

Процессы и аппараты фармацевтических производств

- Гидравлические и реологические
 - В элементах машин и аппаратов, работа в вязких средах
- Механические
 - измельчение, прессование, сортирование, гранулирование и др.
- Гидромеханические
 - Перемешивание в жидких средах, фильтрование, осаждение, мойка и др.
- Биохимические
 - Ферментация, брожение, стерилизация, дезинфекция
- Физико-химические
 - Горение, взрывы

Тепловые

- Нагревание
- Охлаждение
- Выпаривание
- Конденсация
- Получение холода

Массообменные

- Сушка
- Перегонка
- Сорбция
- Кристаллизация
- Растворение
- Экстрагирование
- экстракция

Простые тепловые процессы

- **Теплопроводность** – перенос теплоты (внутренней энергии) при непосредственном соприкосновении тел с различной температурой – энергия беспорядочных тепловых колебаний передается от одного тела к другому путем непосредственных соударений молекул.
- **Конвекция** – перенос теплоты в пространстве вместе с движущимися объемами газа или жидкости.
 - Естественная конвекция обусловлена архимедовыми силами за счет разности плотностей объемов среды
 - Искусственная конвекция за счет потоков среды создаваемых насосом или вентилятором
- **Тепловое излучение** – перенос тепла электромагнитными волнами ($0,6-10^4$ мкм К, ИК, СВЧ) в глубину высушиваемого материала (0,1-100 см) – происходит двойное преобразование энергии:
 - Энергия теплового движения молекул преобразуется в энергию электромагнитного излучения (З-н Стефана-Больцмана: энергия электромагнитного излучения пропорциональна четвертой степени температуры поверхности тела)
 - Электромагнитное излучение поглощается другим телом и превращается в энергию теплового движения молекул (воздух через который проходит излучение не нагревается)

Все сложные процессы
складываются из простых

Носители тепла

• Водяной пар 100-170 °С до 10 атм

- Высокий коэффициент теплопередачи
- большое количество тепла при конденсации
- Равномерный обогрев за счет постоянной температуры конденсации
- легкое регулирование обогрева

Влажный насыщенный (острый) 100 °С атм

давл. – пар вступающий в непосредственный контакт с нагреваемой жидкостью
Получают в паровых котлах при незаконченном парообразовании

• Горячая вода до 130 °С более 100 атм

• Перегретая вода до 350 °С более 200 атм

- Отбросная вода – конденсат из выпарных установок
- Установки сложны
- Ограниченные возможности применения теплообменников

Перегретый 130-170 °С до 10 атм.

- Получают в паровых котлах при прохождении через пароперегреватели
- Пригоден для транспортировки
- небезопасен из-за давления

Сухой насыщенный (глухой) 100 °С атм

давл. – пар передающий свое тепло через стенку

Получают в паровых котлах при законченном парообразовании (проходя через сухопарники)

пригоден для транспортировки

Воздух – 20 °С для охлаждения

Доступен

Низкий коэффициент теплопередачи, расход энергии на работу вентилятора

Вода – до 4 °С для охлаждения

Высокий коэффициент теплоотдачи, доступно, дешево

• Отработанные газы 300-500 °С

• Горячие топочные газы 400-1000 °С

• Пары высококипящих органических жидкостей (дифенильная смесь и т.п.) 200-250 °С 8-10 атм

• Высококипящие органические жидкости: минеральные масла, тетрахлордифенил, глицерин, дифенильная смесь, силиконы 250-400 °С

• Расплавы: соли - тройная нитрит-нитратная смесь - до 140 °С; металлы Pb, Bi, олово, их сплавы - до 1000 .

• Электрический ток: (электрическая дуга 1500-2000 °С, индукционные токи до 1000 °С, СВЧ)–

Виды теплообменников

- **Кожухотрубный** - носитель тепла в трубе, нагреваемая жидкость в межтрубном пространстве кожуха снаружи – движение противотоком.
 - Компактен, большая поверхность теплообмена, простота в изготовлении и надежность в работе, небольшой расход металла, трубы изнутри легко доступны чистке
 - Невысокая скорость пропускания теплоносителя, трудность очистки межтрубного пространства
- **«Труба в трубе»**
 - Носитель тепла движется по наружным трубам, нагреваемая жидкость по внутренним, Батарея из двух и более теплообменных элементов, расположенных один под другим
 - Высокий коэффициент теплопередачи (из-за высокой скорости теплоносителя), простота изготовления
 - Громоздкость, большой расход металла на наружные трубы, не участвующие в теплообмене
- **Змеевиковый**
 - Носитель тепла (холода) в змеевике снаружи кожуха аппарата.
 - Пригоден для нагрева или охлаждения небольшого количества жидкости, простота конструкции
 - Большое гидравлическое сопротивление, трудность очистки змеевика
- **С паровой рубашкой** - паровая рубашка с наружи корпуса - сверху греющий пар – снизу выводится конденсат (высота паровой рубашки должна быть не ниже уровня жидкости в аппарате)
 - Высокий коэффициент теплоотдачи при соответствующем материале конструкции
 - Применим только для нагрева

Требования к теплообменникам:

- Поддержание необходимой температуры процесса и возможность её регулировки
- Соответствие рабочих скоростей движения продукта продолжительности его нахождения (нагревания) в аппарате
- Соответствие материалов аппарата химическим свойствам продукта
- Соответствие конструкции рабочим направлениям движения сред
- Микробиологическая безопасность

Способы повышения интенсивности теплообмена

- Уменьшение толщины гидродинамического пограничного слоя
 - увеличение скорости потока и его турбулизация
 - Искусственная турбулизация достигается при формировании кольцевых выступов на внутренней поверхности труб, при движении жидкости по ним контактирующие слои завихряются и переносятся к центру потока, что приводит к выравниванию температурного поля, а теплообмен интенсифицируется в 2-3 раза
- Увеличение коэффициента теплоотдачи от стенок вертикально установленных трубок к текущей по ним жидкости путем организации её пленочного течения
 - Удаление центральной части потока жидкости в которой градиент температуры меньше, чем в периферии
- Улучшение условий отвода неконденсирующихся газов и конденсата при паровом обогреве
- Устранение застойных зон при обтекании поверхностей теплообмена
- Оптимизация температур и дополнительных термических сопротивлений

Общие правила эксплуатации теплообменников

- Теплоносители необходимо пропускать с максимально возможными скоростями
- Поверхность теплообмена должна быть свободна от загрязнений
- Для удаления образующихся загрязнений поверхность теплообмена должна быть доступна для чистки
- Теплоносители с меньшим коэффициентом теплоотдачи следует пропускать по трубам, поскольку при большой скорости возрастет коэффициент теплопередачи
- Теплоноситель выделяющий осадок, нужно пропускать со стороны где легко осуществлять чистку
- Для уменьшения потерь тепла, носители с высокой температурой целесообразно пропускать по трубам
- Теплоноситель с высоким давлением целесообразно пропускать по трубам, что бы корпус не находился под давлением

Выпаривание - процесс *концентрирования жидких растворов нелетучих веществ* путем частичного удаления растворителя при кипении жидкости.

Назначение процесса выпаривания:

- концентрирование растворов, суспензий, эмульсий
 - получение жидких экстрактов, варка сиропов
 - промежуточная операция при производстве сухих экстрактов.
- выделение растворенного вещества
- извлечение летучих компонентов
- получение чистого растворителя.

Объекты выпаривания - преимущественно водные растворы нелетучих или малолетучих веществ.

Конечный продукт - концентрированная, но пригодная для перекачки жидкость.

Физический смысл - выпаривание происходит благодаря подводу теплоты извне (чаще водяной пар давление до 1,2 МПа, - греющий, первичный) и непрерывному удалению образующегося при кипении раствора пара (вторичный, если его отбирают на сторону - экстра-пар).

Движущая сила выпаривания - разность температур греющего пара и кипящего раствора, называемая полезной. Она всегда меньше разности температур первичного и вторичного паров, т.к. раствор кипит при более высокой температуре, чем чистый растворитель.

при атмосферном давлении

«+» наиболее простой

«-» не экономичный (вторичный пар не используется)

под вакуумом

«+» при пониженной температуре (для высококипящих и термолабильных в-в); возрастание полезной разности температур), что позволяет уменьшать площадь нагрева в аппарате и сокращать время процесса.

«-» дополнительное оборудование (вакуум-насос, конденсатор и т.д.); расход теплоты

при повышенным давлением

«+» использование вторичного пара для выпаривания и теплотехнических целей.

• Многокорпусные выпарные установки - несколько выпарных аппаратов (корпусов), в которых вторичный пар каждого предыдущего корпуса используется в качестве греющего в последующем. Давление в последовательно соединенных корпусах снижается таким образом, чтобы обеспечить достаточную разность температур между кипящим раствором и греющим паром в каждом корпусе

Основные характеристики процесса выпаривания

- **Концентрация раствора** - масса твердого вещества, растворенного в 1 кг раствора. При выпаривании последнего его концентрация повышается от X_n до X_k , а его масса уменьшается от M_n до M_k . Так как растворенное вещество практически нелетучее, разность $G_n - G_k$ равна количеству выпаренного растворителя, т.е.
- $M_n - G_k = W$ или $M_n = M_k + W$. (1)
- Из материального баланса по растворенному веществу в исходном и концентрированном растворах следует: $M_n \times X_n = M_k \times X_k$. (2)
- Тогда количество выпаренного растворителя, которое необходимо, равно: $W = M_n(1 - X_n/X_k)$ (3)
- **Температура кипения раствора** - важнейший параметр выпаривания, зависит от химической природы и количества растворенных твердых веществ и растворителя, а также от давления над раствором:
 $t_{кип} = T + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3$ (4)
- где $t_{кип}$ - температура кипения раствора, град;
 - T - температура вторичного пара, град;
 - Δ_1 - температурная депрессия, град;
 - Δ_2 - гидростатическая депрессия, град;
 - Δ_3 - гидравлическая депрессия, град.
- **Температурная депрессия** (физико-химическая, концентрационная) определяется разностью температур кипения раствора и чистого растворителя при одинаковом давлении (зависит от химической природы раствора, возрастает с увеличением концентрации и внешнего давления)
- **Гидростатическая депрессия** обусловлена повышением температуры кипения раствора, связанного с гидростатическим давлением столба жидкости в кипятильных трубках
- **Гидравлическая депрессия** обусловлена трением и местными сопротивлениями, которые преодолевает вторичный пар при движении через сепарационные устройства (брызгоотделитель, паропроводы). Уменьшение давления вторичного пара приводит к некоторому снижению его температуры насыщения (в среднем 1 °С).

