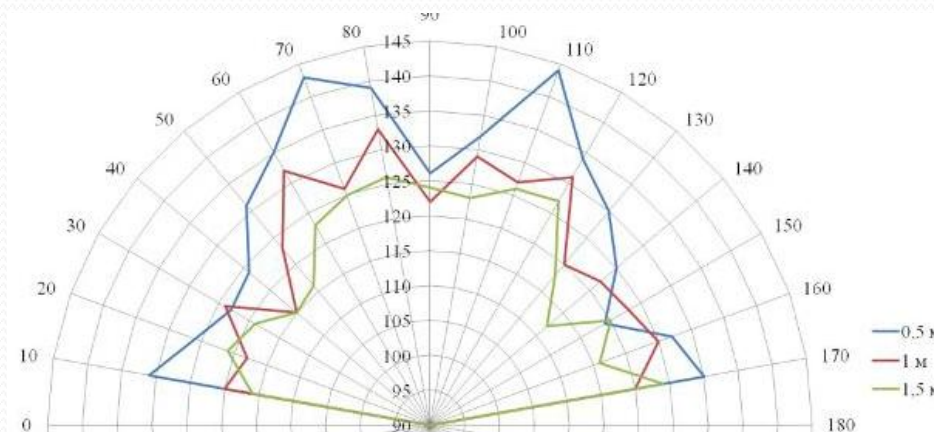
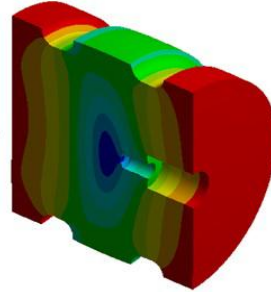
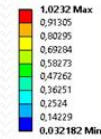
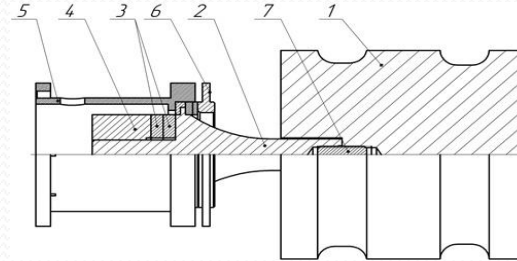
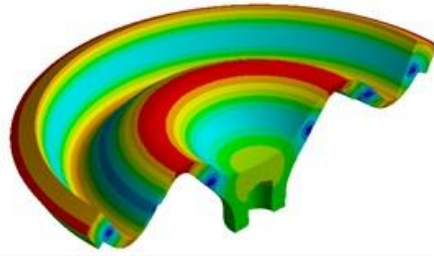
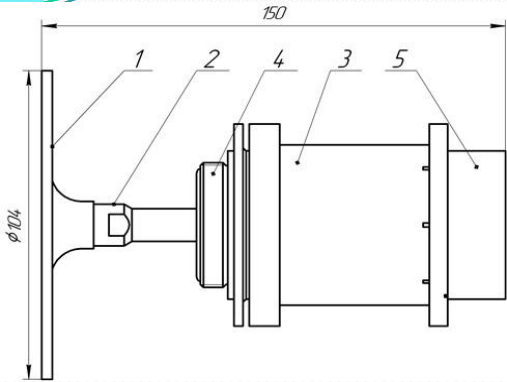


Диаграмма направленности для дискового излучателя при удалении 0,5 м; 1 м; 1,5 м

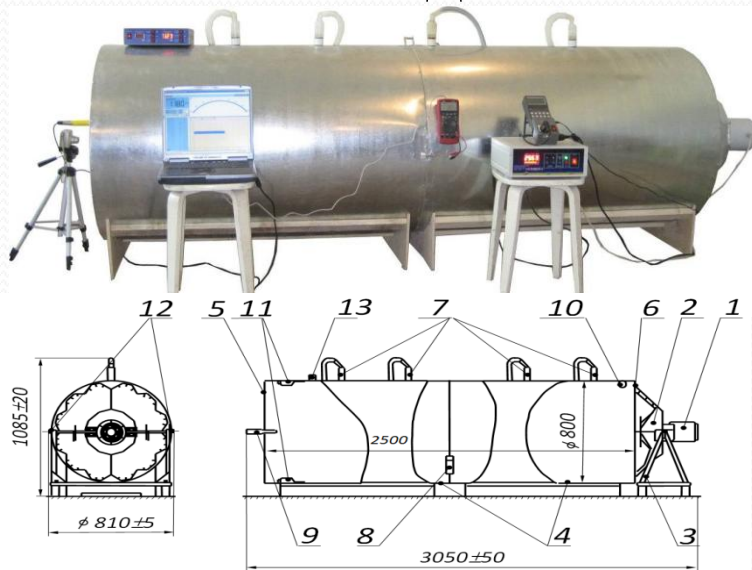
# Типы УЗ излучателей



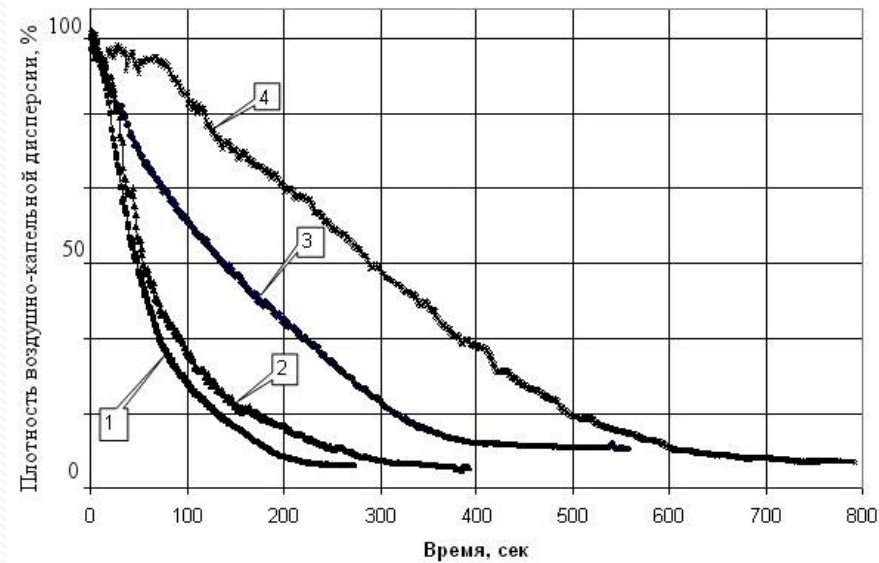
Эскиз УЗКС с изгибно-колеблющимся излучателем, форма колебаний дискового излучателя, фото УЗКС  
1 – дисковый излучатель; 2 – пьезоэлектрический преобразователь; 3 – корпус; 4 – фланец; 5 – вентилятор

Эскиз УЗКС с продольно-колеблющимся излучателем, форма колебаний УЗ излучателя, фото УЗКС  
1 – УЗ излучатель; 2 – концентратор пьезопреобразователя; 3 – пьезокерамические элементы; 4 – отражающая накладка; 5 – корпус; 6 – фланец; 7 – шпилька

# Результаты предварительных экспериментальных исследований процесса коагуляции

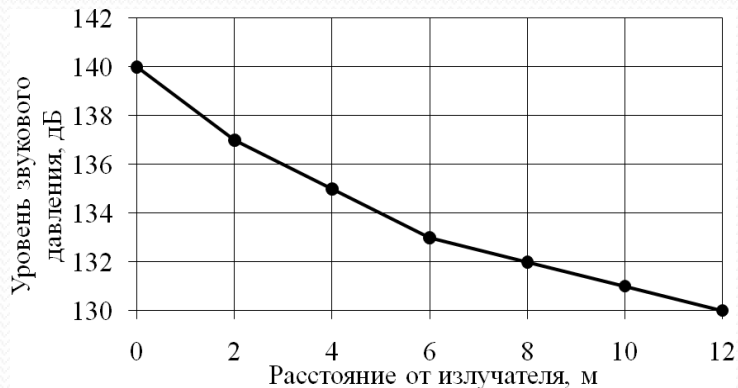


Коагуляционная камера с измерительным оборудованием



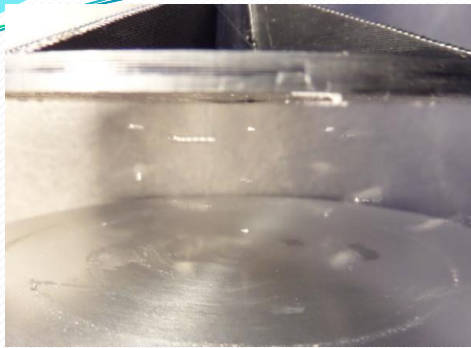
1 – эксперимент с принудительной циркуляцией потоков аэрозолей в аэрозольной камере и ультразвуковым воздействием; 2 – эксперимент без принудительной циркуляции потоков аэрозоля в аэрозольной камере с ультразвуковым воздействием; 3 – эксперимент с принудительной циркуляцией потоков аэрозоля в аэрозольной камере без ультразвукового воздействия; 4 – эксперимент без принудительной циркуляции потоков аэрозоля в аэрозольной камере и без ультразвукового воздействия

Изменение плотности аэрозоля в ходе проведения экспериментов

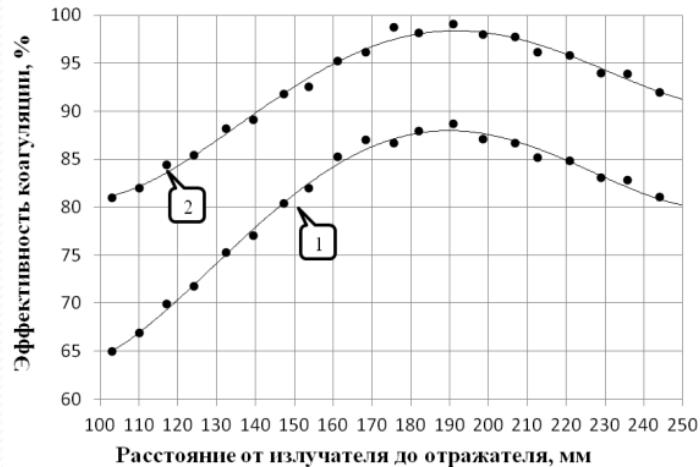
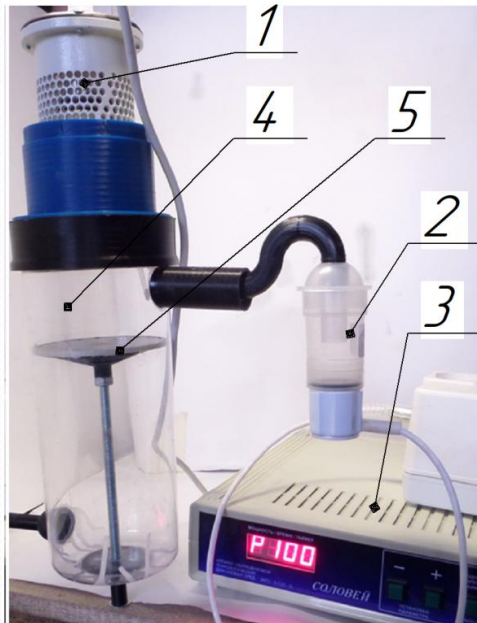


Зависимость уровня звукового давления от расстояния до источника

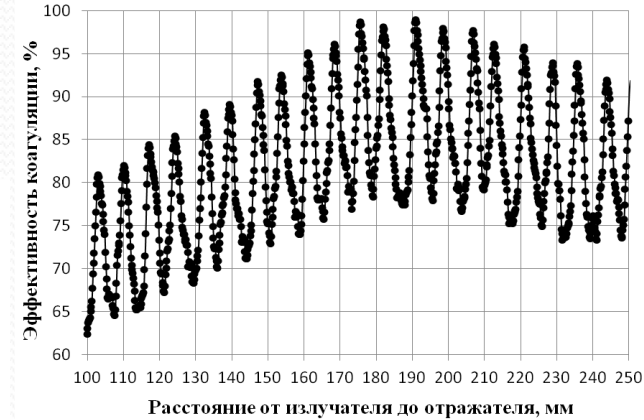
# Коагуляции аэрозоля в стоячей волне



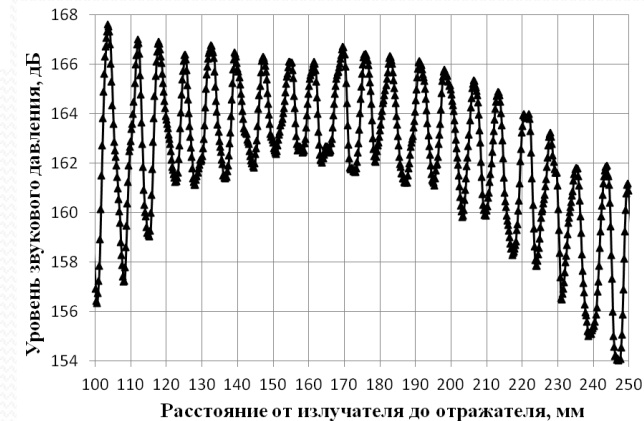
Капли аэрозоля (0,5 – 2 мм);



Зависимости эффективности коагуляции (огibaющие) от расстояния между продольно-колеблющимся излучателем и отражателем; 1 – изгибно-колеблющийся излучатель; 2 – продольно-колеблющийся излучатель



Зависимость эффективности коагуляции от расстояния между продольно-колеблющимся излучателем и отражателем

