

## Лекция 6

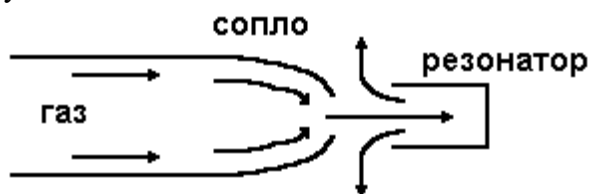
### УЗ химико-технологическая аппаратура для работы в газах.

На сегодняшней лекции мы с вами рассмотрим некоторые процессы, протекающие в газовых средах и интенсифицируемые с помощью упругих колебаний УЗ диапазона частот. Мы сформулируем требования к акустической аппаратуре, используемой для интенсификации различных химико-технологических процессов в газовых средах.

Прежде всего, рассмотрим источники УЗ колебаний, способные обеспечить возбуждение интенсивных колебаний в газовой среде. Помимо пьезоэлектрических, которые мы изучали, наибольшей эффективностью в данном случае обладают сирены - статические и динамические. Почему? Потому что они формируют УЗ колебания непосредственно в газовой среде.

#### 6.1 Источники УЗ колебаний в газовых средах.

1. Статические сирены или газоструйные излучатели. Принцип работы и конструкция.



Газ проходит через сопло, ускоряется. Вырывающаяся из малого отверстия струя за счет турбулентности обладает очень широким спектром колебаний. Резонатор позволяет выделить

нужную частоту. Для создания направленного излучения используются различные рупорные устройства.

Технические характеристики статических сирен:

Рабочее давление воздуха	2,25 - 3,0 кг/см
Акустическая мощность	100 Вт - 10 кВт
Рабочие частоты	3 - 20 кГц
Интенсивность	100 - 1000 МВт/м <sup>2</sup>
Сила звука	120 - 170 Дб

В ряде случаев применение таких излучателей затруднено из-за разбавления озвучиваемой среды (обрабатываемого газа) рабочим газом. В этом случае используются разделительные мембраны, закрывающие рупор или специальные конструкции, отводящие рабочий газ, например, отверстия в рупоре.

2. Динамические сирены.

Отличительная особенность - наличие ротора, приводимого во вращение электрическим мотором или пневматикой. В результате обеспечивается подача газа через периодически открываемые отверстия устройства.

Итак, рассмотрим конкретные химико - технологические процессы.

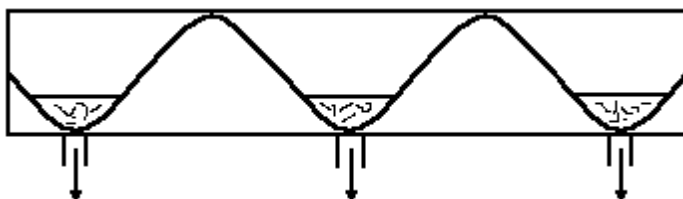
## 6.2. Акустическая коагуляция аэрозолей.

Как известно, многие химические процессы связаны с выбросом в атмосферу значительного количества ценных для производства и вредных для окружающей среды продуктов. Как правило, эти продукты находятся в отходящих газах в виде аэрозольных частиц (дым, туман), трудно улавливаемых в обычных аппаратах, использующих действие силы тяжести, инерции и центробежные силы. Очистке газов, содержащих частицы размером 1 - 3 мкм (сажа, сернистый туман), уделяется особое внимание.

Проведенные исследования по воздействию на такие среды УЗ колебаний позволили установить, что они интенсифицируют процесс коагуляции и упрощают очистку газов. Механизм коагуляции до конца не ясен, но очевидно, что основное значение имеет радиационное давление, обеспечивающее интенсивное движение частиц в УЗ поле.

Механизмы коагуляции:

1. Радиационное давление на твердые частицы в газовой среде заставляет их двигаться в точки УЗ стоячей волны, соответствующие пучностям. Для наглядности представьте, что туман был распределен равномерно в некотором объеме - трубе. После возбуждения УЗ колебаний твердые частицы скапливаются в точках с минимальным давлением и могут быть оттуда легко удалены.



2. На процесс коагуляции влияет броуновское движение частиц. Если они совершают броуновское движение, то вероятность объединения повышается.