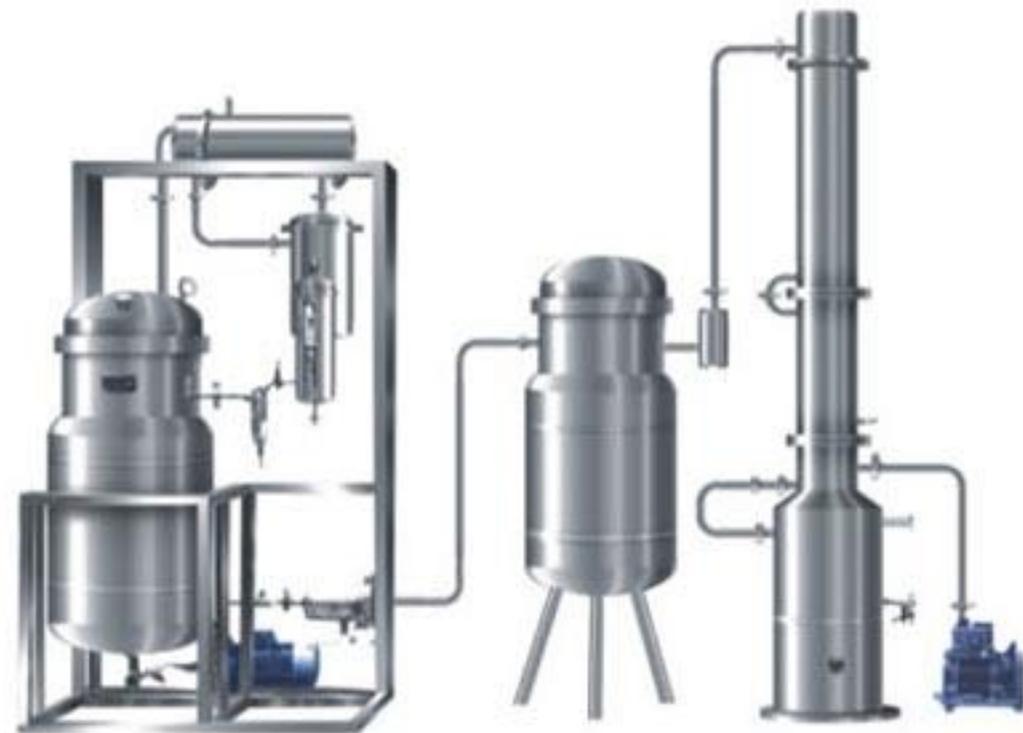
для смешивания, варки
концентрирования
жидких растворов.

Отличительные
особенности:

- Термостатирующая рубашка
- Корпус котла поворачивается на 180 градусов для выгрузки.

Вакуумный выпарной
аппарат

для концентрирования,
кристаллизации,
экстракции,
дистилляции:
корпус, емкость
концентрирования,
сепаратор, охладитель,
конденсатор, приемник.



Экстрагирование РМ для получения очищенных концентрированных вытяжек. Мацерация - при атмосферном давлении, варка в воде, мацерация, принудительная циркуляция, сбор экстракта, сбор растворителя.

Нагрев: паровой, электрический



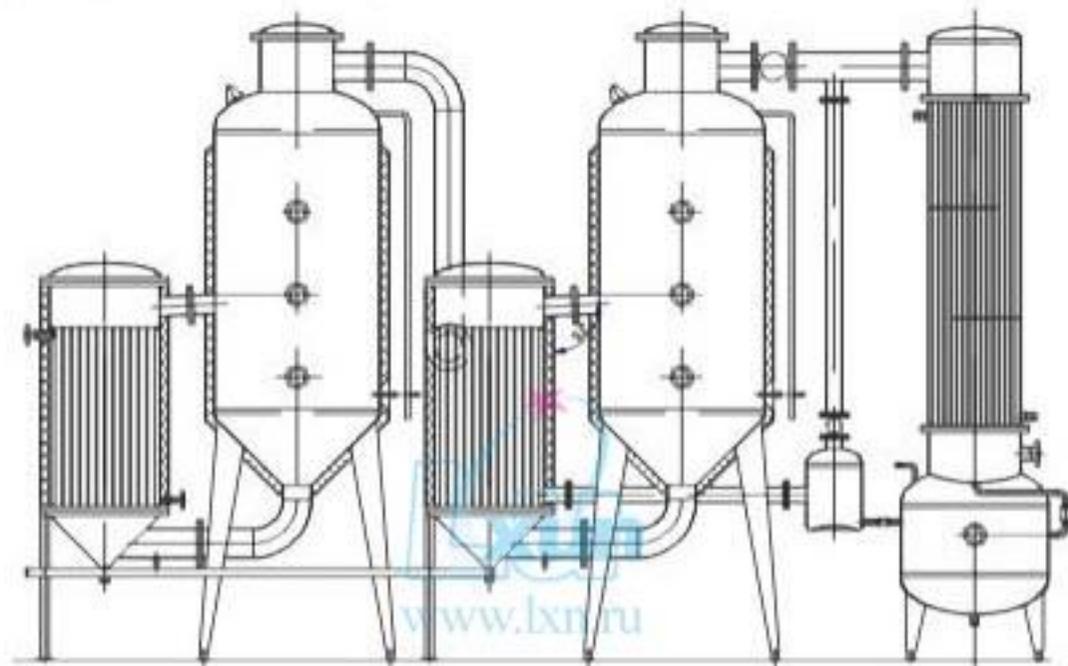


Односекционный концентратор

для концентрирования жидких растворов и сбора органических растворителей.

Отличительные особенности

- Внешний нагрев, естественная циркуляция и вакуумное выпаривание дает эффективное концентрирование;
- Процесс происходит в замкнутом пространстве, что сохраняет запах и вкус сырья. полученные продукты отличаются

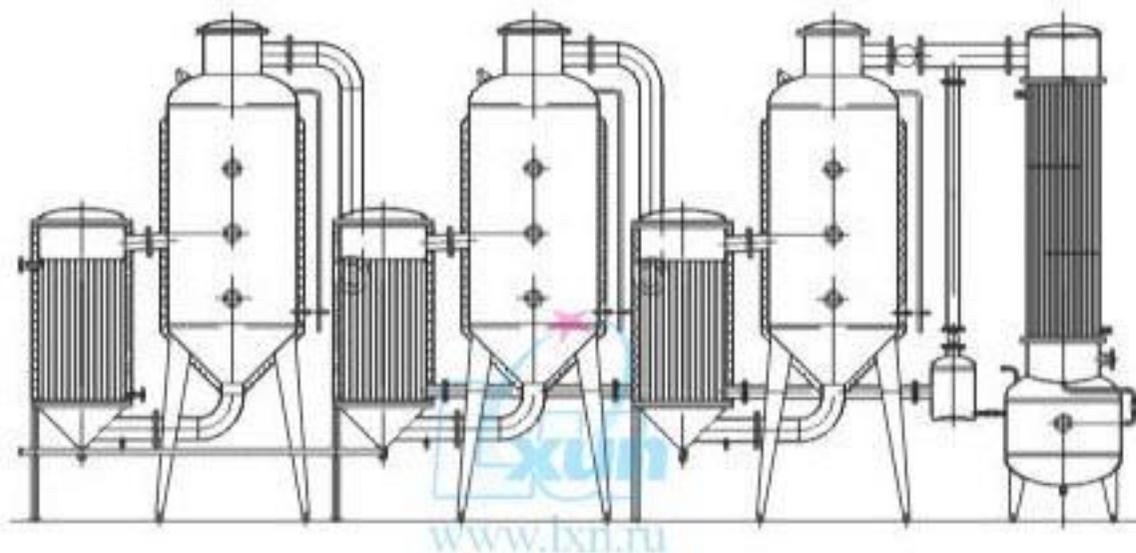


Двухсекционный ВА

При двухсекционном выпаривании используется вторичный пар, что экономит 50% энергии, одновременно происходит сбор растворителя;

Трёхсекционный ВА

- Процесс происходит в замкнутом пространстве - сохраняется запах и вкус сырья, полученные продукты отличаются однородностью и чистотой;
- При трехсекционном выпаривании используется вторичный пар, что экономит 70% энергии, одновременно происходит сбор растворителя;