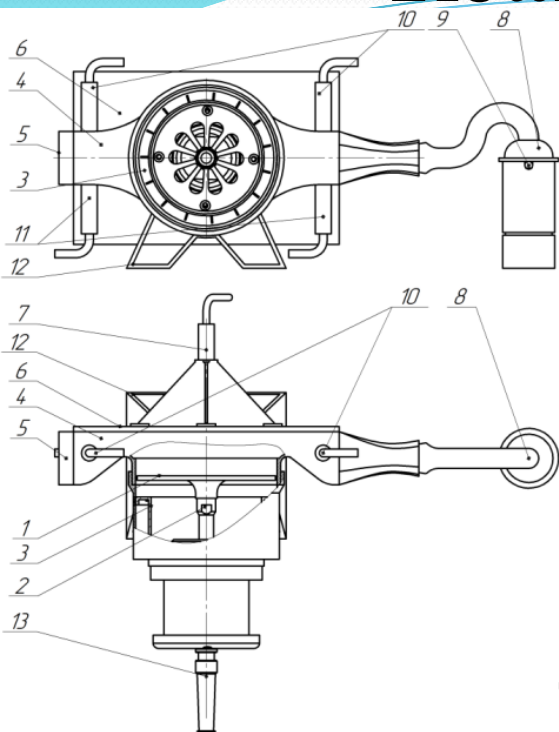


Зависимость уровня звукового давления от расстояния между продольно-колеблющимся излучателем и отражателем

- 1 – УЗ дисковый излучатель; 2 – генератор аэрозоля;
- 3 – УЗ генератор для питания дискового излучателя;
- 4 – коагуляционная камера; 5 – отражатель

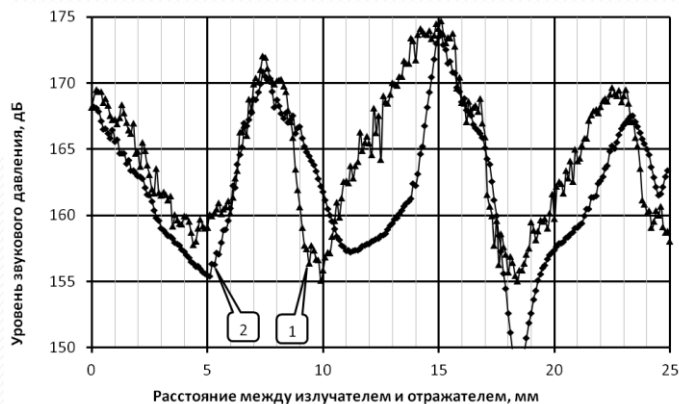
Фото разработанного стенда для предварительных исследований УЗ коагуляции в режиме стоячей волны

# Коагуляция в тонком слое

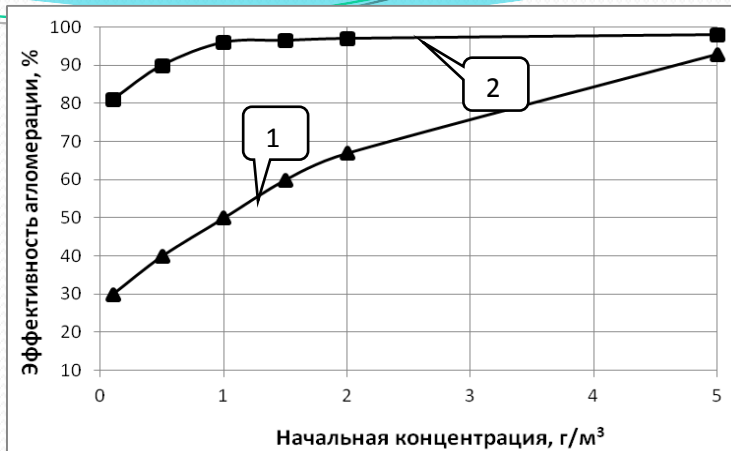


1 – УЗ дисковый излучатель, 2 – пьезоэлектрический преобразователь; 3 – фланец УЗКС; 4 – корпус коагуляционной камеры; 5 – вытяжной вентилятор; 6 – отражатель; 7 – микрофон; 8 – ингалятор; 9 – отверстие; 10 – инфракрасные светодиоды; 11 – фотодиоды; 12 – подставка; 13 – кабель питания УЗ дискового излучателя

Эскиз разработанного стенда для исследования коагуляции в тонком слое



1 – продольно-колеблющийся излучатель;  
2 – изгибно-колеблющийся излучатель  
Зависимость уровня звукового давления от расстояния между излучателем и отражателем

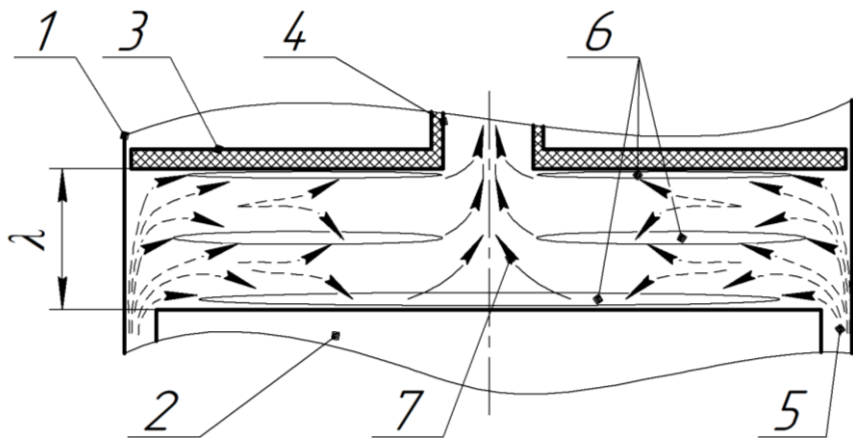


Зависимости эффективности коагуляции от начальной концентрации  
1 – продольно-колеблющийся УЗ излучатель;  
2 – изгибно-колеблющийся излучатель;

$$\eta = \left(1 - \frac{N_{outlet(less15)}}{N_{inlet}}\right) \cdot 100\%$$

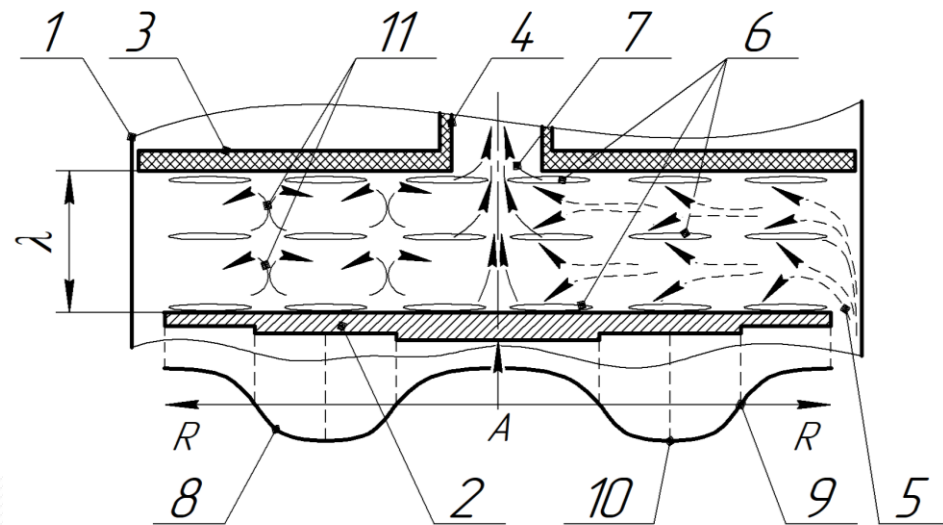
$N_{outlet}$  – концентрация аэрозоля с частицами менее 15 мкм на выходе, г/м<sup>3</sup>;  
 $N_{inlet}$  – концентрация аэрозоля на входе, г/м<sup>3</sup>.

# Схемы перемещения частиц в коагуляционной камере



1 – излучатель; 2 – отражатель; 3 – газодисперсный поток; 4 – узловые области; 5 – область разделения потока; 6 – области формирования агломератов; 7 – выходной патрубок;

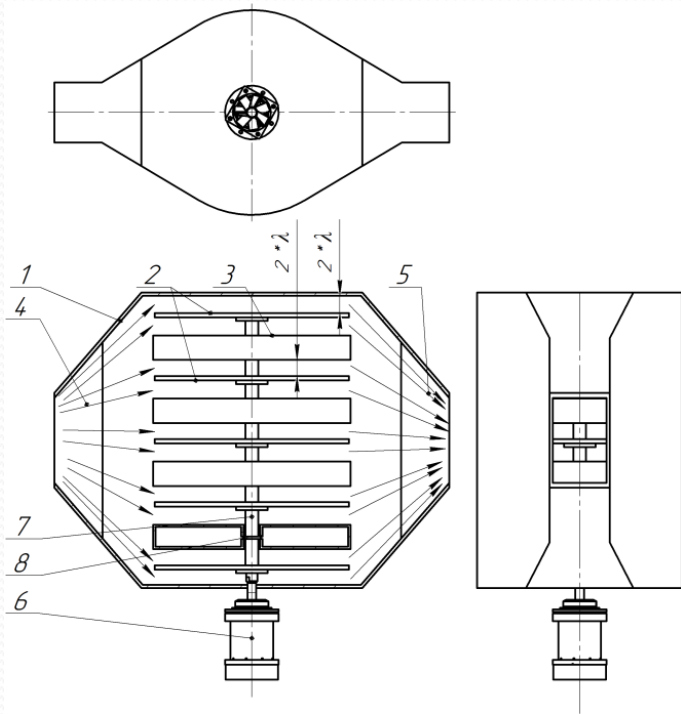
Схема перемещения частиц в коагуляционной камере при использовании продольно-колеблющегося излучателя



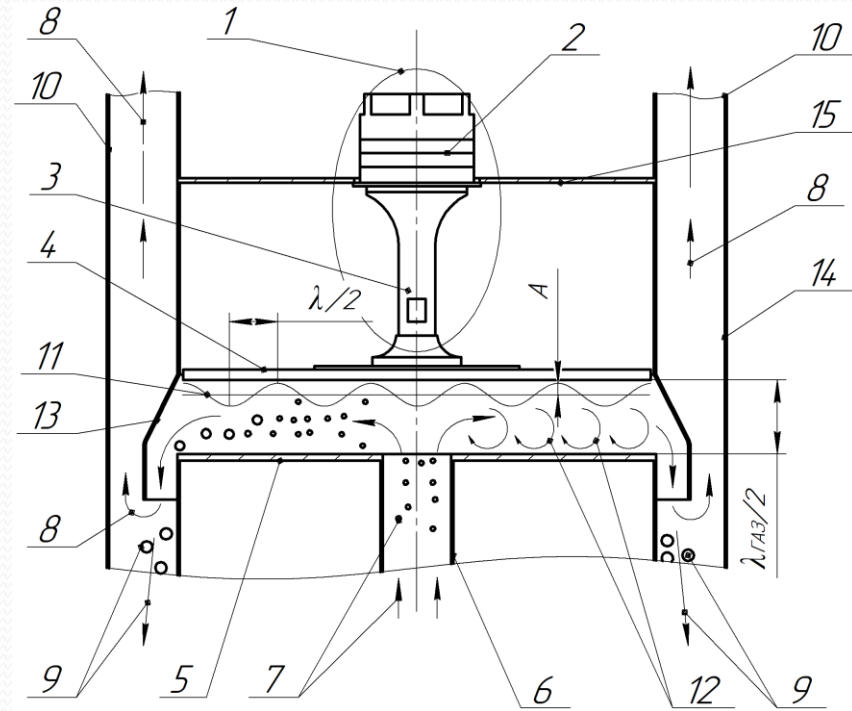
1 – излучатель; 2 – отражатель; 3 – газодисперсный поток; 4 – узловые области; 5 – область разделения потока; 6 – области формирования агломератов; 7 – выходной патрубок; 8 – вихревые области; 9 – нули колебаний излучателя

Схема перемещения частиц в коагуляционной камере при использовании изгибно-колеблющегося излучателя

# Конструкции ультразвуковых коагуляционных модулей

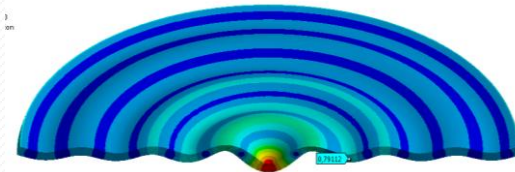


1 – Корпус; 2 – ультразвуковой изгибно-колеблющийся излучатель; 3 – отражатель; 4 – направление входящего потока; 5 – направление выходящего потока; 6 – ультразвуковой пьезоэлектрический преобразователь; 7 – полуволновой волновод; 8 – фланец (нуль колебаний);  $\lambda$  – длина волны

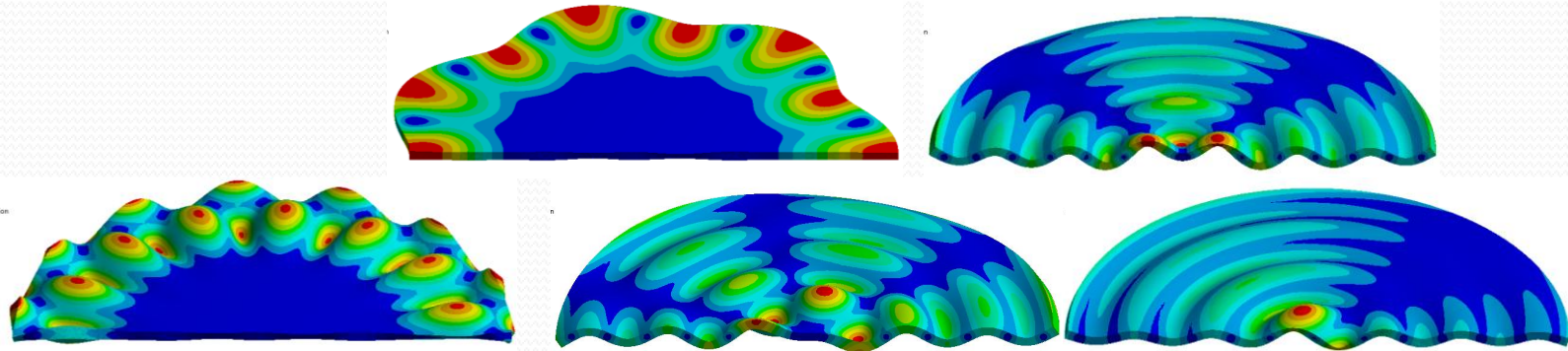


1 – пьезоэлектрическая колебательная система; 2 – пьезоэлектрический преобразователь; 3 – концентратор; 4 – УЗ излучатель; 5 – отражатель; 6 – входной патрубок; 7 – газодисперсный поток (поток газа и частиц); 8 – очищенный газовый поток; 9 – агломераты частиц; 10 – выходные патрубки очищенного газа; 11 – распределение амплитуд колебаний УЗ излучателя; 12 – вихревые течения; 13 – перегородка; 14 – корпус; 15 – крепежный фланец;