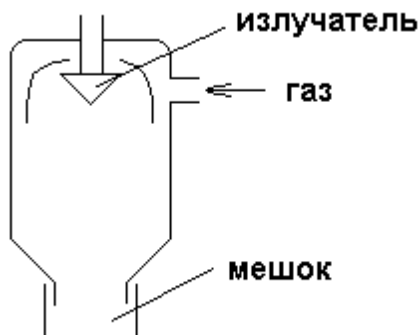
3. На процесс объединения дополнительно влияют акустические течения и виброускорения.

Требования к аппаратуре для коагуляции:

1. Процесс идет эффективно при интенсивностях не ниже 140 - 150 Дб.
2. Скорость потоков не должна создавать сил, достаточных для разрыва соединившихся частиц.
3. При слишком низкой концентрации коагуляция слаба из-за малого числа соударений.
4. Слишком высокая концентрация требует повышения интенсивности УЗ колебаний из-за сильного их затухания.
5. Учитывая, что скорость коагуляции зависит от размера частиц (крупные - быстрее), необходимо проводить процесс в несколько стадий, повышая рабочую частоту.
6. После предварительной очистки, когда число частиц значительно уменьшится, необходимо добавлять нейтральную аэрозоль для увеличения числа соударений.

### Установки промышленной коагуляции

Основные части установок: источник УЗ колебаний (сирена) и коагуляционная камера - колонна. Для примера рассмотрим установку для получения сажи из природного газа, сжигаемого с добавлением жидкого топлива.



Через башню, в верхней части которой установлена колонна, проходит 50 - 60 м<sup>3</sup> газа в минуту.

$$f = 35 \text{ кГц}; J = 10 \text{ Вт/м}^2 \text{ (160 Дб)}.$$

Коагулирует 90 % содержащихся в газе частиц сажи. Аналогичные установки используются для улавливания частиц тумана серной кислоты. Они имеют следующие характеристики:

$$\text{Расход газа} - 11,4 \text{ м}^3/\text{сек при } 52^\circ\text{C},$$

$J=150 \text{ Дб}, f=2,25 \text{ кГц}$ . Размер частиц - от 0,5 до 5,0 мкм.

Газы вводятся тангенциально в нижнюю часть цилиндрической коагуляционной колонны диаметром 2,4 м и высотой 10,5 м. Улавливается 90% серной кислоты, половина на внутренних стенках колонны, вторая половина - на дополнительных циклонах. Разработанная и используемая в нашей стране в 60-е годы установка позволяла снизить до 0,07 г/м<sup>3</sup> уход серной кислоты в атмосферу (при обычных условиях уходит более 10,7 г/м<sup>3</sup>).

Где используются в промышленности:

- очистка воздуха в забоях при бурении,
- для улавливания пыли окиси цинка при плавлении лома меди,
- для сепарации конденсата при добыче попутных и природных газов (высококипящие углеводороды),
- для коагуляции пылевидного катализатора.

### 6.3. АБСОРБЦИЯ

Многие процессы химической технологии основываются на явлении массообмена, происходящем между жидкой и газовой фазами. Одним из таких процессов является абсорбция газа. Кроме того, такие процессы как десорбция, ректификация, адсорбция, катализ или принципиально мало отличаются от абсорбции, или представляют собой процессы, в которых абсорбция является одной из определяющих стадий.

Наложение УЗ колебаний на двухфазную систему, как известно, способствуют турбулизации местных потоков, улучшается местное перемешивание и тем самым в значительной степени ускоряется поглощение газов жидкостью.

Первые результаты по интенсификации абсорбции были получены еще в 1956 году в Днепропетровском химико-технологическом институте. В работе исследовалось влияние УЗ с частотой от 1,0 до 1,2 кГц и интенсивностью порядка 30 кВт/м<sup>2</sup> на процесс абсорбции паров бензола маслом в трех вариантах:

- 1 абсорбция через спокойную поверхность масла при токе газа параллельно поверхности жидкости,
- 2 абсорбция газа перпендикулярно поверхности масла,
- 3 процесс абсорбции путем барботажа.

Получилось, что скорость абсорбции при использовании УЗ для всех трех случаев возрастала от 3 до 10 раз.

На практике установка выполняется следующим образом. В качестве источника УЗ колебаний используется пьезоэлектрический цилиндр. По стенкам пленкой стекает жидкость ( $h=0,2-0,3$  м). Вдоль оси продувается газ. Полученные результаты дают не менее чем 4-х кратное ускорение процесса абсорбции.

Чем все это объясняется? В пленке жидкости возникает местная турбулизация из-за возникновения кавитации. Кроме того, возникает система поперечных волн, увеличивающая поверхность раздела.