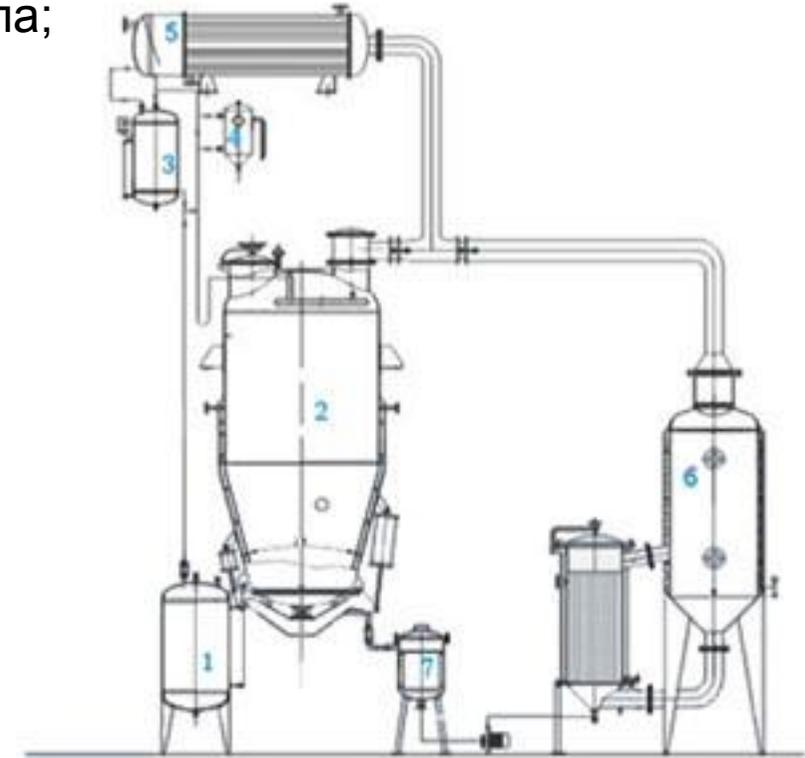
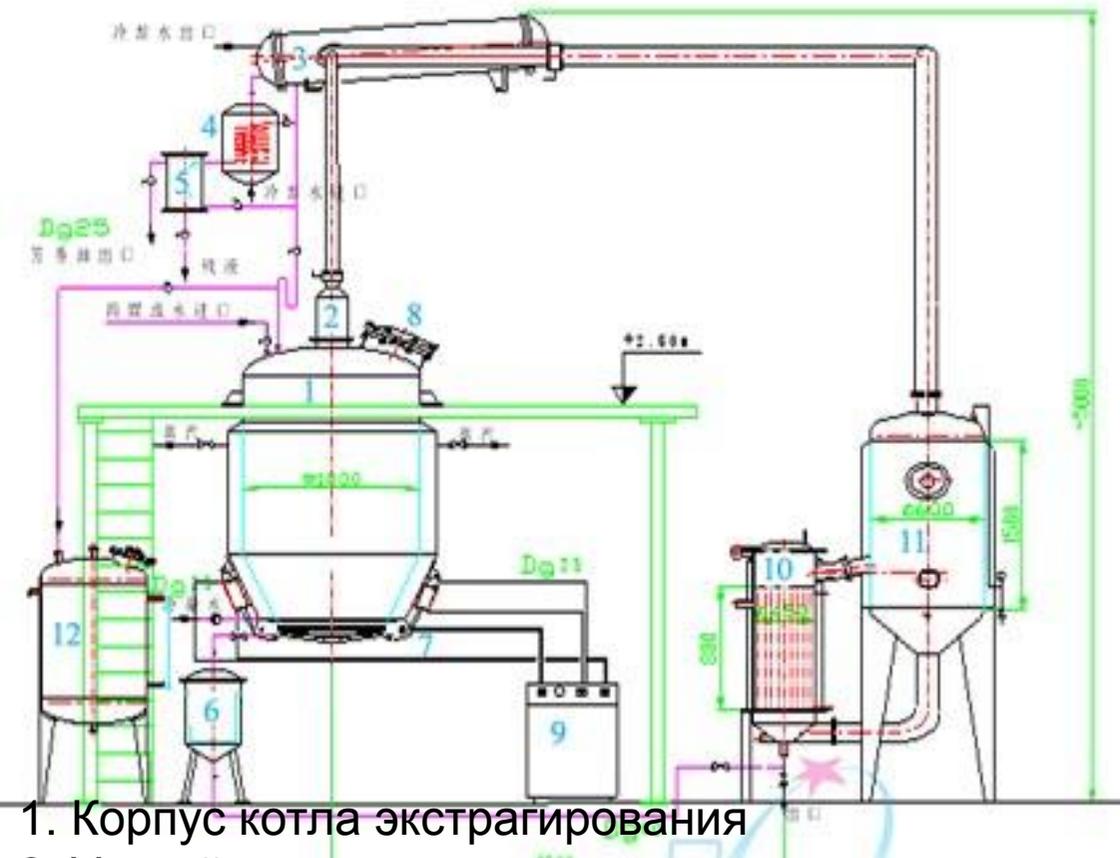
Одновременное экстрагирование, концентрирование, сбор растворителя. Уменьшение расхода растворителя. Сокращение времени (непрерывно) на 1/3. Экономия энергии (вторичный пар используется, для нагрева).

Экстрагирование и концентрирование при низкой (до 60 С°) и высокой температуре (до 100 С°).

Экстрагенты: спирт, вода

- автоматическая система мойки;

Автоматическая сепарация воды и масла;



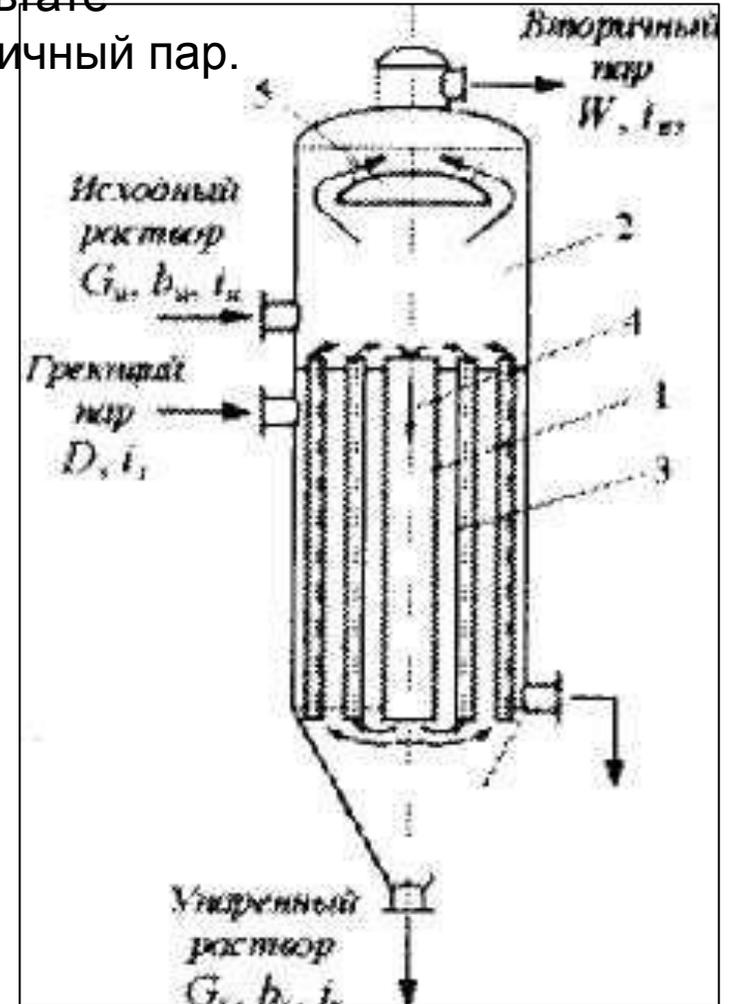
1. Корпус котла экстрагирования
2. Устройство для удаления пена
3. Конденсатор
4. Охладитель
5. Сепаратор масла-воды
7. Дверь с пневматическим приводом
8. Люк для заправки сырья
9. Пульт управления
10. Нагреватель
11. Испаритель

1. Емкость для хранения раствора
2. Котел для экстрагирования
3. Вакуумный преобразователь
4. Сепаратор масла-воды
5. Конденсатор
6. Конденсатор внешней циркуляции
7. Фильтр

Однокорпусные выпарные установки

Однокорпусная выпарная установка включает один выпарной аппарат в который поступает греющий пар и исходный раствор, в результате выпаривания получают концентрированный раствор и вторичный пар.

- Аппарат состоит из нагревательной камеры 1 и сепаратора 2. Камера и сепаратор могут быть объединены в одном аппарате или камера может быть вынесена и соединена с сепаратором трубами. Камера обогревается обычно водяным паром, поступающим в ее межтрубное пространство.
- Поднимаясь по трубам 3, выпариваемый раствор нагревается и кипит с образованием вторичного пара.
- Отделение пара от жидкости происходит в сепараторе 2.
- Освобожденный от брызг и капель в брызгоотделителе 5 вторичный пар удаляется из верхней части сепаратора.
- Часть жидкости опускается по циркуляционной трубе 4 под нижнюю трубную решетку греющей камеры. Вследствие разности плотностей раствора в циркуляционной трубе 4 и парожидкостной эмульсии в трубах греющей камеры жидкость циркулирует по замкнутому контуру.
- Упаренный раствор удаляется через штуцер в середине аппарата.



1 - нагревательная камера;

2 - сепаратор;

3 - кипящие трубы;

4 - циркуляционная труба;

5- брызгоотделитель

в однокорпусном аппарате на выпаривание 1 кг воды требуется более 1 кг греющего пара.

Для снижения расхода греющего пара выпаривание ведут в многокорпусных установках с многократным использованием теплоты греющего пара, поступающего в первый корпус установки путем обогрева каждого последующего из следующего корпуса.

Выпариваемый раствор подается центробежным насосом 8 в подогреватель 4, нагревается до кипения и подается в аппарат 1 установки.

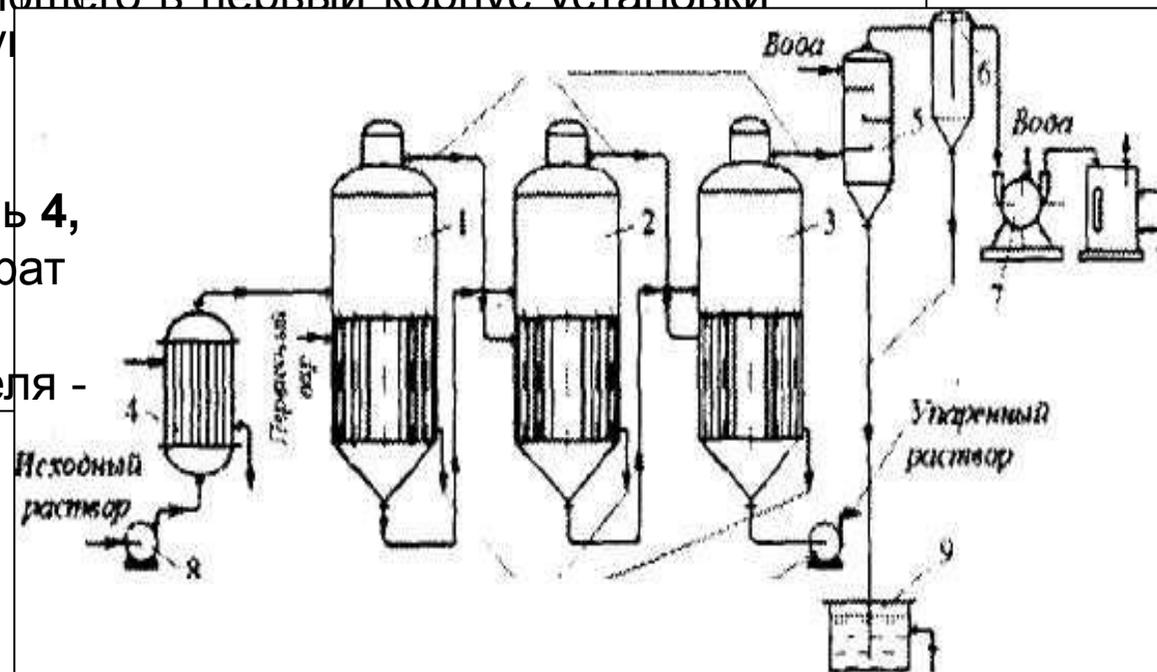
Теплообменная поверхность подогревателя - трубы, обогреваемые в межтрубном пространстве насыщенным паром. Раствор внутри труб, кипит и частично выпаривается.