# Проблемы при проектировании УЗ дисковых излучателей



Форма колебаний плоского диска

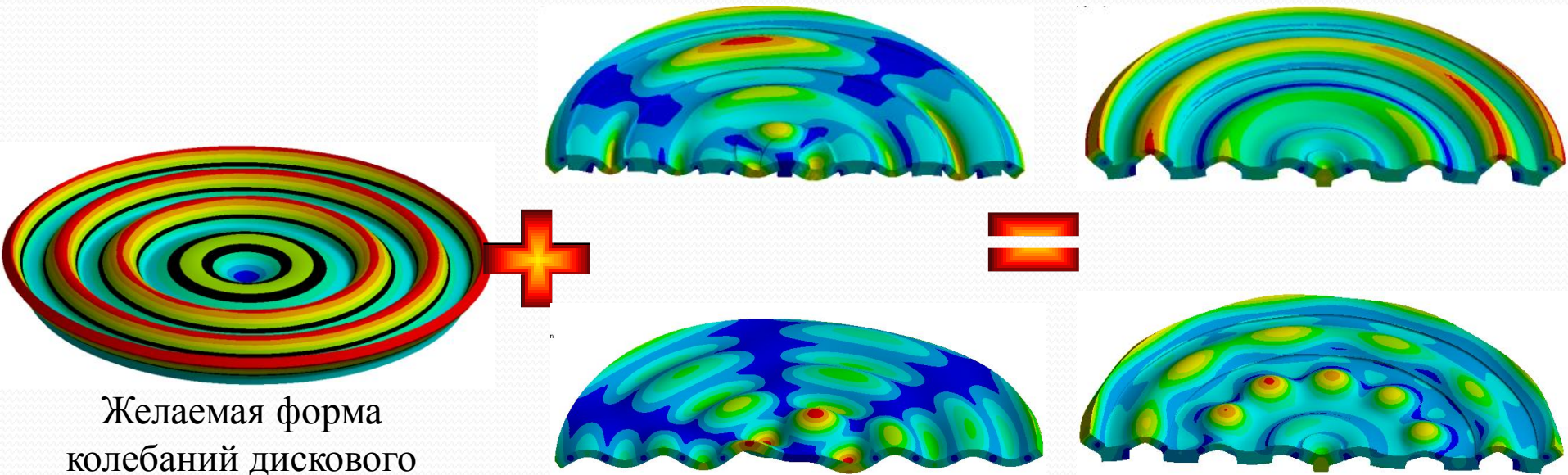


Различные моды колебаний дисковых излучателей

Проблемы при проектировании:

- 1. Обеспечение равномерности амплитуд колебаний, как в пределах кольцевых участков, так и между кольцевыми участками.
- 2. Появление второстепенных мод колебаний, имеющие частоты близкие к частоте кольцевой моды колебаний (разница менее 500 Гц) приводит к деформации формы колебаний кольцевой моды.
- 3. Анизотропия механических свойств материала приводит к деформации формы колебаний кольцевой моды.
- 4. Относительно низкий уровень звукового давления для реализации быстрой коагуляции
- 5. Малая площадь излучения

# Наложение второстепенных мод колебаний на кольцевую моду



Желаемая форма колебаний дискового излучателя

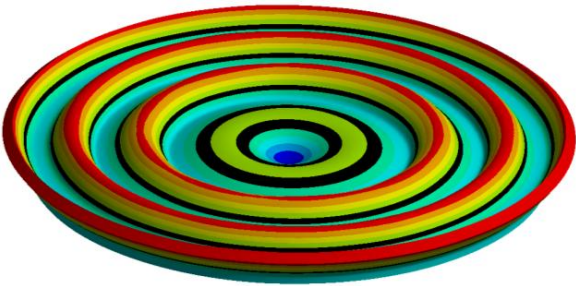
Формы колебаний дискового излучателя работающего на второстепенной моде

Результирующая форма колебаний дискового излучателя

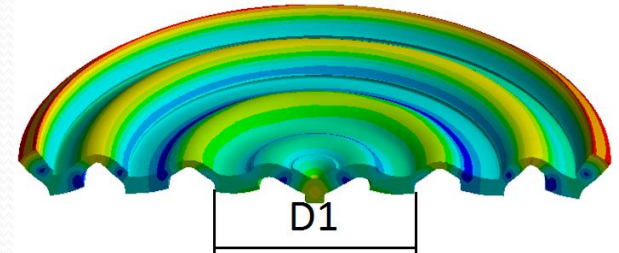
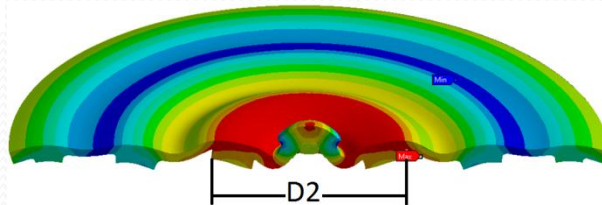
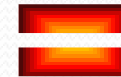
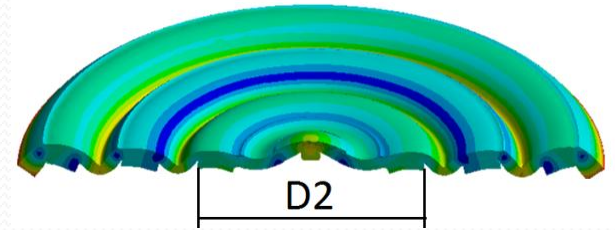
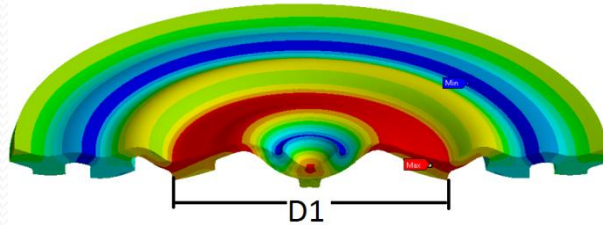


Внешний вид УЗ дискового излучателя

# Наложение второстепенных мод колебаний на кольцевую моду



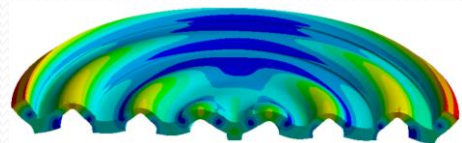
Желаемая форма колебаний дискового излучателя



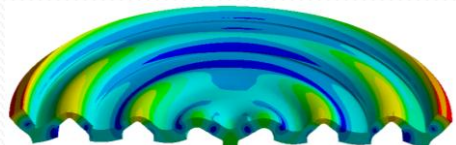
Формы колебаний дискового излучателя работающего на радиальной моде

Результирующая форма колебаний дискового излучателя

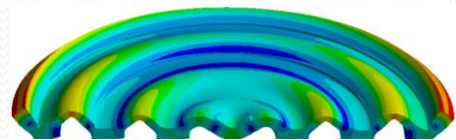
# Влияние анизотропии механических свойств материала на форму колебаний дискового излучателя



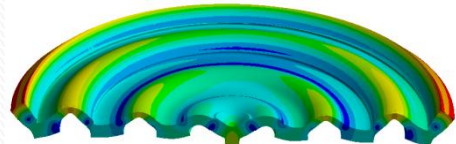
А)  $E_x=1,13 \cdot 10^{11}$  Па;  $E_y=1,13 \cdot 10^{11}$  Па;  
 $E_z=1,08 \cdot 10^{11}$  Па



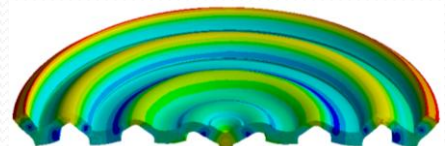
Б)  $E_x=1,13 \cdot 10^{11}$  Па;  $E_y=1,13 \cdot 10^{11}$  Па;  
 $E_z=1,1 \cdot 10^{11}$  Па



В)  $E_x=1,13 \cdot 10^{11}$  Па;  $E_y=1,13 \cdot 10^{11}$  Па;  
 $E_z=1,11 \cdot 10^{11}$  Па



Г)  $E_x=1,13 \cdot 10^{11}$  Па;  $E_y=1,13 \cdot 10^{11}$  Па;  
 $E_z=1,12 \cdot 10^{11}$  Па



Д)  $E_x=1,13 \cdot 10^{11}$  Па;  $E_y=1,13 \cdot 10^{11}$  Па;  
 $E_z=1,13 \cdot 10^{11}$  Па



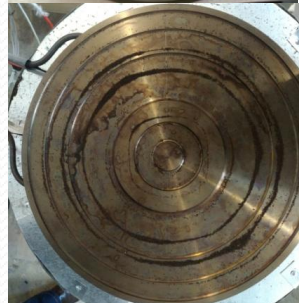
Распределение соответствует модели



Расположение «Нулей колебаний» на поверхности осесимметричного излучателя

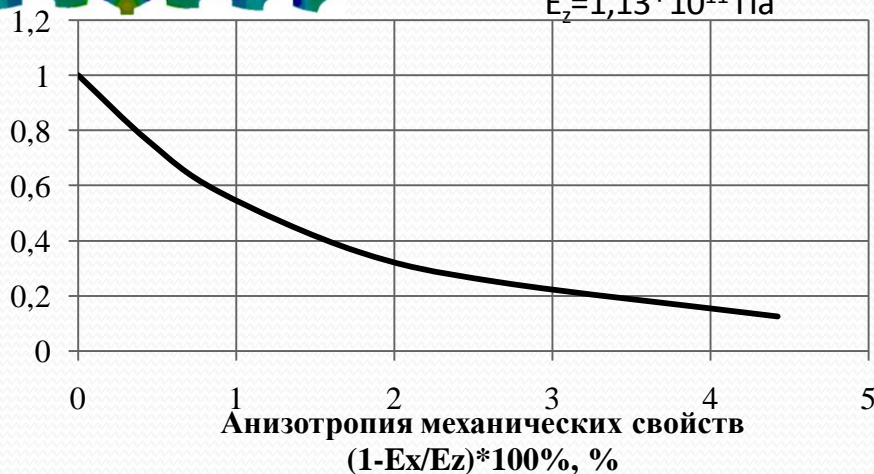


Модернизация излучателя (выполнение доработки)

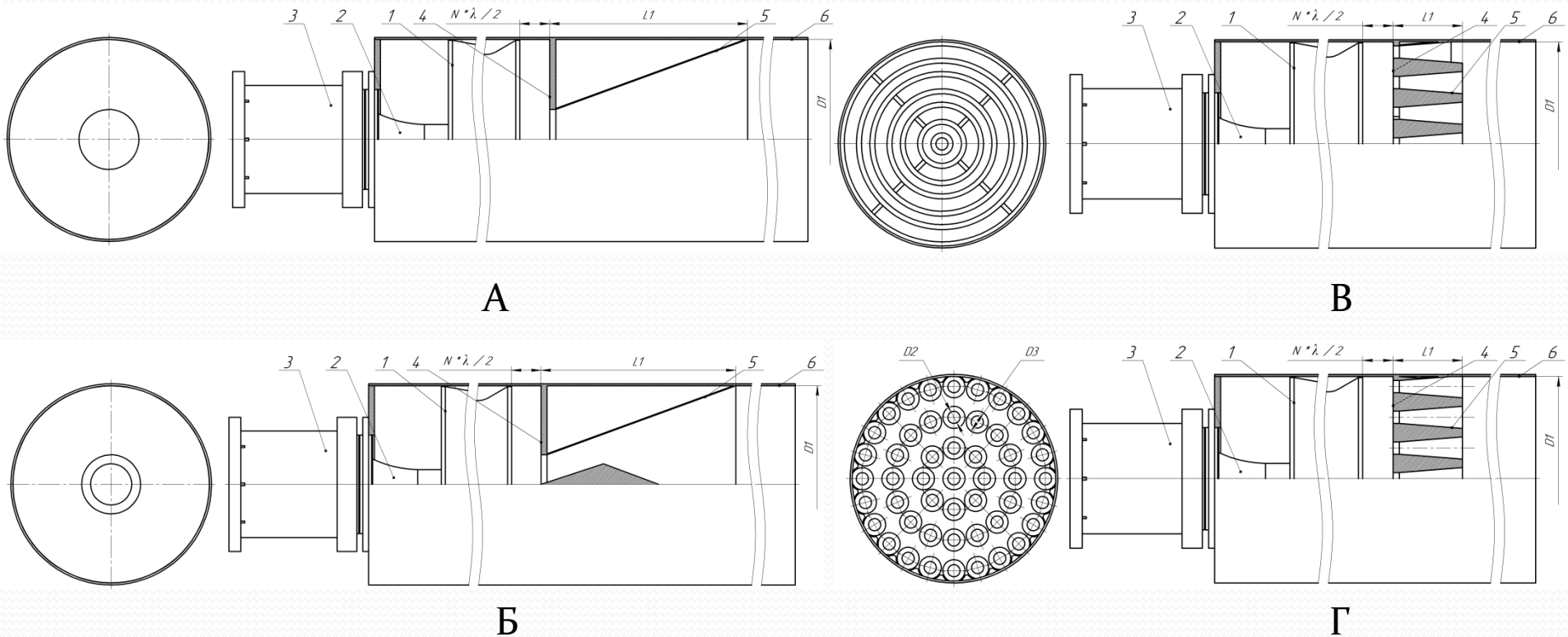


Расположение «Нулей колебаний» на поверхности модернизированного излучателя

Отношение средних значений амплитуд колебаний по осям X и Z,  $A_x/A_z$



# Повышение эффективности УЗ излучателей



**Эскизы продольно-колеблющегося излучателя с различными конфигурациями рупоров**

1 – Продольно-колеблющийся излучатель; 2 – ультразвуковой пьезоэлектрический преобразователь; 3 – корпус преобразователя; 4 – отражатель; 5 – рупорная конструкция; 6 – внешняя обечайка