Большой интерес представляют результаты, полученные при барботировании углекислого газа через жидкость. Показано, что при некоторых частотах поглощение газа интенсифицируется даже при очень малых интенсивностях.

Требования к УЗ аппаратуре для абсорбции:

1. Невысокая интенсивность (148 - 157 Дб и менее).
2. Частота 6 - 20 кГц.
3. Скорость поглощения увеличивается не менее чем в 3 раза.

В качестве источников колебаний используются сирены, работающие без разбавления среды посторонними газами.

#### **6.4. Акустическая сушка.**

Процесс сушки заключается в удалении влаги из материала. Обычно это осуществляется за счет нагревания. Сушка твердых, сыпучих и других материалов распространена в самых разнообразных технологических процессах.

В большинстве случаев в качестве теплоносителя используется нагретый воздух. Но при сушке многих химических продуктов, биологических объектов, удобрений, нельзя проводить сушку при повышенных температурах, т. к. вещества либо разлагаются, либо теряют свои бактерицидные свойства.

Когда нельзя допускать повышения температуры при сушке, сушку осуществляют под воздействием УЗ колебаний. Первые результаты были получены еще в 1955 г. П. Грегушем (Венгрия). На частоте 25 кГц он получил 10-кратное ускорение сушки мокрого хлопкового волокна. Позже им же было получено УЗ ускорение сушки древесины.

Механизмы УЗ сушки очень сложны. Но очевидно, действующими факторами являются:

1. Уменьшение вязкости жидкости под действием УЗ способствует ускоренному перемещению влаги по капиллярам из глубины тела на поверхность.
2. Пузырьки газа, находящиеся в жидкости, под действием УЗ колеблются, выдавливая влагу из капилляров.
3. Радиационное давление, направленное в капиллярах из жидкости в газ, перемещает столбик жидкости капилляра, перемещая его к поверхности.

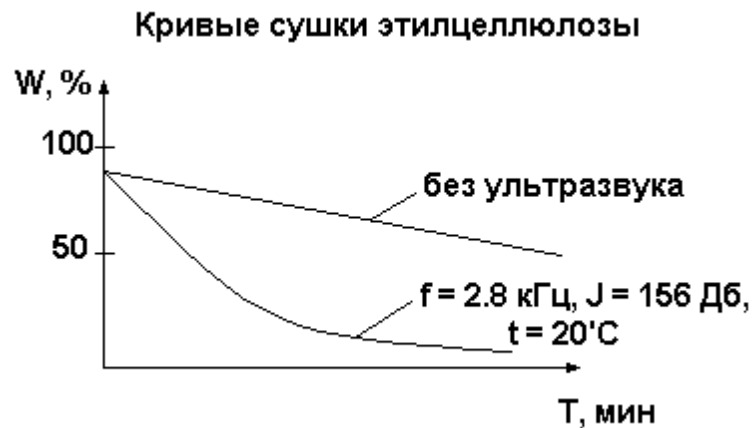
Сушка в УЗ поле происходит без нагрева материала. Именно поэтому это единственный способ сушки термочувствительных и легко окисляющихся материалов. Этот способ по скорости отличается от обычных методов.

Приведу пример: сушка силикагеля при начальной влажности 25%,  $J=152$  Дб,  $f=8$  кГц,  $t=15$  мин - полное высушивание.

Сравнение с вакуумной сушкой и сушкой нагретым воздухом (92°C): за это же время удалось удалить только 10-15% содержащейся влаги.

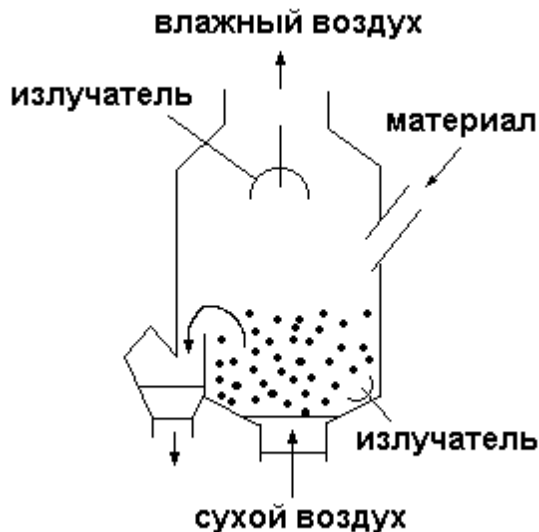
При сушке ферментов (не выдерживающих 40 С) процесс в акустическом поле занял 14 мин и скорость в сравнении с вакуумным методом повысилась в 3-4 раза. Особенности акустической сушки (требования к аппаратуре).