Вторичный пар, поступающий в верхнюю часть аппарата - сепарационное пространство, отделяется от брызг и поступает в межтрубное пространство аппарата 2 для выпаривания.

Частично выпаренный в аппарате 1 раствор поступает самотеком в аппарат 2.

Образовавшийся в межтрубном пространстве аппарата 1 конденсат через конденсатоотводчик удаляется из аппарата.

Аналогично процессы выпаривания протекают в аппаратах 2 и 3.



Многокорпусная прямоточная вакуум- выпарная установка:

1, 2, 3 - выпарные аппараты;
4 - подогреватель исходной смеси;
5 - барометрический конденсатор;

6 - ловушка;

Греющий пар поступает в корпус 1 и далее вторичный пар каждого корпуса подается в качестве греющего в последующие корпуса.

Исходный раствор поступает не в первый корпус, как в прямоточной установке, а в последний и движется противотоком навстречу пару, достигая конечной заданной концентрации в корпусе 1 с помощью установленных между корпусами 1-2, 2-3 насосов 4, 5.

Пар, греющий первый корпус и имеющий наиболее высокую температуру, нагревает выходящий концентрированный раствор

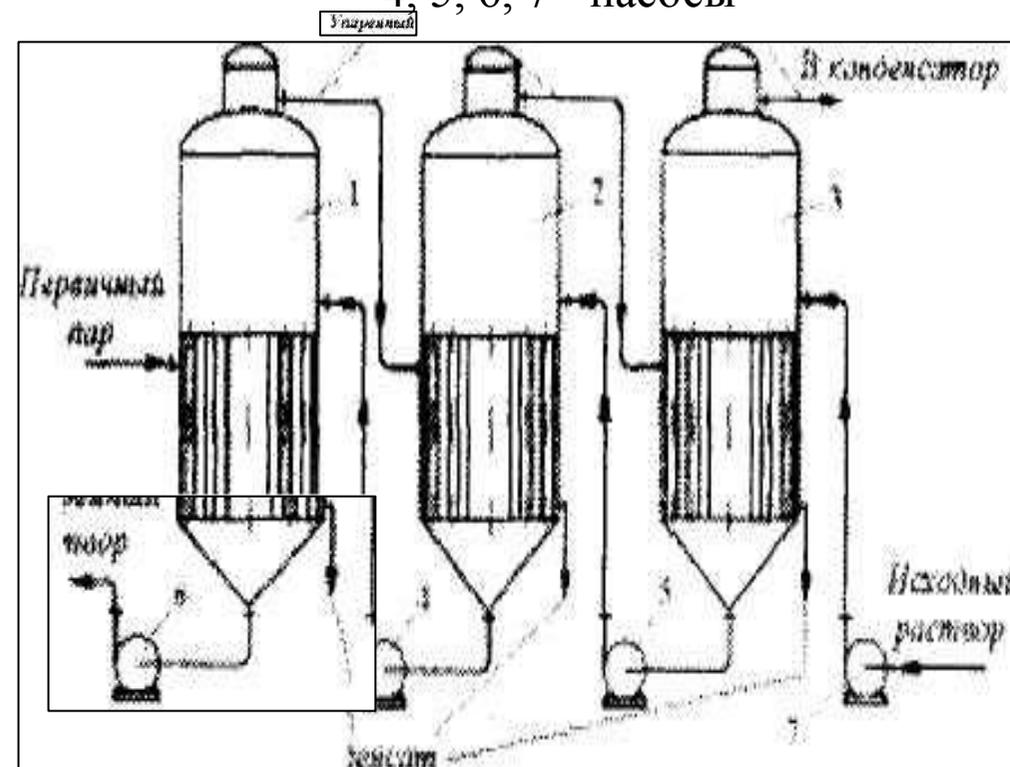
до более высокой температуры, чем в прямоточной схеме

«+»

Многокорпусная противоточная выпарная установка:

1, 2, 3 - выпарные аппараты;

4, 5, 6, 7 - насосы



свойства выпариваемых растворов
производительность
вид теплоносителя

- периодические
- непрерывнодействующие аппараты (более экономичны в больших масштабах)

Площадь, характер и тип поверхности теплообмена.

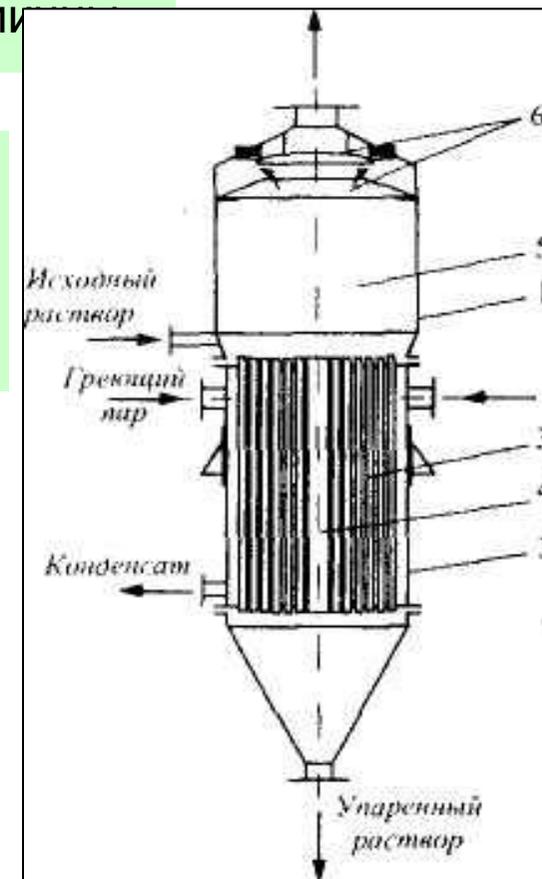
- прямоточные
- циркуляционные (за счет разности плотностей в отдельных точках аппаратов - естественная циркуляция, м.б. принудительная с помощью насосов)

Аппарат с соосной греющей камерой и естественной циркуляцией раствора

раствор поступает на выпаривание в нижнюю часть трубчатой теплообменной поверхности **2**

вскипает в трубках **3** за счет тепла конденсации греющего пара, поступающего в межтрубное пространство.

Образующийся в трубах вторичный пар отделяется в сепараторе **5**, брызгоуловителе **6** от образующихся капель и удаляется из верхней части аппарата.



- 1 - корпус;
- 2 - корпус греющей камеры;
- 3 - трубки греющей камеры;
- 4 -

Аппарат с вынесенной греющей камерой

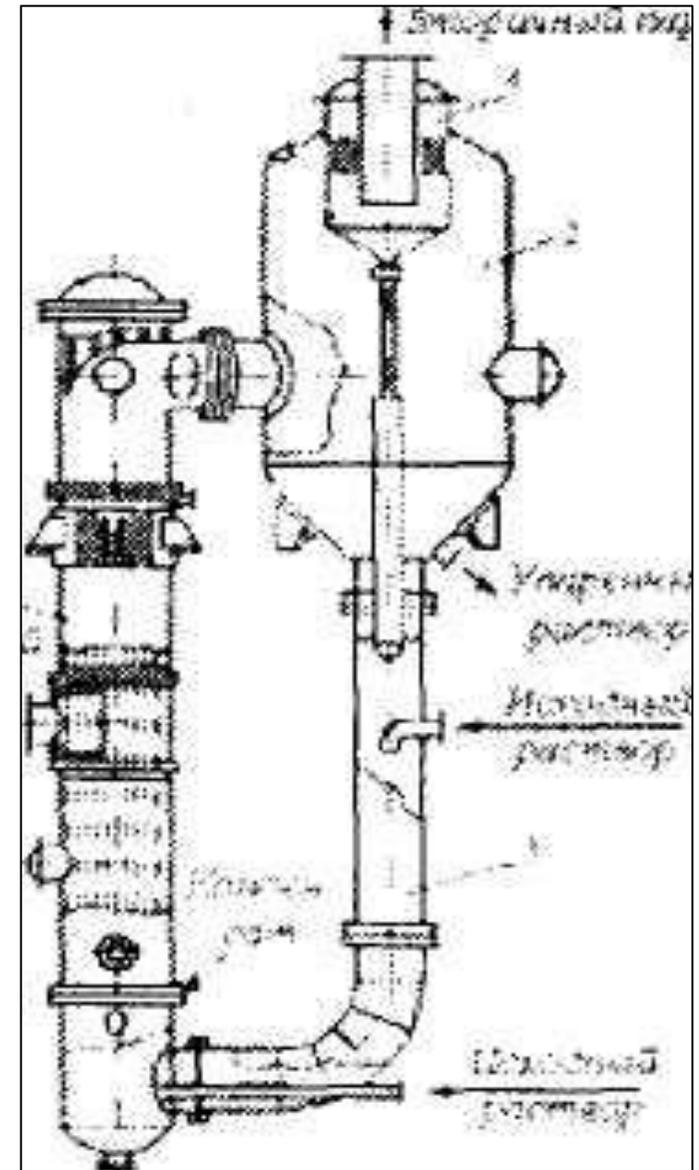
состоит из греющей камеры 1, выполненной из труб, сепаратора 2 с брызгоуловителем (брызгоотделителем) 4 и циркуляционной трубы 3, соединенной с нижней частью греющей камеры 1.

Греющий пар поступает в межтрубное пространство греющей камеры 1 и обогревает трубки, заполненные кипящей жидкостью, образуя парожидкостную смесь, разделяемую в сепараторе 2 на вторичный пар и жидкость, которая поступает в циркуляционную трубу 3.

За счет увеличения высоты трубок до 4-5 м создается значительная разность давлений парожидкостного столба в трубках 1 и столба жидкости - в циркуляционной трубе 3, что обеспечивает интенсивную естественную циркуляцию.

Для улучшения отделения пара и брызг жидкости парожидкостная смесь вводится из греющей камеры в сепаратор тангенциально, по касательной.