А – излучатель с одиночным рупором;

Б – излучатель с одиночным рупором с телом Венте;

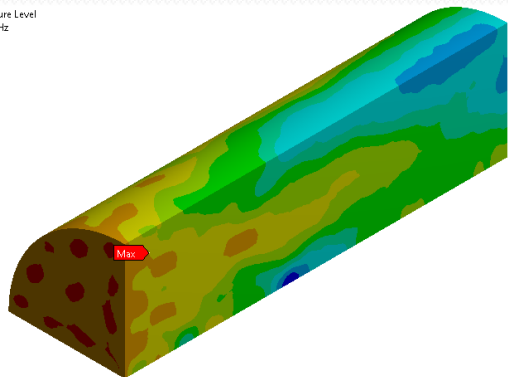
В – излучатель с концентрически установленными кольцевыми рупорами;

Г – излучатель с массивом рупоров

# Примеры результатов расчетов УЗ поля формируемого продольно-колеблющимся излучателем с различными конфигурациями рупоров

Type: Sound Pressure Level  
Frequency: 22000 Hz  
Amplitude  
Unit: dB  
17.11.2021 1:27

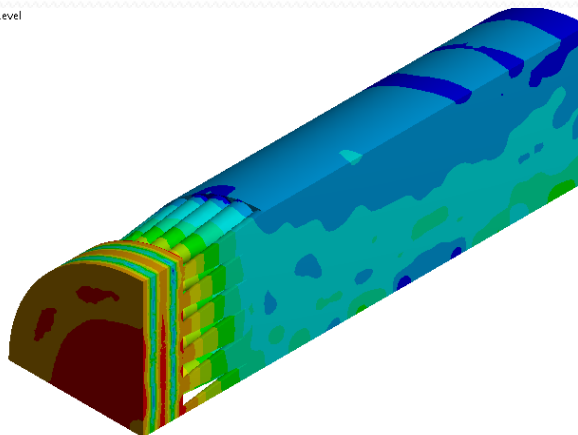
155.33 Max  
154.99  
153.85  
153.12  
152.38  
151.65  
150.91  
150.17  
149.44  
148.7 Min



А

Type: Sound Pressure Level  
Frequency: 23400 Hz  
Amplitude  
Unit: dB  
17.11.2021 1:25

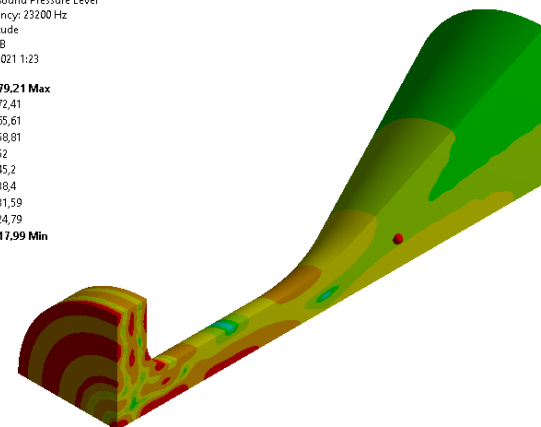
170.19 Max  
168.08  
165.97  
163.86  
161.75  
159.64  
157.53  
155.43  
153.32  
151.21 Min



Д

Type: Sound Pressure Level  
Frequency: 23200 Hz  
Amplitude  
Unit: dB  
17.11.2021 1:23

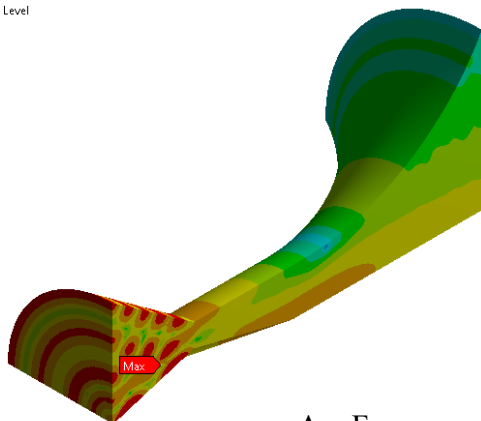
179.21 Max  
172.41  
165.61  
158.81  
152  
145.2  
138.4  
131.59  
124.79  
117.99 Min



В

Type: Sound Pressure Level  
Frequency: 21600 Hz  
Amplitude  
Unit: dB  
17.11.2021 1:28

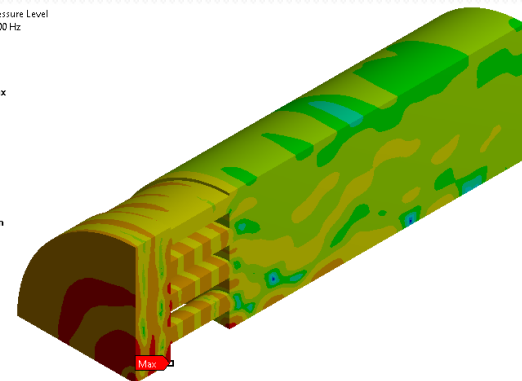
174.64 Max  
167.41  
160.17  
152.94  
145.71  
138.48  
131.25  
124.02  
116.79  
109.56 Min



Б

Type: Sound Pressure Level  
Frequency: 23200 Hz  
Amplitude  
Unit: dB  
17.11.2021 1:26

167.89 Max  
163.47  
159.05  
154.63  
150.21  
145.8  
141.38  
136.96  
132.54  
128.12 Min



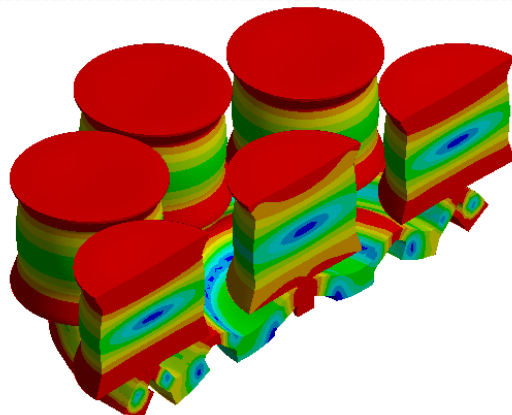
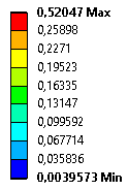
Г

А – Без рупора, без резонансной камеры; Б – Узкогорловой рупор с Телом Венте, с конической предрупорной камерой; В – Узкогорловой рупор с резонансной камерой перед излучателем; Г – кольцевые рупоры с резонансной камерой перед излучателем; Д – массив конических рупоров с резонансной камерой перед излучателем

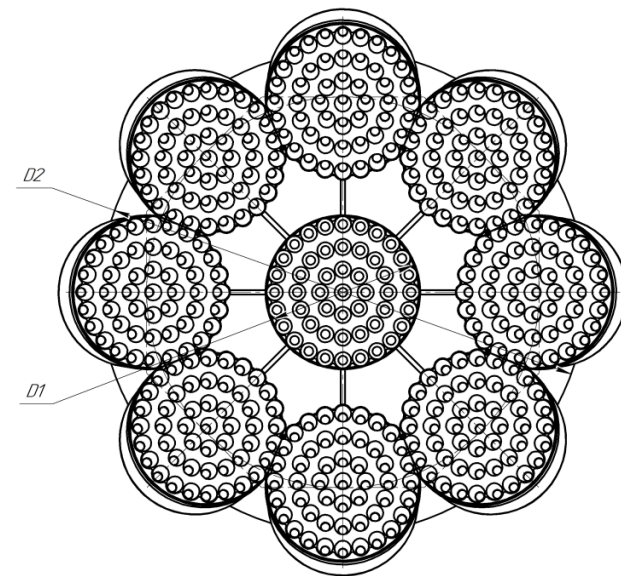
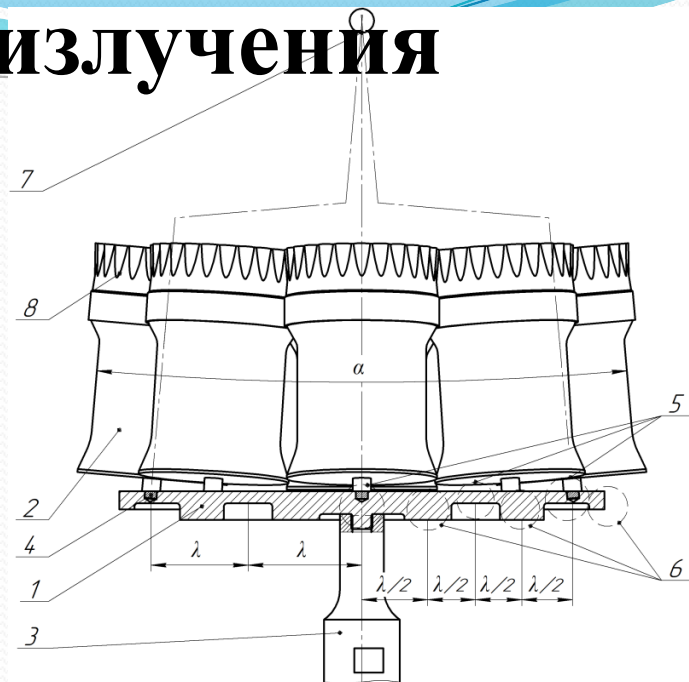
Распределения уровня звукового давления при различных конфигурациях рупоров (Представлена только газовая среда, ограниченная рупорной конструкцией)

# Увеличение площади излучения

0.0000000000000000  
 Total Deformation 88  
 Type: Total Deformation  
 Frequency: 22171 Hz  
 Unit: m  
 16.11.2021 2:20



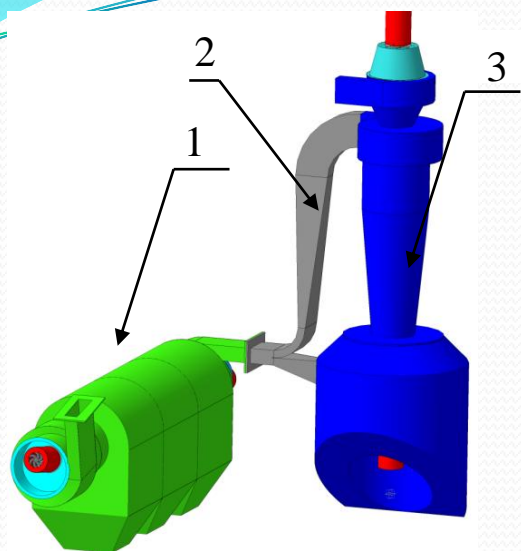
Распределение колебаний массива продольно-колеблющихся излучателей



1 – распределитель колебаний в виде изгибно-колеблющегося дискового излучателя с плоской фронтальной поверхностью; 2 – продольно-колеблющиеся излучатели; 3 – концентратор; 4 – резьбовой узел крепления продольно-колеблющегося излучателя к распределителю; 5 – области распределителя колеблющиеся с высокой амплитудой колебаний; 6 – бустерные области распределителя; 7 – область фокусировки; 8 – массивы рупоров.