1. Существует нижняя граница  $J$ , при которой начинается интенсификация (порядка 145 Дб).
2. Нет зависимости скорости сушки от частоты в диапазоне от 2 до 25 кГц.
3. Наиболее эффективна сушка для тонких слоев (порядка 2-3 см).



Рассмотрим практические схемы сушилок.

Основные - это звукофицированные сушилки с кипящим слоем для сушки порошкообразных веществ. В вертикальном цилиндре в боковой и верхней части установлены излучатели.

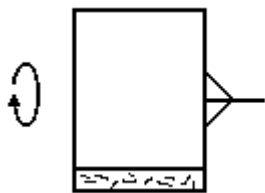


Через питатель материал загружается в сушилку на колосниковую решетку. Воздух для сушки подается снизу через распределительную сетку. При прохождении воздуха через сетку и материал он начинает интенсивно перемешиваться, «кипеть», образуя псевдосжиженный слой. Постоянно перемешиваемый материал подвергается воздействию УЗК и сушится.

По мере высыхания частицы становятся легче, поднимаются по верхней перегородке и сыпаются в бункер. Удаление влажного воздуха производится через верхний

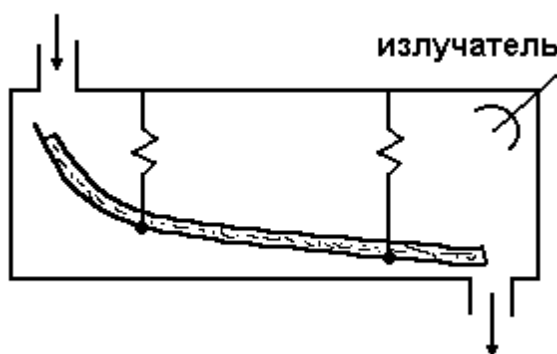
патрубок.

Сушилка барабанного типа.



Скорость вращения 15 - 60 об/мин.

Вибрационная сушилка.



### 6.5. Интенсификация процессов горения.

В химической технологии процессы горения имеют самые различные назначения. В частности, выделим два основных процесса:

1. Сжигание топлива с целью получения необходимого количества тепла для проведения химических процессов.
2. Сжигание продуктов с целью получения веществ, необходимых для дальнейшей переработки.

Иногда эти процессы протекают совместно. Интенсификация процессов горения является очень важной задачей, т.к. позволяет увеличить КПД и уменьшить размеры устройств для сжигания, сэкономить топливо, увеличить выход условного продукта.

Как известно, при горении происходят следующие основные процессы:

1. Прогрев частиц горючего вещества до начала испарения
2. Испарение горючего вещества
3. Горение, связанное с транспортированием кислорода к горючему и окисление последнего.

Два первых процесса протекают в гетерогенной системе: газ - твердое вещество, газ - жидкость (кроме горения газа). Третий процесс протекает в гомогенной газовой среде. Практически все три процесса протекают одновременно. Применение УЗ колебаний основано на турбулизации факела горения и прилегающей к нему области с помощью УЗК. При этом, возможно воздействие как на сами частицы, так и окружающую среду.

Механизм ускорения процессов заключается в том, что малые частицы колеблются в фазе и с амплитудой среды. Крупные отстают от колебаний среды и

вокруг них образуются гидравлические потоки, т.е. сложные вихревые движения. Они и определяют интенсификацию процесса горения. Расчеты и опыты показывают, что для создания потоков вокруг частиц необходима интенсивность порядка 145 - 155 Дб.

УЗ устройства, вмонтированные в камеры сгорания, позволяют интенсифицировать процесс горения жидкого топлива до эффективности сжигания газообразного топлива.

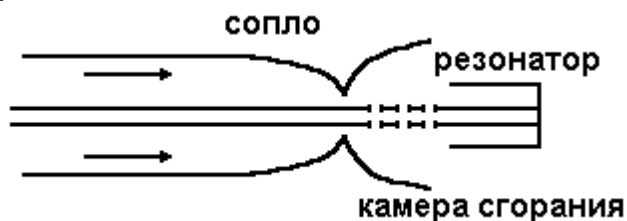
УЗ аппараты и устройства для ускорения химических реакций, связанных с горением

Воздействие осуществляется либо в специальных резонансных камерах - топках, либо в топках с акустическими форсунками.