Капли как более тяжелые частицы, ударяясь о внутренние стенки сепаратора, собираются и стекают в его нижнюю часть, а вторичный пар поступает в брызгоуловитель 4, где

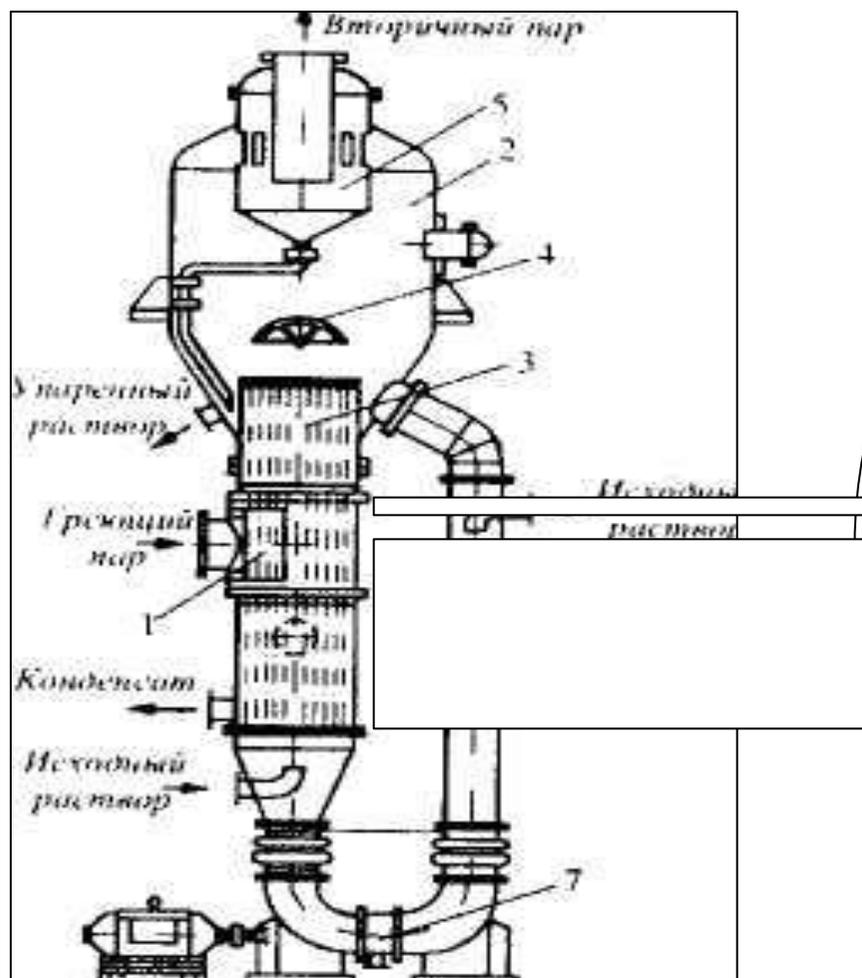


1 - греющая
камера;

2 - сепаратор;

3 -

циркуляционна
я труба;



Аппарат с принудительной циркуляцией и вынесенной зоной кипения

По сравнению с другими имеет некоторые особенности.

Скорость жидкости в трубах за счет работы осевого насоса поднимается до 2-2,4 м/с, что обеспечивает более интенсивную циркуляцию.

Помимо улучшения коэффициента теплопередачи за счет большей скорости омывания тепло- передающей поверхности также улучшаются условия теплопередачи.

Преимущество:

отдельное расположение греющей камеры теплопередающей поверхности значительно упрощает ее осмотр, чистку внутренней поверхности и замену за счет дополнительного

- 1 - греющая камера;
- 2 - сепаратор;
- 3 - труба вскипания;
- 4 - отбойник;

Побочные явления при выпаривании

- Инкрустация – в зависимости от типа выпарного аппарата процесс концентрирования может происходить неравномерно. У поверхности нагрева раствор становится пересыщенным и из него вещества выпадают в осадок на поверхности аппарата, образуя корку – накипь

- Материальные потери
- Разложение веществ
- Ухудшение теплопередачи

- Температурные потери

- Температурная депрессия (разность между температурой кипения раствора и кипения чистого растворителя) зависит от природы растворителя, растворенного вещества, концентрации раствора, давления – может достигать 5-8 °С С увеличением концентрации раствора повышается температура его кипения

- Завершение выпаривания до пресыщения раствора (20-30% остаточной влажности)
- Перемешивание
 - Механическое
 - Тепловое
 - ультразвук

Выпаривание до 30%

Снижение остаточного давления перед завершением выпаривания

- Гидростатическая депрессия (повышение температуры кипения жидкости за счет увеличения гидростатического давления столба жидкости (1-3 °С)
 - В нижних слоях раствора может происходить разложение БАВ
- Чем меньше слой тем меньше ГС депрессия, выпаривание предпочтительнее вести в плоских или широких емкостях
 - В пленочных аппаратах толщина раствора до 1 см
 - Используются для выпаривания растворов термолабильных БАВ
 - Греющий пар в межтрубном пространстве обогревает пучки тонких длинных трубок длиной до 10 м в трубках упариваемая жидкость имеет вид пленки

Аппараты с поднимающейся пленкой

Раствор подается в кипяtilьные трубки снизу в нижней части он закипает, образующийся пар движется вверх увлекая за собой раствор вверх по трубкам в виде тонкой пленки

Для предотвращения брызгоуноса устанавливают приспособления для отделения вторичного пара от брызг

Пар в конденсатор

Упаренный раствор через разгрузочный штуцер

«-» пленка может высыхать, чувствительность пленки к температурным колебаниям греющего пара, возможна термическая деформация труб, трудно очищать

Аппараты с опускающейся пленкой

Упариваемый раствор подается сверху на трубные решетки и стекает вниз по внутренним стенкам кипяtilьных трубок в виде тонкой пленки, с помощью специальных насадок расположенных сверху трубок создается зигзагообразное движение

Упариваемый раствор поступает в сепаратор а от туда в сборник

«+» Можно получить вязкие и густые растворы

- Гидравлическая депрессия уменьшения давления и понижение температуры на 1,5-2 °С за счет трения при движении по трубопроводу

Инженерные решения при конструировании аппаратов



- Пенообразование происходит при выпаривании концентрированных вытяжек из ЛРС содержащего, сапонины, полисахариды, слизи за изменяющегося поверхностного натяжения

- По мере удаления растворителя пенообразование усиливается, т.к. повышается концентрация ПАВ в растворе
- Образовавшаяся устойчивая пена может подняться до верха аппарата и попасть в конденсатор
 - потери БАС и продукта, загрязнение конденсата перебросом упариваемой жидкости



- Увеличение давления
 - пена сбивается
- Введение пеногасителей (веществ снижающих поверхностное натяжение)
 - В промышленности - толуол, н-бутанол
 - В фармации – силиконовые масла, гидрофилизированные сухие экстракты

- Брызгоунос



Заполнение выпарного аппарата на 1/6-1/10 объема
Создание расширения в верхней части – шлема – отражателя для брызг
Установление на пути пара механических препятствий, которые пропускают только пар,
Отбойники в шлеме, брызгоуловители, каплеотделители в паропроводе

Сушка в фармацевтическом производстве

- **Сушка** - процесс удаления из материала *растворителя*, в результате чего в нем увеличивается относительное содержание сухого вещества, (если растворитель - вода, то сушка – обезвоживание). один из самых распространенных массообменных процессов.

– Применение сушки:

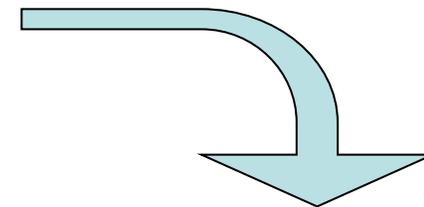
- подготовка сырья (ЛРС)
- получение полуфабрикатов (гранулят)
- конечный этап производства (субстанции а/б, с/а, органолепраты и т.п.).

– Цели:

- для облегчения и удешевления транспортировки материалов,
- для повышения их прочности;
- предотвращение гидролиза и повышение стабильности, консервирование, хранение;
- для последующего измельчения некоторых материалов.

– Объекты сушки:

- Сыпучие и легко разрыхляемые
- Пастообразные и комкующиеся
- Растворы и суспензии



Режимы и параметры сушки полупродуктов (гранулят, сгущенная вытяжка) определяют:

- Степень дисперсности продукта
- Образование кристаллогидратов и полиморфных форм ЛВ
- Гидролиз
- Окисление



Биофармацевтические особенности

- Сушка - сложный диффузионный процесс, скорость которого определяется скоростью диффузии влаги из глубины высушиваемого материала в окружающую среду. Удаление влаги при сушке сводится к перемещению тепла и вещества (влаги) внутри материала и их переносу с поверхности материала в окружающую среду.
- сушка - сочетание тепло- и массообмена (влагообмена).

Виды: естественная и искусственная

Виды по способу подвода тепла:

- 1. *Конвективная* — путем непосредственного соприкосновения высушиваемого материала с сушильным агентом, в качестве которого чаще используют нагретый воздух или топочные газы (как правило, в смеси с воздухом).
- 2. *Контактная* - путем передачи тепла от теплоносителя к материалу через разделяющую их стенку.
- 3. *Специальная*:
 - *радиационная* -путем передачи тепла инфракрасными лучами;
 - *диэлектрическая* -путем нагревания в поле токов высокой частоты;
 - *сублимационная* -сушка в замороженном состоянии при глубоком вакууме для высушивания термолабильных веществ - ферментов, гормонов, бактериальных препаратов, препаратов крови и др.

Высушиваемый материал при любом методе сушки находится в контакте с влажным газом (воздухом).

Равновесие при сушке

В процессе сушки парциальное давление пара над материалом уменьшается и приближается к *состоянию динамического равновесия*, которому соответствует предельная влажность материала, называемая *равновесной влажностью*.

Равновесная влажность зависит от парциального давления водяного пара над материалом или относительной влажности воздуха и определяется опытно.

Формы связи влаги с материалом (по П.А. Ребиндеру)

Механизм сушки также определяется формой связи влаги с материалом: чем прочнее эта связь, тем труднее протекает сушка.

Химически связанная влага ^a - не удаляется при сушке^b. Прочно связана с материалом в определенных (стехиометрических) соотношениях - удаляется при прокаливании или в результате

Статика сушки

При *конвективной сушке* нагретый воздух передает материалу тепло и уносит влагу, испаряющуюся из материала за счет этого тепла. Сушильный агент (воздух) - *тепло- и влагоноситель*.

При прочих методах сушки находящийся в контакте с материалом влажный воздух только удаляет испарившуюся влагу, т.е. является *влагоносителем*.

Влажный воздух - смесь сухого воздуха и водяного пара.