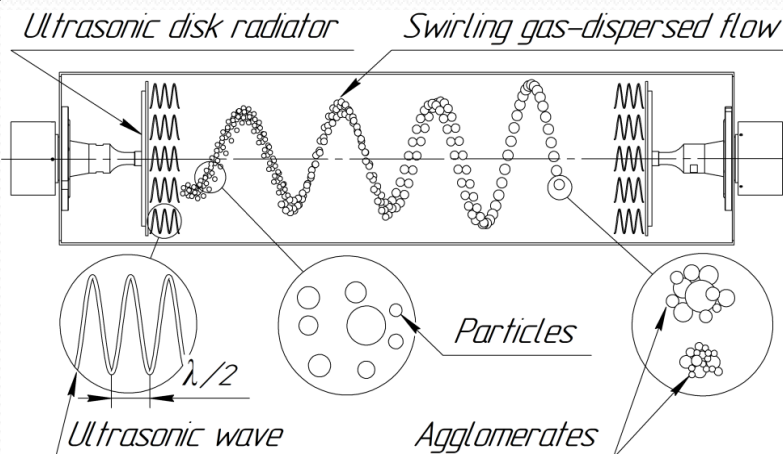
Схема установки двумерного массива излучателей

# Центробежно-акустическое газоочистное оборудование

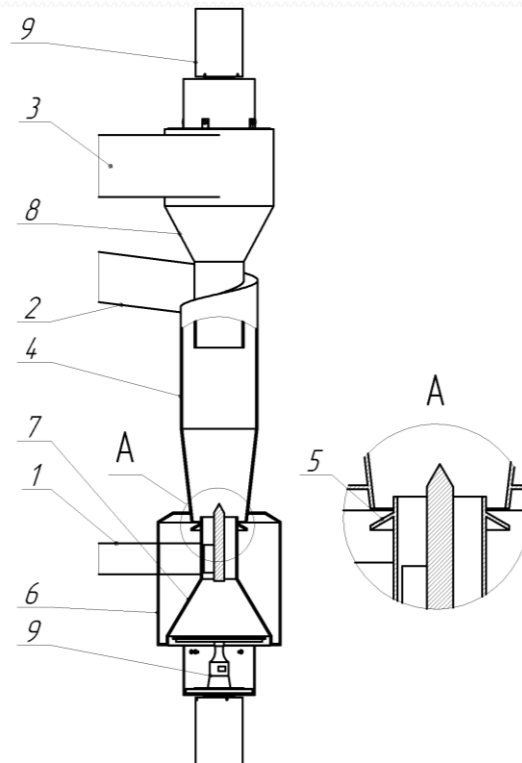


1 – первая ступень – устройство предварительной коагуляции;  
 2 – газоходы; 3 – вторая ступень – аппарат для высокоэффективного улавливания агломератов частиц

Схема газоочистного оборудования

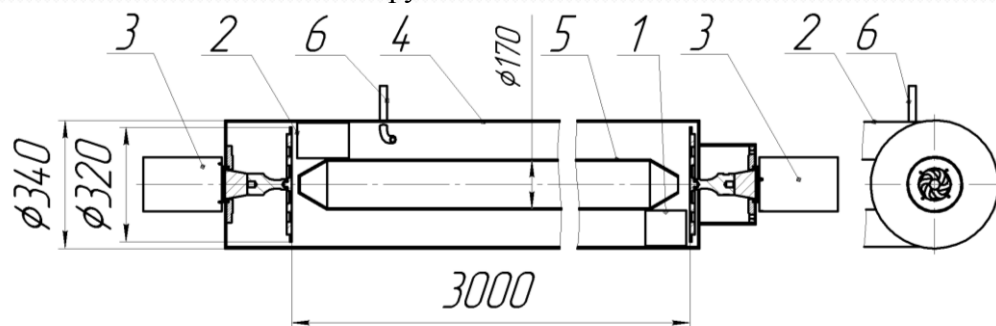


Принцип действия центробежно-акустической коагуляционной камеры



1 – патрубок первичного потока; 2 – патрубок вторичного потока; 3 – выходной патрубок;  
 4 – сепарационная часть; 5 – отбойная шайба;  
 6 – бункер; 7,8 – конуса;  
 9 – ультразвуковые излучатели

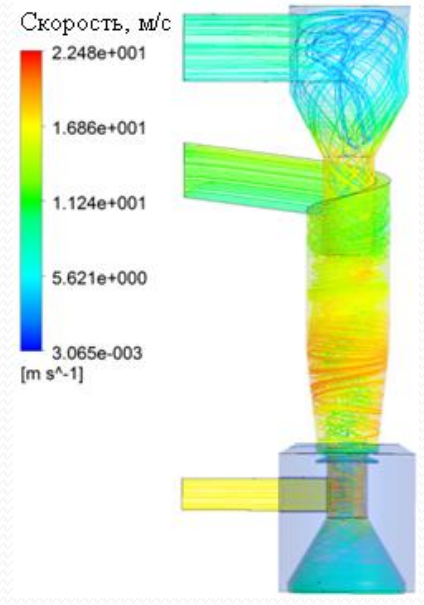
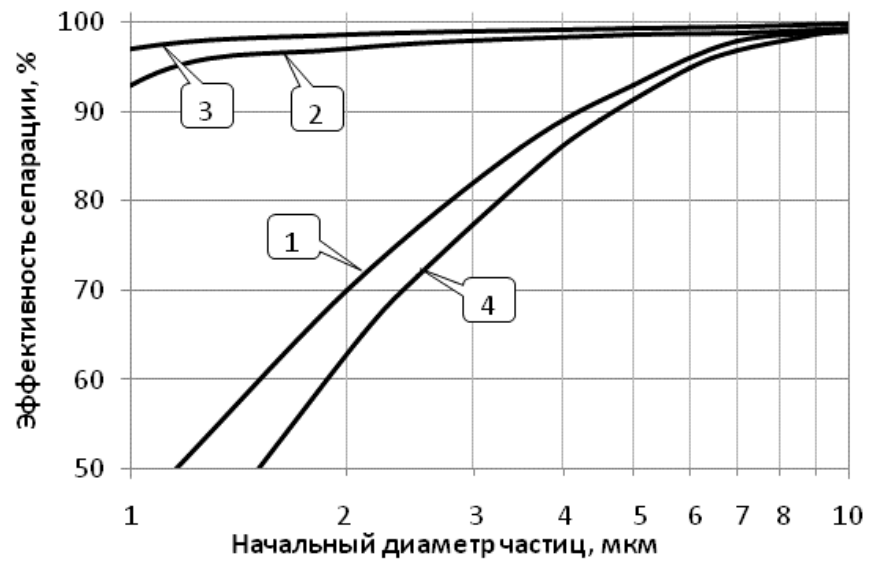
Эскиз и трехмерная модель аппарата ВЗП



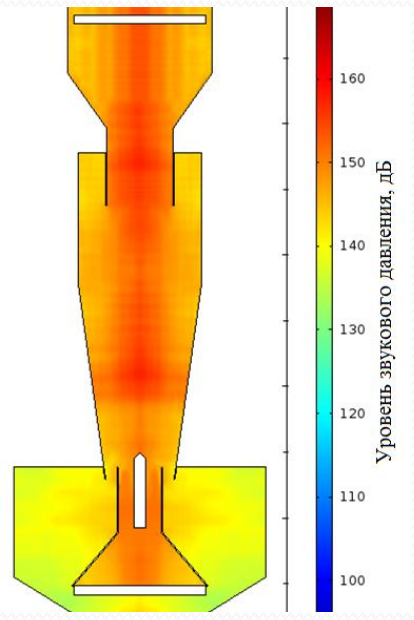
1 – входной патрубок; 2 – выходной патрубок; 3 – УЗ дисковый излучатель; 4 – коагуляционно-сепарационная камера; 5 – вытеснитель; 6 – трубка отбора проб

Эскиз стенда для исследования коагуляции в закрученном потоке

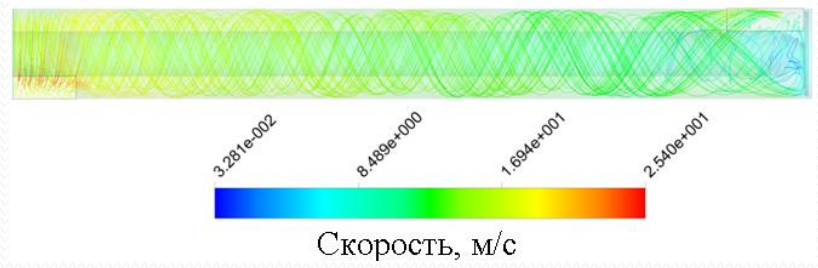
# Расчетная фракционная эффективность оборудования



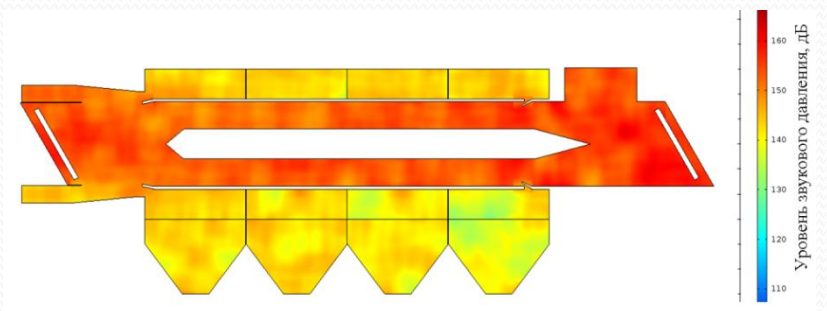
Картина течения газа в объеме аппарата ВЗП



Распределение уровня звукового давления

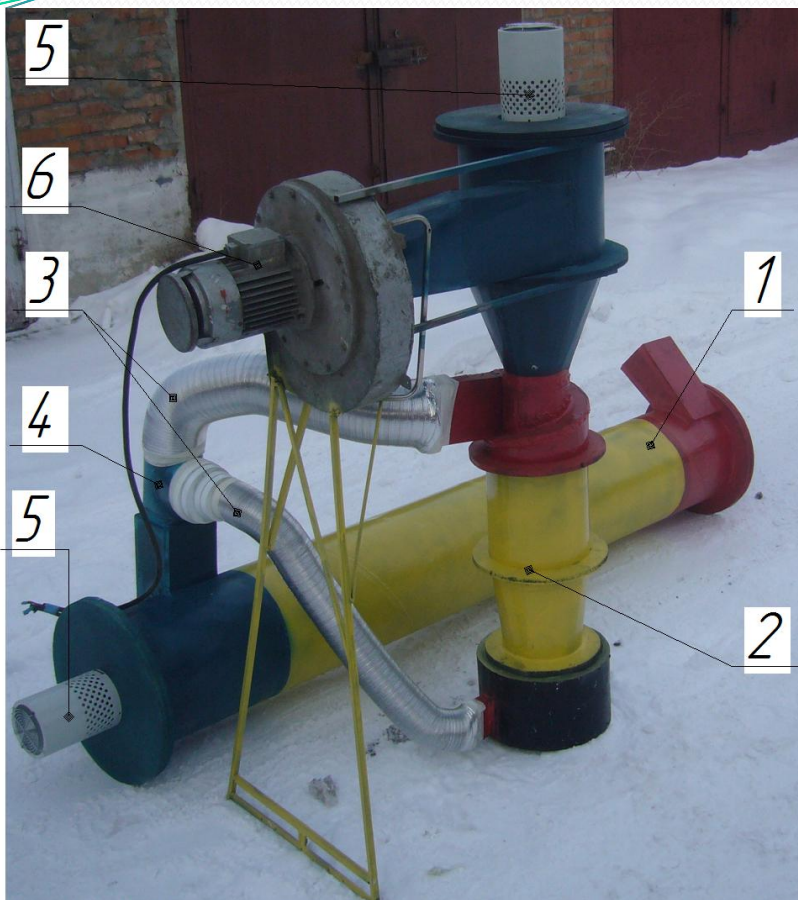


Картина течения газа в объеме агломератора

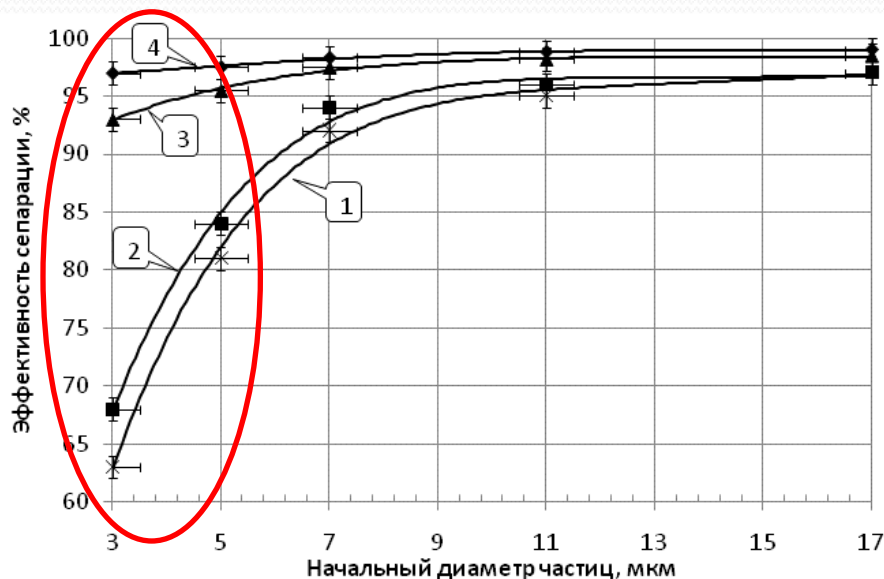


Распределение уровня звукового давления в агломераторе

# Центробежно-акустическое газоочистное оборудование



1 – агломератор; 2 – аппарат ВЗП; 3 – воздуховоды;  
 4 – делитель потоков; 5 – УЗ дисковые излучатели;  
 6 – центробежный вентилятор  
 Экспериментальный образец центробежно-акустического пылеуловителя



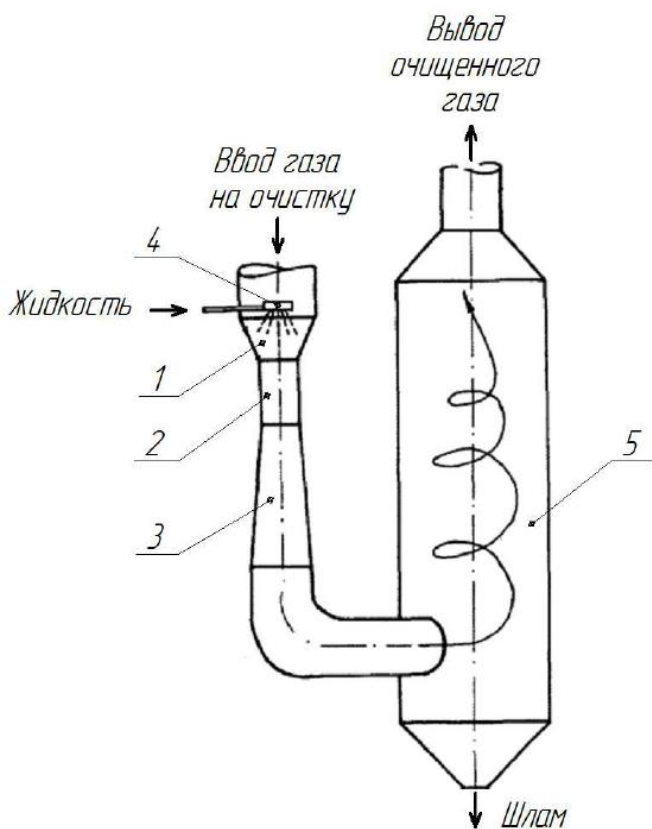
- 1 – установлен только аппарат ВЗП;
- 2 – установлены агломератор и аппарат ВЗП;
- 3 – установлены агломератор (+ УЗ-воздействие) и аппарат ВЗП;
- 4 – установлены агломератор (+ УЗ-воздействие) и аппарат ВЗП (+ УЗ-воздействие)