1. Акустическая камера сгорания представляет собой емкость, в которую подается сжигаемый материал и одновременно создаются колебания.

Источником УЗ колебаний служат свистки-сирены, монтируемые в стенках камеры. Воздух, питающий свистки, является одновременно и окислителем. Частота колебаний выбирается соответствующей резонансной частоте камеры.

2. Акустические форсунки представляют собой статические сирены, в которые одновременно с окислителем (воздухом) в область формирования УЗ колебаний через трубку подается топливо.



Таким образом, интенсифицируется процесс горения жидкого топлива при выплавке чугуна ( $f = 4$  кГц,  $J = 150$  Дб).

Количество СО в отходящих газах  $< 1\%$ .

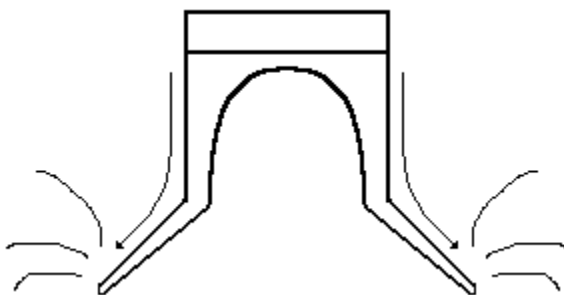
## 6.6. Получение аэрозолей

По сравнению с существующими методами получения аэрозолей УЗ метод обладает рядом преимуществ:

1. Габариты аппаратов очень малы.
2. Факел получается однородным.
3. Концентрация аэрозолей очень высокой.
4. Возможность получения частиц меньшего размера.

УЗ распыление можно обеспечить как с помощью свистков, так и с помощью пьезоэлектрических преобразователей. Устройства с пьезоэлектрическими преобразователями используются для распыления жидкостей в УЗ фонтане. Этот способ эффективен, но малопроизводителен.

В последние годы широкое распространение получил способ распыления тонких слоев жидкости с помощью пьезоэлектрических преобразователей.



Распыление тонких слоев дает высокую производительность. Так, например, при распылении эмалевой краски с поверхности преобразователя, колеблющегося с частотой  $f = 20$  кГц и амплитудой  $d = 30$  мкм, в аэрозоль переходит около  $0.15$  м<sup>3</sup>/час краски с  $1$  дм<sup>2</sup> поверхности.

Размер капелек колебался от 2 до 500 мкм при размерах основной фракции 30 - 70 мкм.  $P = 650$  Вт. Размер капелек  $\sim f_0$  и  $J$ , а также зависит от порога возникновения кавитации, давления паров жидкости и толщины ее слоя.

Где применяют распыление:

- распыление расплавов металлов (частицы правильной формы);
- медицина и т. д.
- аппараты тепло - и массообмена (скрубберы, сушилки, абсорберы).

### 6.7. Предотвращение пенообразования

Это одна из новых областей применения УЗ колебаний. Во многих процессах химической технологии является пенообразование. Образующаяся пена препятствует полной загрузке аппаратов, усложняет дозировку, приводит к уносу ценных продуктов и т. д. Введение химических пеноразрушителей типа ПАВ или растекающихся по поверхности масел бывает очень эффективно, но не всегда допустимо по условиям технологического процесса.

В последние годы эффективно используют УЗ колебания диапазона до 35 кГц. В основном здесь используются газоструйные излучатели. Результаты исследований показывают, что поверхность пенообразующей жидкости можно удержать без пены, если ее озвучивать при  $f = 6 - 11$  кГц и  $J = 147 - 148$  Дб.

Примеры:

- обеспенивание топлива реактивных самолетов при быстром подъеме; количество пены, разрушенной УЗ, составляет от 20 до 60 л/мин;
- разрушение бродильной пены (скорость образования пены без УЗ составляла 40 л/мин). Мощность излучателя  $\sim 60 - 100$  Вт при  $J \sim 143$  Дб.

Механизм пеногашения.

1. Нарушение целостности пузырьков вследствие изменяющегося давления.
2. Резонанс при совпадении собственных частот с частотой УЗ поля.
3. Вихревое движение у поверхности пены.

Применение мощной нч сирены позволяет успешно бороться с пенообразованием на большой площади (до 2 м<sup>2</sup>). Для каждой пены существует оптимальная частота, зависящая от геометрических размеров пузырька и свойств пенообразующей жидкости.