Основные параметры:

Абсолютная влажность - это количество водяного пара в кг, содержащегося в 1 м^3 влажного воздуха.

Относительная влажность или **степень насыщения воздуха** - это отношение массы водяного пара в 1 м^3 влажного воздуха при данных условиях (температура, объем, барометрическое давление) к максимально возможной массе водяного пара в 1 м^3 воздуха ρ (плотности насыщенного пара) при тех же условиях:

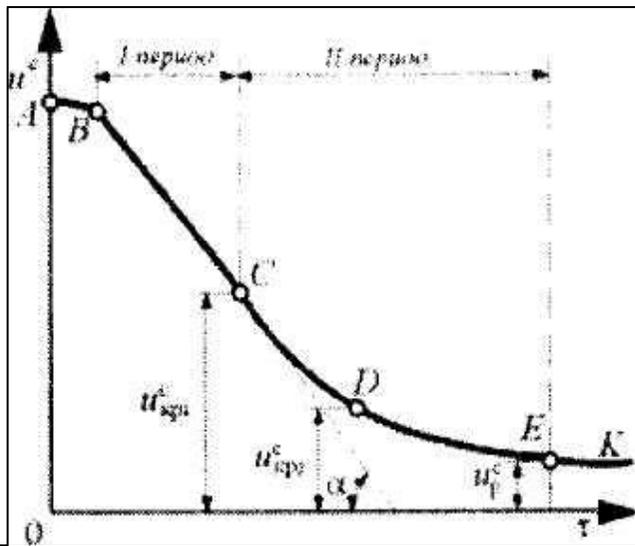
Относительная влажность определяется влажностью

Кинетика сушки

Изменение среднего влагосодержания и средней температуры во времени

- Период постоянной скорости (линейная зависимость)
 - Влага испаряется со всей поверхности влажного материала при постоянной температуре
 - Скорость сушки наибольшая и определяется скоростью внешней диффузии (определяется температурой, конвекцией, наличием вакуума)
 - На поверхности появляются сухие участки
- Период падающей скорости процесса (кривая зависимость)
 - Определяется внутренней диффузией (перенос влаги внутри материала к поверхности)
 - Уменьшается поверхность испарения, т.к. материал покрывается коркой
 - Стадия равномерно падающей скорости
 - температура материала повышается до температуры воздуха,
 - влажность снижается до равновесной по всей толщине,
 - скорость = 0
 - Стадия неравномерно падающей скорости
 - перегрев материала

Кривая сушки



AB - прогрев материала (влажность уменьшается мало)

I период *постоянной скорости сушки*

BC - влажность интенсивно уменьшается линейно

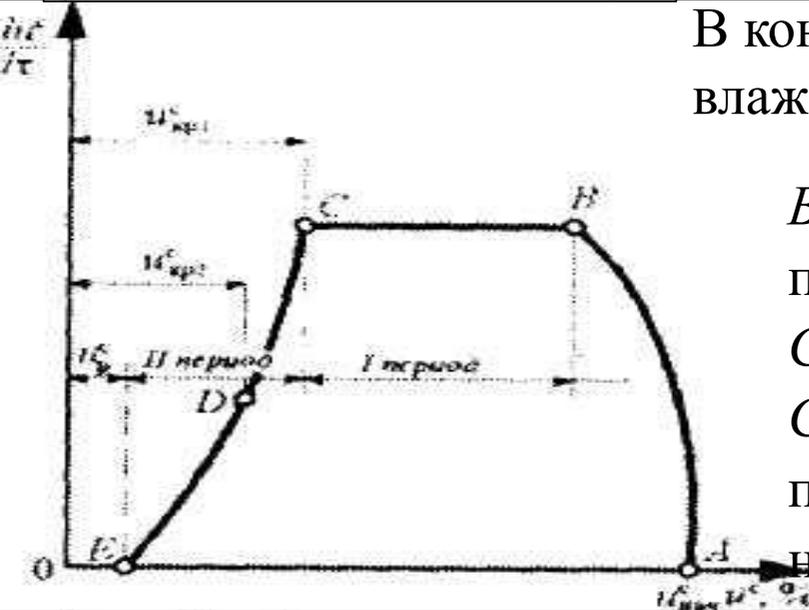
C *первая критическая влажность,*

CE II период *падающей скорости сушки* участки различной кривизны (CD и DE).

D (точка перегиба) - вторая критическая влажность

В конце II периода сушки влажность материала к равновесной влажности w ; и означает полное прекращение испарения влаги

Кривая скорости сушки



BC - период постоянной скорости (I период - интенсивное поверхностное испарение свободной влаги),

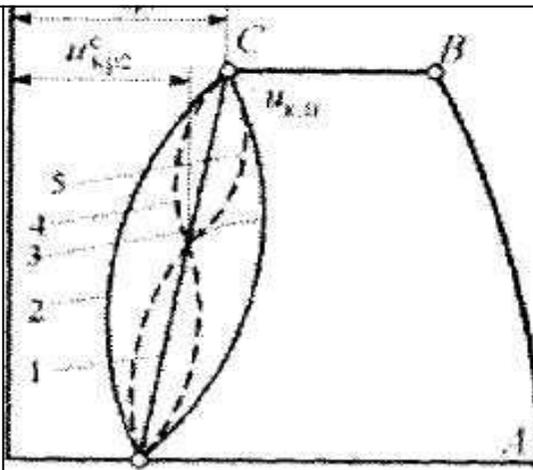
CE - период падающей скорости (II период).

C первая критическая влажность - влажность материала на поверхности становится равной гигроскопической, начинается испарение связанной влаги,

D вторая критическая влажность - достижение равновесной влажности на поверхности материала (внутри материала влажность равна равновесной)

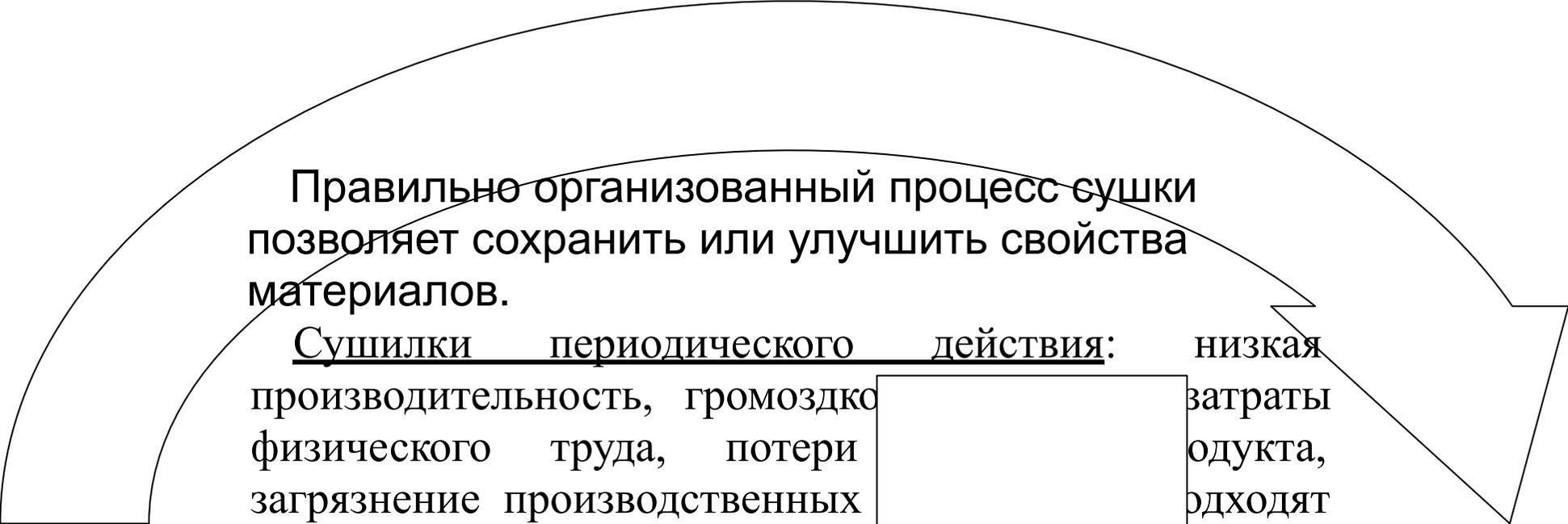
Виды кривых скорости сушки:

- 1 - грубопористые материалы (бумага, тонкий картон);
- 2 - ткань, тонкая кожа;
- 3 - пористые керамические материалы;
- 4 - глины;
- 5 - крахмал, гранулят, влажная таблеточная масса



Способы интенсификации сушки

- Перевод высушиваемого сыпучего материала из стационарного состояния в подвижное с помощью продувки сушильным агентом
- Увеличение поверхности контакта фаз (поверхности испарения)
 - Распыление (раствора, суспензии) в сушильном агенте
 - дробление материала (гранулята) с одновременным обновлением поверхности испарения
- Повышение температуры сушильного агента
 - При условии сушки в первом периоде с обновлением поверхности что исключает перегрев
- комбинирование способов подачи тепла
 - Радиационный + конвективный
 - Индукционный + конвективный



Правильно организованный процесс сушки позволяет сохранить или улучшить свойства материалов.

Сушилки периодического действия: низкая производительность, громоздкость, высокие затраты физического труда, потери продукта, загрязнение производственных помещений (подходят для небольших производств с широким ассортиментом)

Сушилки непрерывного действия – лишены этих недостатков (используются на крупномасштабных производствах).

По способу подвода тепла к высушиваемому материалу:

Конвективные - сушильный агент (предварительно нагретый в калорифере) движется в сушилке и соприкасается с высушиваемым материалом, возможен однократный нагрев сушильного агента или частичный подогрев воздуха в сушильной камере.

По конструкции и назначению - камерные, туннельные, ленточные, барабанные

Камерные сушилки - аппараты периодического действия, работающими при атмосферном давлении.

Назначение: для малотоннажных производств при невысокой температуре сушки (сушка таблеточной массы)

Материал сушится на лотках (противнях), установленных на стеллажах или вагонетках, находящихся внутри сушильной камеры 1.

На каркасе камеры, между вагонетками 2, установлены козырьки 3, которые делят пространство камеры на три, расположенные друг над другом зоны, вдоль которых последовательно движется горячий воздух.