Фракционная эффективность разработанного оборудования

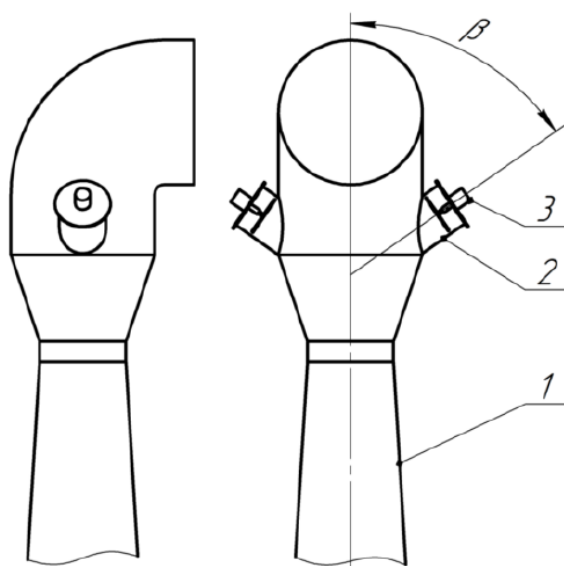
## Технические характеристики разработанного центробежно-акустического газоочистного оборудования

Наименование параметра	Значение
Расход газа, м <sup>3</sup> /час;	1000
Концентрация дисперсных частиц, г/м <sup>3</sup>	5-50
Гидравлическое сопротивление, Па	2500

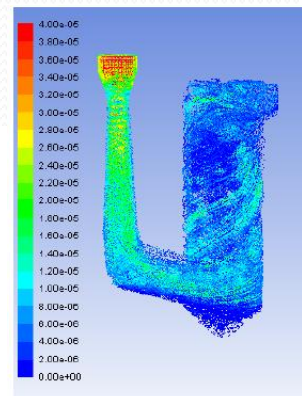
# Схема воздействия УЗ колебаниями на газодисперсный поток в скрубберах Вентури



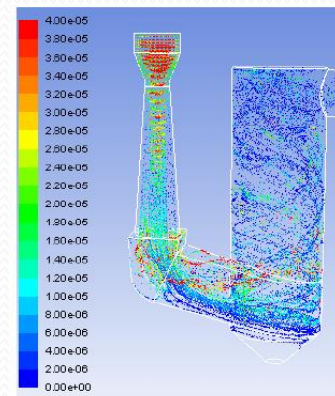
1 – конфузор; 2 – горловина; 3 – диффузор;  
4 – форсунка; 5 – циклон-каплеуловитель  
Схема скруббера Вентури



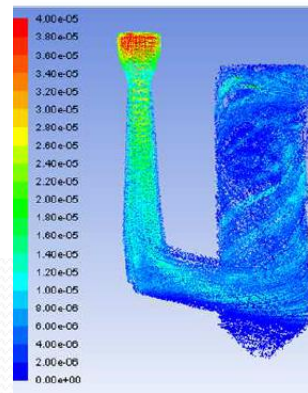
1 – труба Вентури; 2 – отвод для установки УЗ-излучателя;  
3 – УЗ-дисковый излучатель;  
 $\beta$  – угол между осью трубы Вентури и УЗ-излучателем  
Схема установки 2-х УЗ-излучателей в трубу Вентури



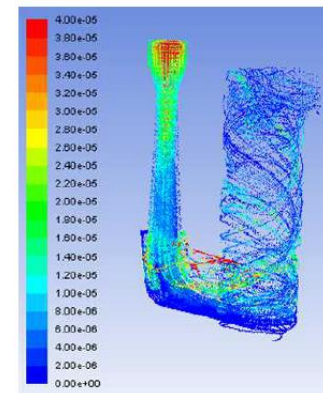
а) 2 мкм без УЗ



б) 2 мкм с УЗ 150 дБ



в) 5 мкм без УЗ

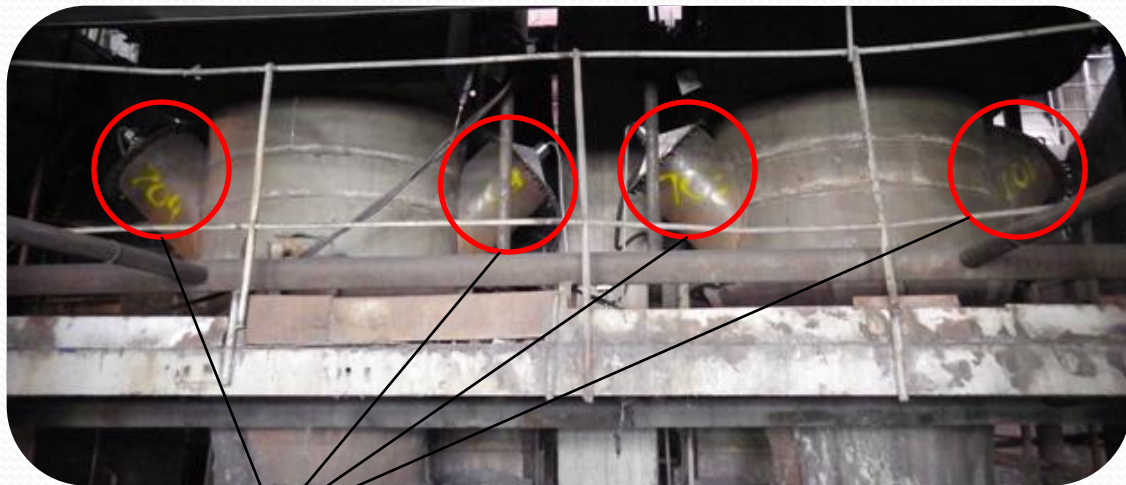


г) 5 мкм с УЗ 150 дБ

Картины распределения частиц золя в скруббере Вентури

# Экспериментальное подтверждение эффективности применения УЗ воздействия на промышленной ТЭЦ

Фото установленных УЗ излучателей в трубы Вентури золоулавливающей установки



УЗ излучатели установлены в специальные отводы под углом 45 град.



По 2 УЗ излучателя на одну трубу Вентури, общее количество (для 4-х труб Вентури) – 8

Характеристики золоулавливающей установки (ЗУУ):

Котельный агрегат: БКЗ-220-100Ф

Топливо: Харанорский уголь

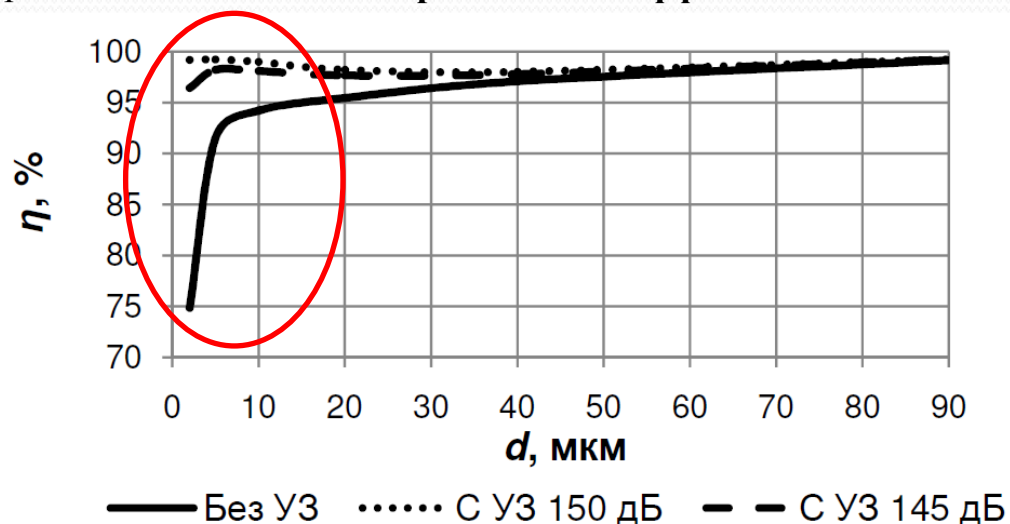
Золоуловители: МВ УО ОРГРЭС  
(труба Вентури с каплеуловителем)

Количество: 4 параллельно-соединенных золоуловителя

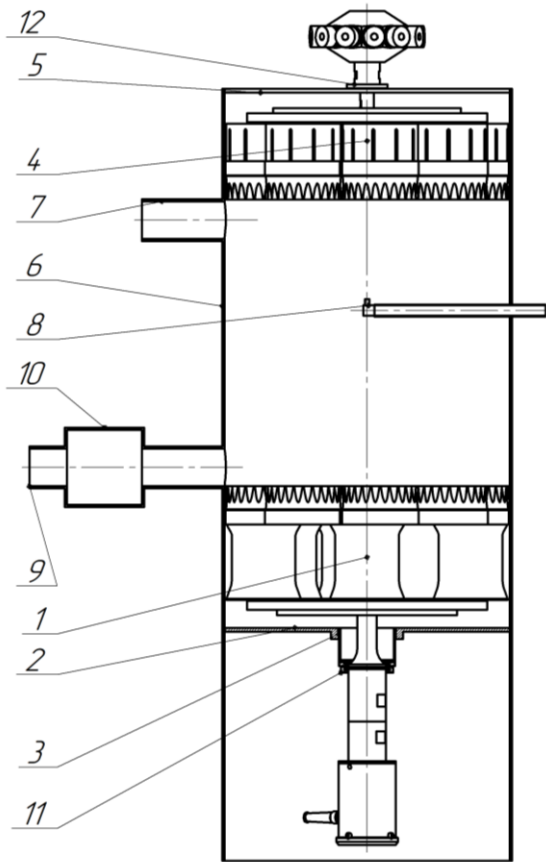


Требуемая запыленность на выходе ЗУУ – не более  $0,25 \text{ г/нм}^3$   
(эффективность не менее 98 %).

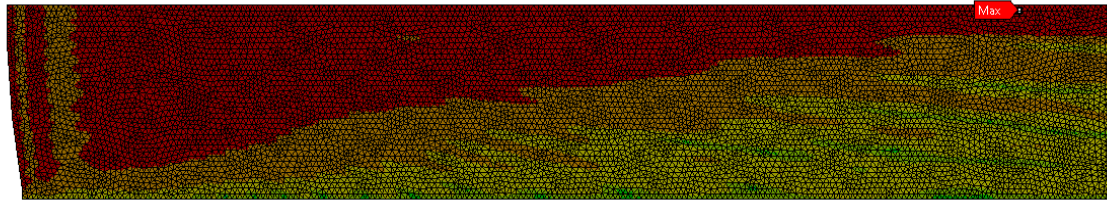
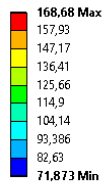
Фракционная эффективность



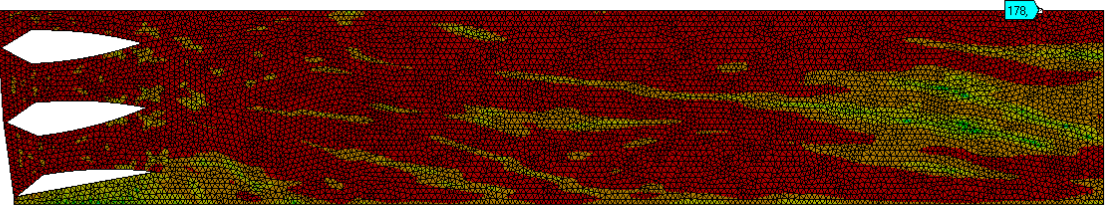
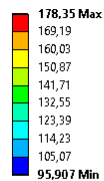
# Нелинейно-волновое ультразвуковое воздействие на газовые среды для коагуляции частиц менее РМ 2.5



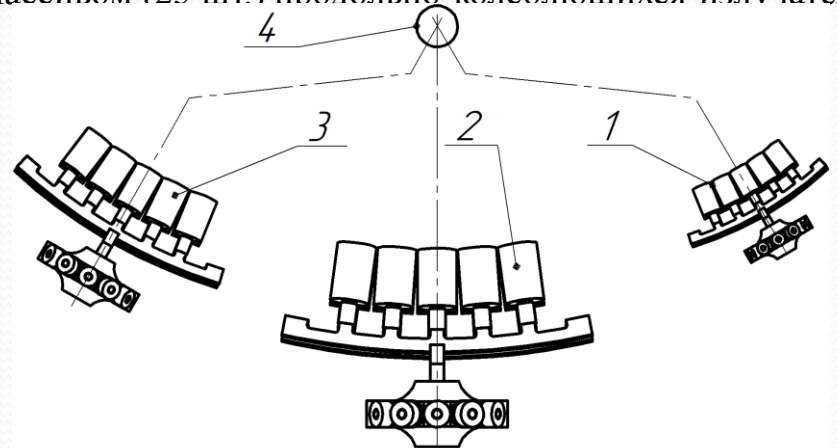
- 1 – массив излучателей на дисковом распределителе (22 кГц);  
 2 – фланец; 3 – резьбовой механизм регулировки вертикального положения массива излучателей; 4 – массив излучателей на дисковом распределителе (44 кГц); 5 – фланец; 6 – камера агломерации; 7 – патрубок для введения аэрозоля;  
 8 – распылительная форсунка; 9 – патрубок вывода очищенного газа; 10 – камера отбора проб; 11, 12 – акусторазвязка
- Эскиз стенда для исследования процесса агломерации



Пример распределения уровня звукового давления, создаваемого одномерным массивом (5 шт.) продольно-колеблющихся излучателей



Пример распределения уровня звукового давления, создаваемого двумерным массивом (25 шт.) продольно-колеблющихся излучателей



1 – излучатель 15 кГц; 2 – излучатель 30 кГц; 3 – излучатель 60 кГц; 4 – область фокусировки

Схема расположения массивов излучателей поршневого типа с кратными частотами для воздействия на открытые пространства (рупоры не показаны)

# Причины ограничения предельных возможностей УЗ коагуляции

1. При формировании стоячей волны частицы почти не взаимодействуют между собой в пределах узловой области и при низкой концентрации эффективность коагуляции будет минимальной. Это связано с тем, что из-за большого расстояния между частицами, значительно превышающих их размер, силы взаимодействия частиц, и амплитуда колебательного движения оказываются недостаточными для сближения их на расстояние достаточное для соударения.