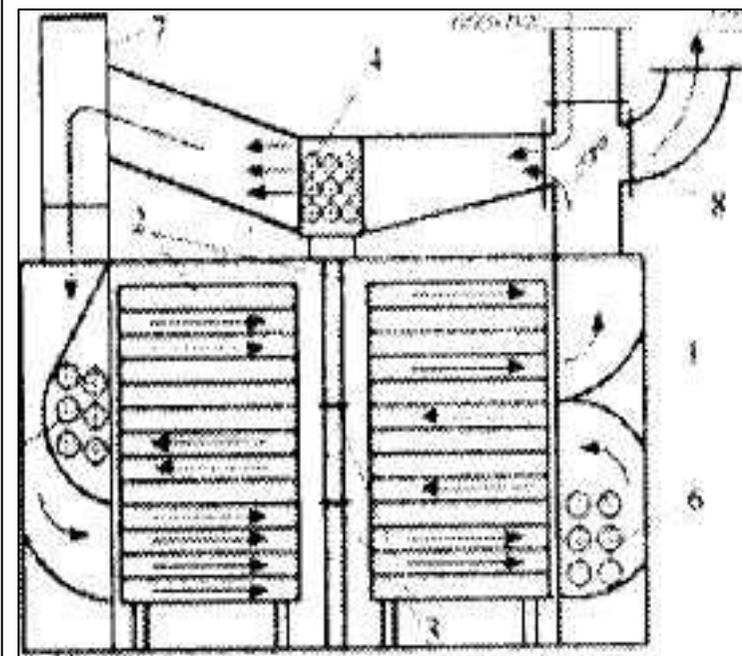
Свежий воздух, нагретый в калорифере 4, подается вентилятором 7 вниз камеры сушилки.

Здесь он движется два раза меняя направление и дважды нагреваясь в промежуточных калориферах 5 и 6.

Часть отработанного воздуха с помощью шиберов 8 направляется на смешивание со свежим, таким образом сушилка работает с частичной рециркуляцией воздуха и промежуточным подогревом, т.е. по варианту, обеспечивающему низкую температуру и более мягкие условия сушки.

сушка в неподвижном толстом слое

«-» низкая производительность и длительность процесса, при выгрузке материала большие потери тепла и большие затраты ручного труда.



Камерная
сушилка:

1 - сушильная
камера;

2 - вагонетки;

3 - козырьки;

4,5,6 -

калориферы;

7 -

Туннельные сушилки

соединенные друг с другом вагонетки 2 медленно перемещаются на рельсах вдоль камеры прямоугольного сечения (коридора).

На входе и выходе - герметичные двери для загрузки и выгрузки материала.

Вагонетка с высушенным материалом удаляется из камеры, а с противоположного конца в нее поступает новая вагонетка с влажным материалом.

Перемещение вагонеток механизировано.

Сушильный агент может подаваться прямотоком или противотоком, с частичной рециркуляцией.

Сушилки обычно используются для больших количеств штучного материала.

По интенсивности сушки и основным недостаткам туннельные сушилки близки к камерным сушилкам.

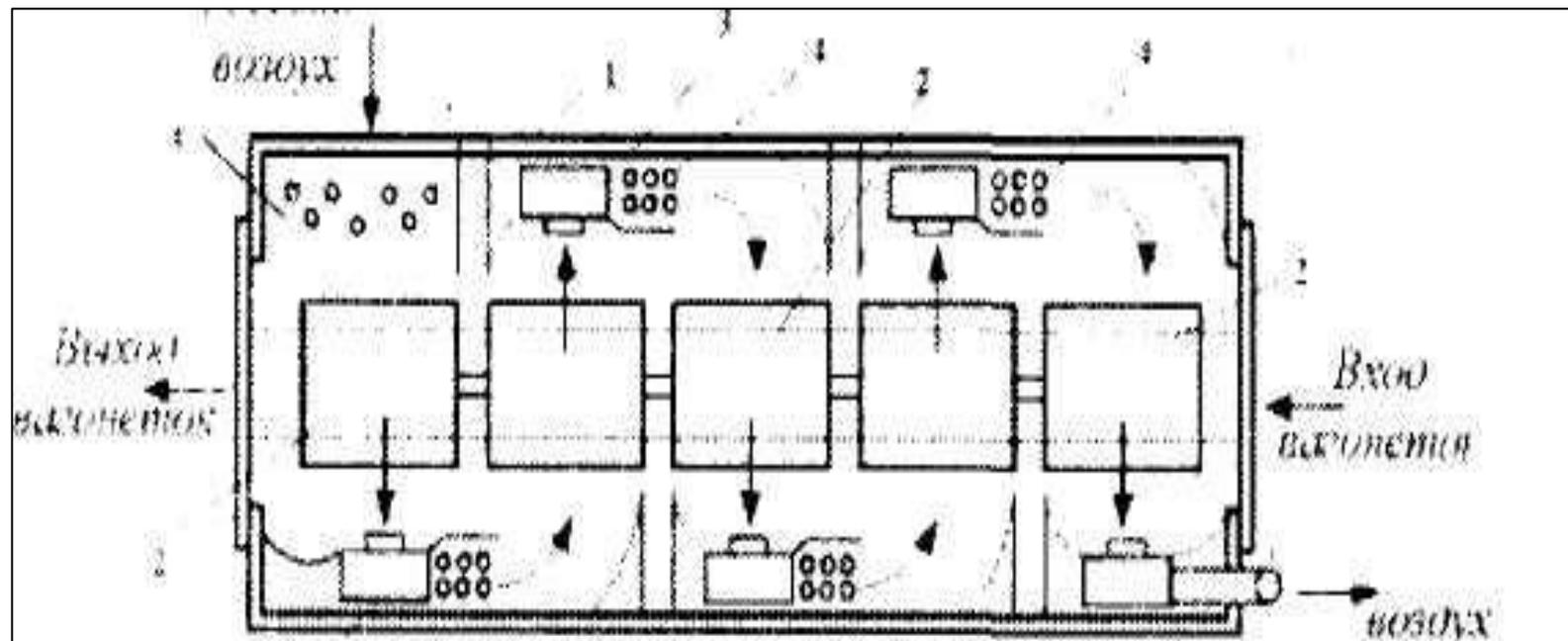
Туннельная сушилка:

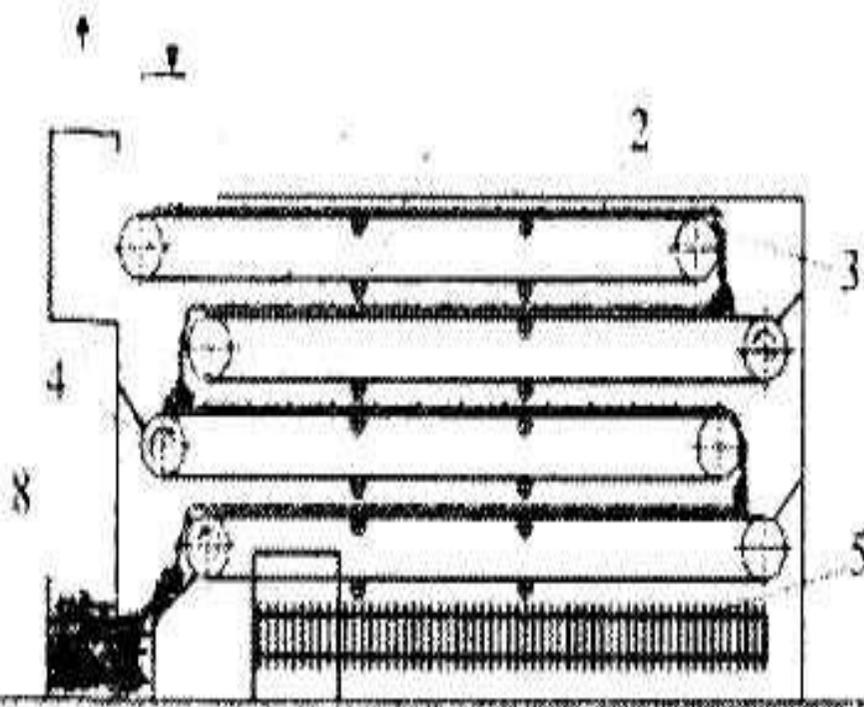
1 камера;

2 - вагонетка;

3 - вентиляторы;

4 - калориферы





Ленточная сушилка:

- 1 - камера сушилки;
- 2 - бесконечная лента;
- 3 - ведущие барабаны;
- 4 - ведомые барабаны;
- 5 - калорифер;
- 6 - питатель;
- 7 - опорные ролики;
- 8 - сборник

Ленточные сушилки

Непрерывного действия при атмосферном давлении.

В камере 1 сушилки слой высушиваемого материала движется на бесконечной ленте 2, натянутой между ведущими 3 и ведомыми 4 барабанами.

Влажный материал из бункера подается питателем 6 на один конец ленты, с другого конца материал пересыпается на нижерасположенную ленту и так до последней ленты, с которой высушенный материал пересыпается в приемник высушенного материала 8.

Сушка осуществляется горячим теплоносителем, который движется противотоком или перекрестным током к направлению движения материала.

Такая многоленточная сушилка успешно работает в производстве холосаса на стадии сушки шрота из семян шиповника.

Барабанные сушилки

Непрерывного действия при атмосферном давлении для зернистых и сыпучих материалов с влажностью 50-60 % .

Цилиндрический барабан 1 (под углом), опирается с помощью бандажей 2 на опорные ролики 3. Барабан вращается от электродвигателя через зубчатую передачу 4 и редуктор. Число оборотов 5-8 в мин. Положение барабана в осевом направлении фиксируется упорными роликами 5. Материал подается из бункера в питатель 6 (подсушивается и перемешивается приемно-винтовой насадкой 7), поступает на внутреннюю насадку, расположенную вдоль почти всей длины барабана.