2. Использование низкой частоты ультразвукового воздействия, при которой все частицы размером менее 2,5 мкм вовлекаются в колебательное движение, что не способствует их сближению и соударению, позволяющих создавать различные по форме и значениям локальные перепады давлений в локальных областях в течении требуемого времени воздействия.

3. Отсутствие условий для возникновения вторичных эффектов повышающих эффективность УЗ коагуляции.

4. Отсутствие взаимодействия между частицами при реализации режима стоячей волны вследствие удерживания их ультразвуковым полем в узловых областях.

5. Низкая вероятность столкновения частиц при малых концентрациях даже при высоком уровне звукового давления, за счет больших расстояний (больше размера самих частиц) между частицами.

# Подмодель акустического поля

Подмодель акустического поля основана на уравнении Гельмгольца. Предполагается, что дисперсная фаза на поглощение колебаний не влияет и коэффициент поглощения полностью определяется свойствами газовой фазы:

$$\Delta P(\mathbf{r}) + ik_{**}^2 P(\mathbf{r}) = 0, \quad (1)$$

где  $P(\mathbf{r})$  – комплексная амплитуда звукового давления в точке с координатой  $\mathbf{r}$ , Па;  $k = (2\pi f)/c_g$  ( $c_g$  – скорость звука в газовой фазе, м/с) – волновое число,  $m^{-1}$ ;  $k_{**}$  – коэффициент поглощения ультразвуковых колебаний в газовой фазе.

Уравнение Гельмольца дополнено граничными условиями на поверхности излучателей и боковых границах промежутка.

$$\frac{\partial P}{\partial \mathbf{n}} = 2\pi f \rho_g; \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \mathbf{n}} = 0; \quad (3)$$

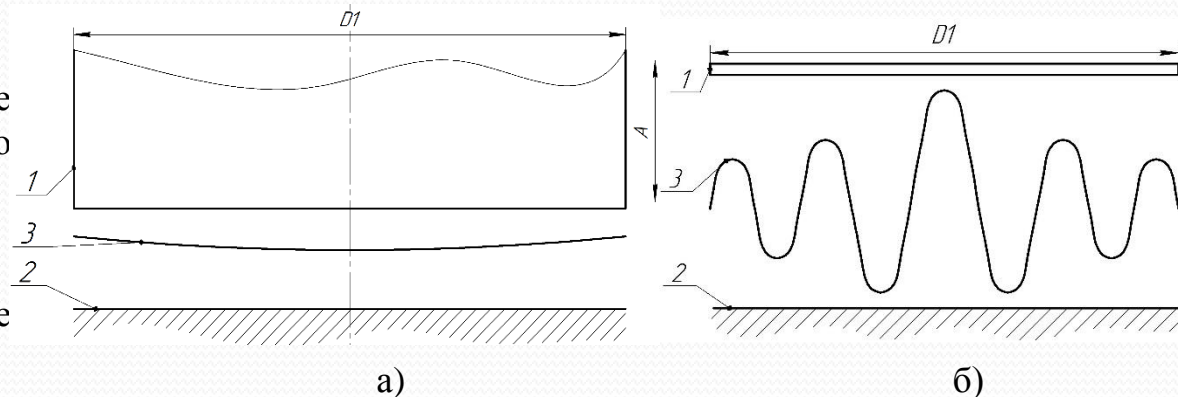
где  $f$  – частота колебаний излучателя, Гц;  $\rho_g$  – плотность газовой фазы,  $\mathbf{n}$  – вектор внешней нормали к границе воздушного промежутка;

1. Однородное распределение колебаний, которое создается с помощью продольно-колеблющегося излучателя:

$$A(x, y) \equiv 1.$$

2. Распределения Бесселя, создаваемое изгибно-колеблющимся излучателем:

$$A(x, y) \equiv \cos\left(\pi n \frac{2\sqrt{x^2 + y^2}}{D}\right); \quad (4)$$



а) поршневой продольно-колеблющийся излучатель; б) изгибно-колеблющийся излучатель; 1 – излучатель; 2 – отражатель; 3 – форма (распределение) колебаний излучающей поверхности  
Рисунок 1 – Формируемые колебания излучателей

где  $n$  – количество «нулей» колебаний излучателя;  $D$  – диаметр ультразвукового излучателя, м

# Распределения колебаний уровня звукового давления излучателей

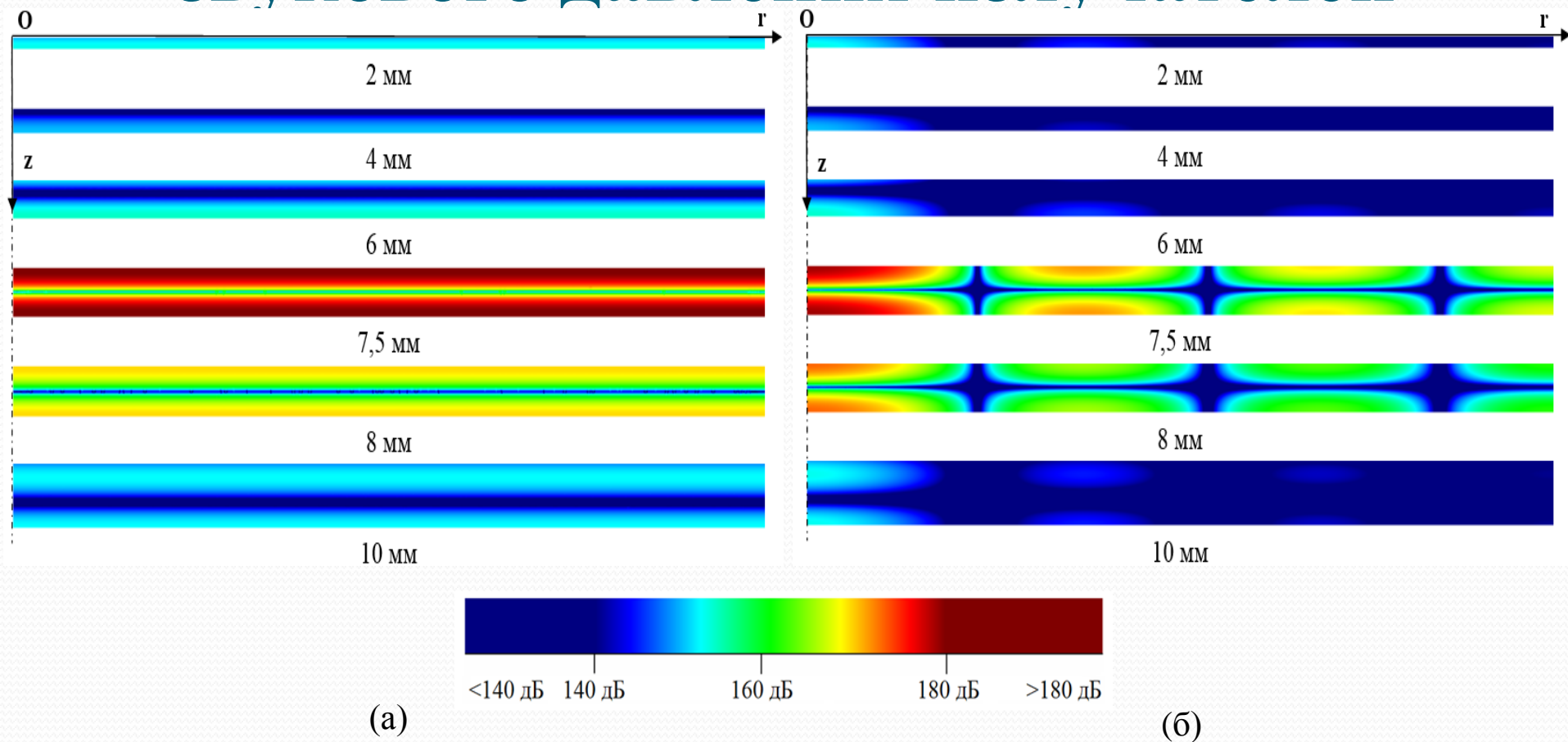


Рисунок 2 - Распределения уровня звукового давления в газовом промежутке при различных толщинах между излучателем и отражателем:  
а) поршневой продольно-колеблющийся излучатель; б) дисковый изгибно-колеблющийся излучатель

# Подмодель формирования вихревых потоков

Для определения функции тока использовалось уравнение сохранения импульса газа в вихревом потоке под действием эквивалентной силы, определяемой на основании распределений звукового давления.

$$\left( -\frac{\partial \psi}{\partial z} \left( -\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial^3 \psi}{\partial z^3} \right) - u_r \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \begin{pmatrix} -y \\ x \\ 0 \end{pmatrix}, \text{rot } \mathbf{F} ; \quad (5)$$

$$\omega \rho_0 \text{rot } \mathbf{F} = 2kk_{**} \nabla \text{Re } P \times \nabla \text{Im } P \approx \frac{\mu \pi f}{c^2 \rho_0} \Delta \nabla \text{Re } P \times \nabla \text{Im } P, \quad (6)$$

где  $\psi(\mathbf{r})$  – функция тока,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$\rho_0$  – равновесная плотность газовой фазы,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$k = (2 \cdot \pi \cdot f)/c_g$  ( $c_g$  – скорость звука в газовой фазе,  $\text{м}/\text{с}$ ) – волновое число,  $\text{м}^{-1}$ ;

$k_{**}$  – коэффициент поглощения ультразвуковых колебаний в газовой фазе;

$c$  – скорость звука в газе,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$\omega$  – круговая частота УЗ колебаний,  $\text{с}^{-1}$ ;

$f$  – частота колебаний излучателя, Гц;

При этом на границе воздушного промежутка функция тока тождественно равна нулю. Решение представленной системы уравнений позволяет рассчитать функцию тока формируемых вихрей.

# Линии тока вихревых акустических течений

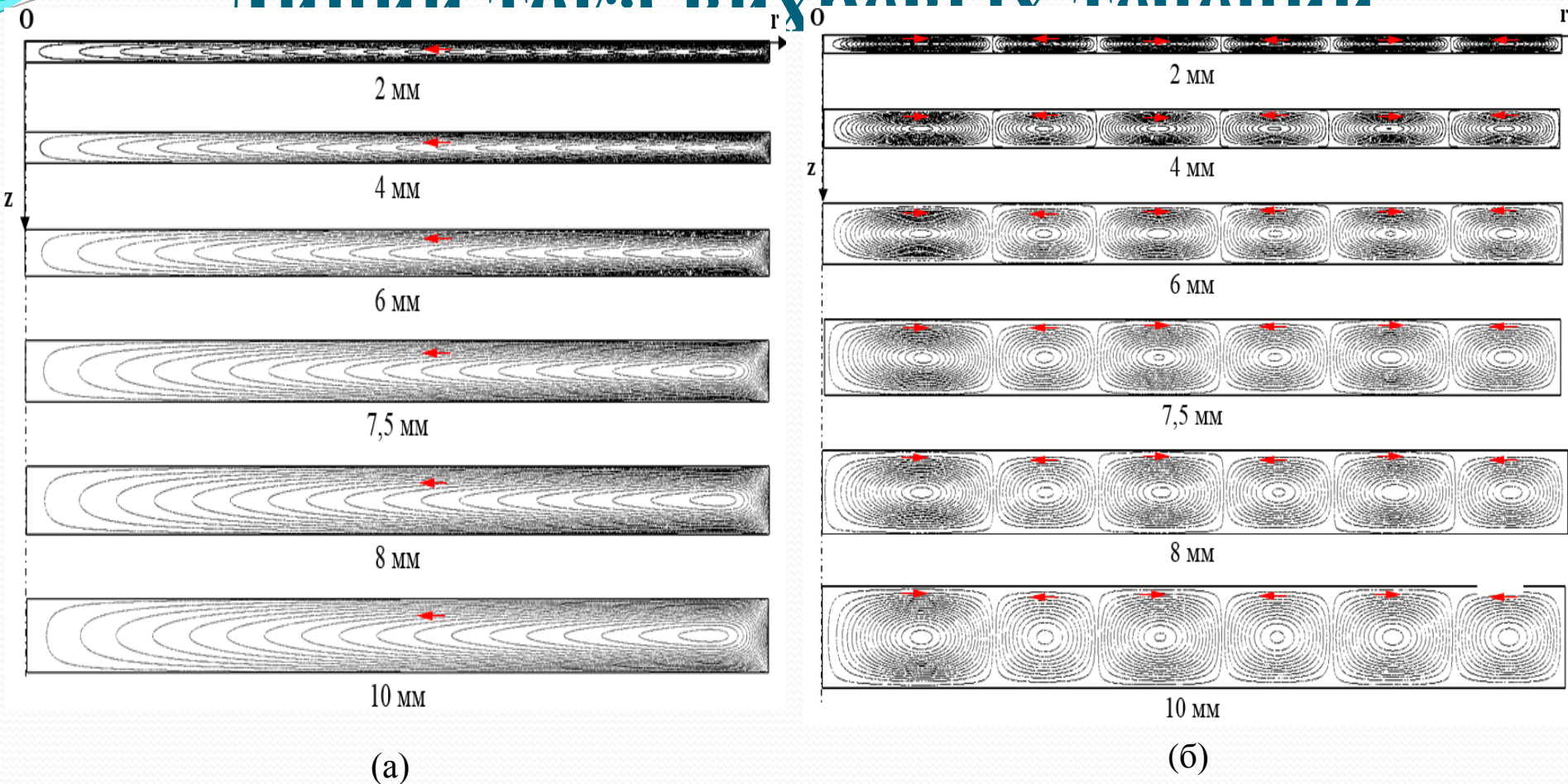


Рисунок 3 – Линии тока вихревых акустических течений в газовой фазе при различных толщинах слоя для продольно-колеблющегося излучателя (а) и изгибно-колеблющегося излучателя (б) (уровень звукового давления – 160 дБ, диаметр воздушного промежутка – 100 мм)

# Результаты численного анализа

Таблица 1 Параметры среды в воздушном промежутке и колебаний излучателя

Наименование параметра	Значение
Уровень звукового давления (при отсутствии отражателя), дБ	165
Амплитуда колебаний центра излучателя, мкм	16
Частота колебаний, кГц	22
Плотность газовой среды, кг/м <sup>3</sup>	1,22
Скорость звука в среде, м/с	343
Коэффициент поглощения акустических колебаний в среде, м <sup>-1</sup>	0,1

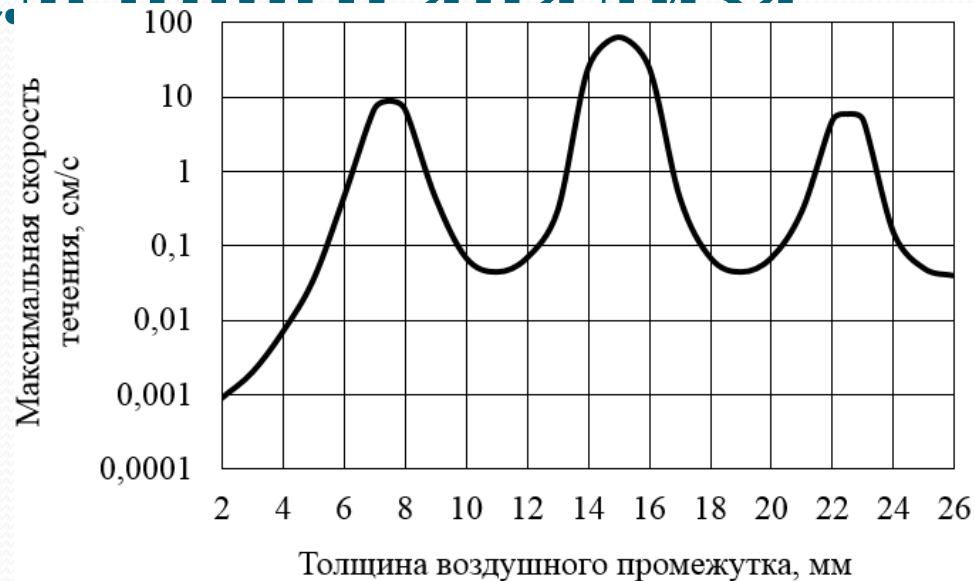


Рисунок 4 –Зависимость скорости акустических течений от толщины слоя

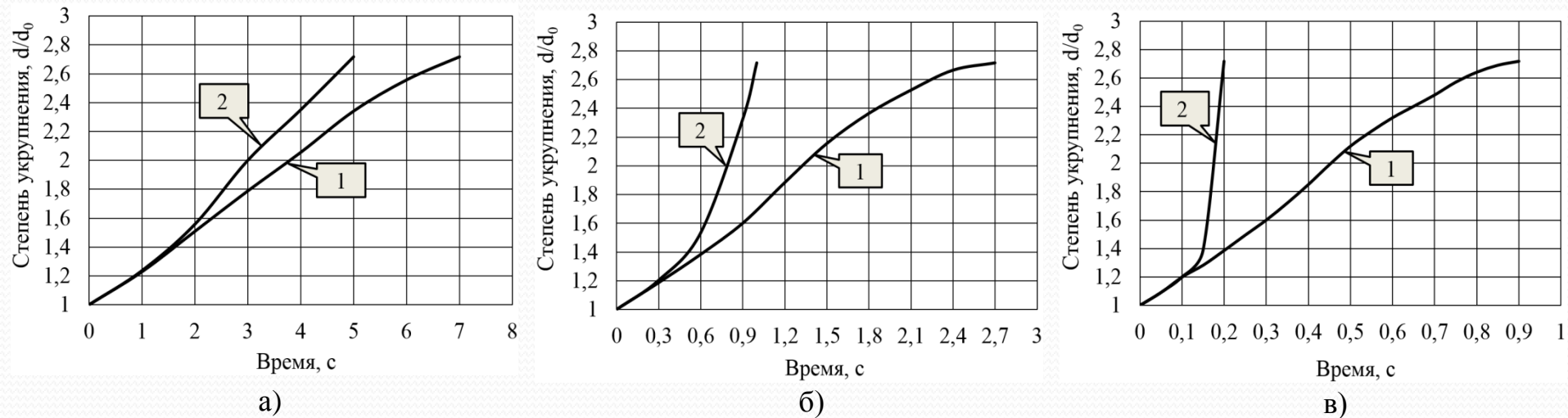
Эффективность коагуляции считалась как отношение текущей счетной концентрации к начальной:

$$\xi = \frac{\int_{x^2+y^2 \leq \frac{D^2}{4} \text{ и } 0 \leq z \leq H} \int_{R^3} f_k(\mathbf{u}_p, t) d\mathbf{u}_p dr}{\int_{x^2+y^2 \leq \frac{D^2}{4} \text{ и } 0 \leq z \leq H} \int_{R^3} f_k(\mathbf{u}_p, 0) d\mathbf{u}_p dr} = \frac{\int_V n_k(\mathbf{r}, t) dV}{\int_V n_k(\mathbf{r}, 0) dV} \quad (7)$$

Чем меньше это отношение (чем меньше остаточная концентрация), тем выше эффективность. Полученные значения были пересчитаны в степень укрупнения частиц.

# Результаты численного анализа степени укрупнения частиц от времени УЗ воздействия

$$\lambda = 15 \text{ мм}, d_{32(0)} = 2,5 \text{ мкм}, N_{inlet} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ г/м}^3$$

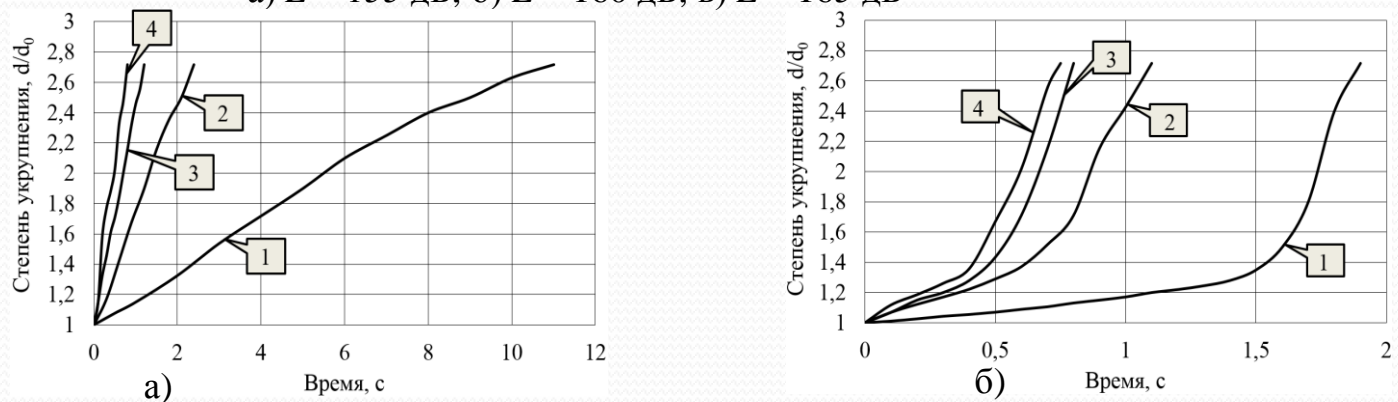


1 – продольно-колеблющийся излучатель; 2 – изгибно-колеблющийся излучатель

Рисунок 5 – Зависимости степени укрупнения частиц от времени УЗ воздействия при различных интенсивностях:

а)  $L = 155$  дБ; б)  $L = 160$  дБ; в)  $L = 165$  дБ

$\lambda = 15$  мм;  
 $L = 165$  дБ;  
 $d_{32(0)} = 2,5$  мкм.



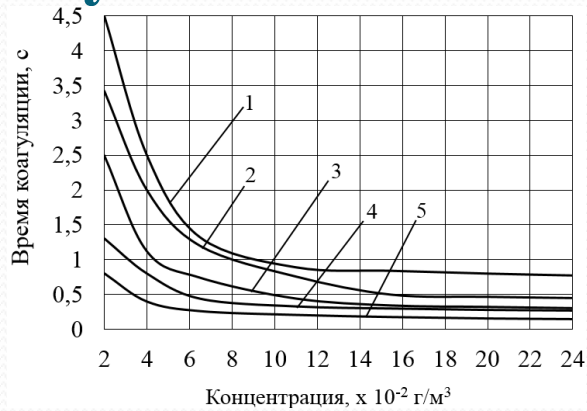
1 –  $N_{inlet} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ г/м}^3$ ; 2 –  $N_{inlet} = 8 \cdot 10^{-2} \text{ г/м}^3$ ; 3 –  $N_{inlet} = 16 \cdot 10^{-2} \text{ г/м}^3$ ; 4 –  $N_{inlet} = 24 \cdot 10^{-2} \text{ г/м}^3$

Рисунок 6 – Зависимости степени укрупнения частиц от времени коагуляции при различных начальных концентрациях: а) продольно-колеблющийся излучатель; б) изгибно-колеблющийся излучатель

# Результаты численного анализа зависимости времени

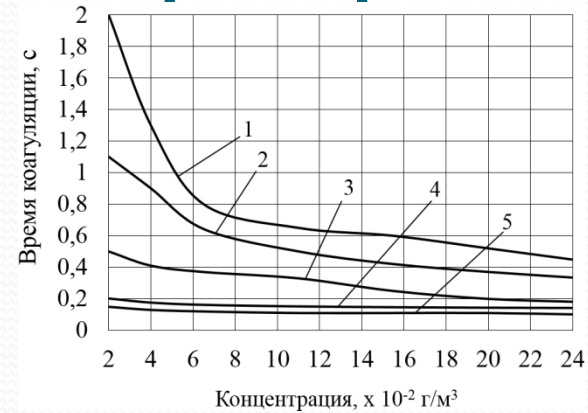
## коагуляции в зависимости от размера частиц

$\lambda = 15$  мм,  
 $d_{32(0)} = 2,5$  мкм



а)

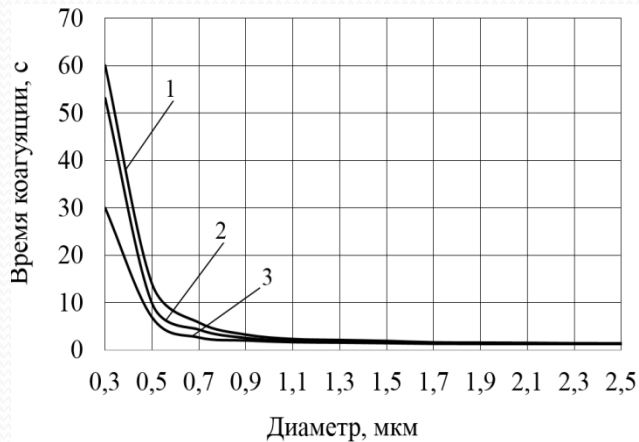
1 –  $L = 155$  дБ; 2 –  $L = 157$  дБ; 3 –  $L = 160$  дБ; 4 –  $L = 162$  дБ; 5 –  $L = 165$  дБ



б)

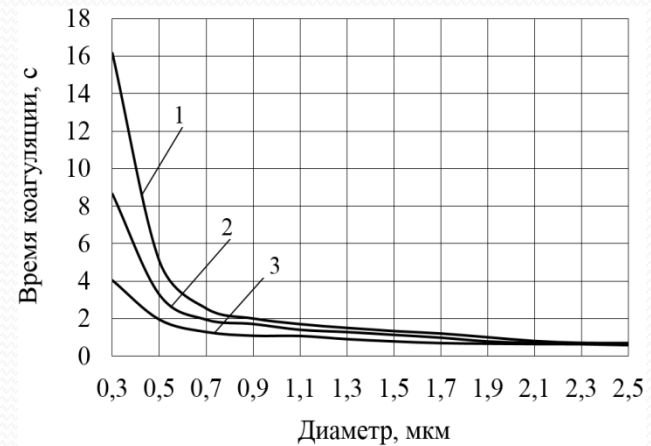
Рисунок 7 – Зависимости времени коагуляции от начальной концентрации при различных уровнях звукового давления: продольно-колеблющийся излучатель (а) и изгибно-колеблющийся излучатель (б)

$\lambda = 15$  мм;  
 $N_{inlet} = 2 \cdot 10^{-2}$  г/м<sup>3</sup>



а)

1 –  $L = 160$  дБ; 2 –  $L = 162$  дБ; 3 –  $L = 165$  дБ



б)

Рисунок 8 – Зависимости времени коагуляции от диаметра исходных частиц: продольно-колеблющийся излучатель (а) и изгибно-колеблющийся излучатель (б)



**Спасибо за внимание!**