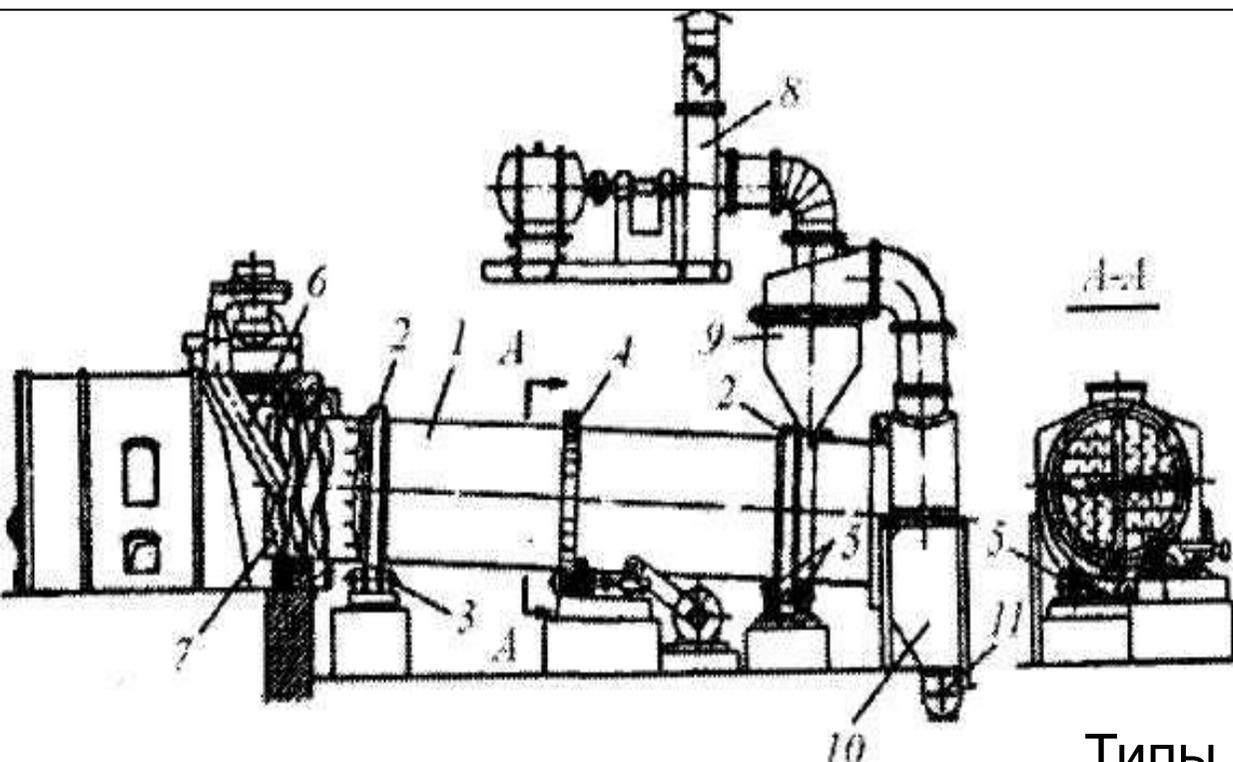
Насадка обеспечивает распределение материала по сечению барабана, и контакт с сушильным агентом (топочный газ, горячий воздух) при перемешивании.

Сушильный агент и материал идут прямококом, во избежание перегрева материала (наиболее горячий сушильный агент соприкасается с наиболее влажным материалом). Сушильный агент просасывается через барабан вентилятором 8 (скорость 2-3 м/с) для минимизации уноса частичек материала.

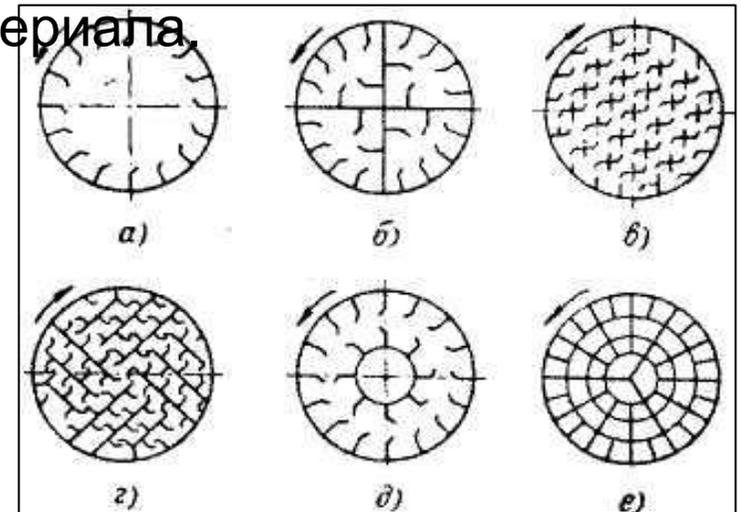
Перед выбросом в атмосферу отработанные газы очищаются от пыли в циклоне 9.

На концах барабана уплотнительные устройства (например, лабиринтные), затрудняют утечку сушильного агента. У разгрузочного конца барабана подпорное устройство для поддержания степени заполнения материалом не более 20 %.

Время пребывания материала в сушилке регулируется скоростью вращения



Устройство внутренней насадки барабана зависит от размеров и свойств высушиваемого материала.



Типы насадок барабанных сушилок:

Барабанная сушилка:

- 1 - барабан;
- 2 - бандаж;
- 3 - опорные ролики;
- 4 - передача;
- 5 - опорно-упорные ролики;
- 6 - питатель;
- 7 - лопасти;
- 8 - вентилятор;
- 9 - циклон;
- 10 - разгрузочная камера;
- 11 - разгрузочное устройство

а - подъемно-лопастная для крупнокусковых и склонных к налипанию;

б - секторная для крупнокусковых, малосыпучих с большой плотностью;

в, г - распределительные (с отдельными ячейками) для мелкокусковых с хорошей сыпучестью;

д - комбинированная для пастообразных (в передней части барабана подъемно-лопастная, в остальной распределительная или перевалочная);

е - перевалочная насадка с закрытыми ячейками для маленьких пылящих частиц

Аэрофонтанные сушилки - сушилки с вихревым потоком, в котором происходит закрученная циркуляция самого высушиваемого материала

Для сушки зернистых неслипающихся, влажных и достаточно крупных материалов во взвешенном состоянии.

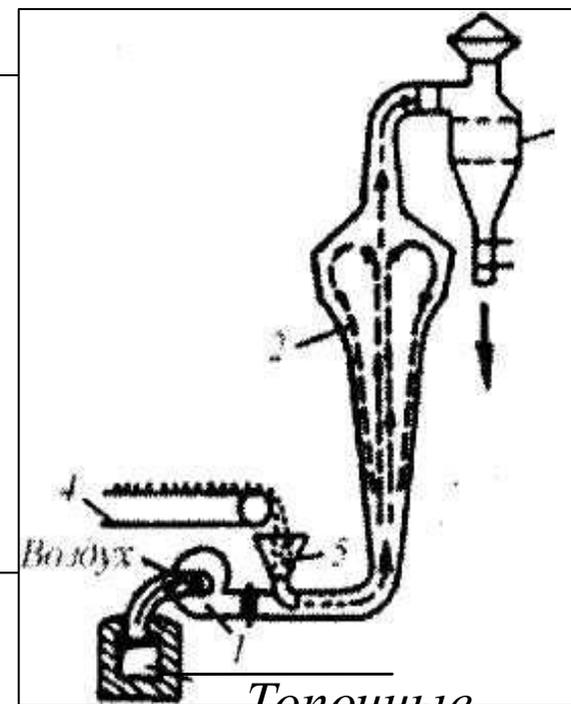
В загрузочную воронку 5 подается влажный материал, который захватывается сушильным агентом (воздух или смесь воздуха с топочными газами), и поступает в сушильную камеру 2.

В расширяющемся конусе скорость газа внизу камеры превышает скорость осаждения самых крупных частиц, а вверху - меньше скорости осаждения самых мелких частиц - достигается более организованная циркуляция твердых частиц, которые поднимаются в центре и опускаются у периферии аппарата.

За счет снижения скорости газов по мере их подъема улучшается распределение частиц по крупности и уменьшается унос пыли, что повышает равномерность нагрева (более мелкие частицы, поднимающиеся выше, находятся в области более низких температур) и позволяет уменьшить высоту камеры.

В сушильной камере материал находится во взвешенном состоянии и интенсивно перемешивается.

Высушенный материал отделяется от газа в циклоне 3.



Топочные газы



Аэрофонтанная сушилка:

- 1 - вентилятор;
- 2 - сушильная камера;
- 3 - циклон;
- 4 - транспортер

Сушилки с кипящим (псевдооживленным) слоем

Высушиваемый материал уложен на решетку 4, через которую продувается сушильный агент со скоростью, необходимой для создания кипящего слоя.

для обеспечения равномерности сушки материал движется вдоль удерживающей его решетки. (сырой материал подается в верхнюю часть с одной стороны сушилки, а сухой материал удаляется - из нижней с противоположной стороны)

Наиболее распространены *однокамерные* сушилки непрерывного действия.

многокамерные сушилки - состоят из двух или более камер, через которые последовательно движется высушиваемый материал.

Для термостабильных материалов, применяются *двух- и трехсекционные* ступенчато-противоточные сушилки с кипящим слоем.

«+»

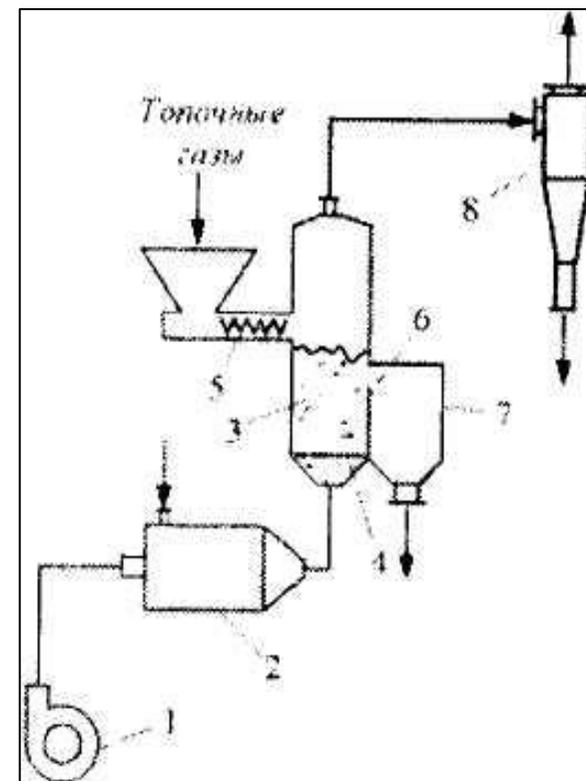
интенсивность сушки;

возможность высушивания при высоких температурах,
высокая степень использования тепла сушильного агента,
автоматическое регулирование параметров процесса.

«-»

расход электроэнергии для создания значительных давлений (300-500 мм вод.ст.), необходимых для кипения слоя

измельчение частиц материала в сушилке



Сушилка с
кипящим
(псевдоожив-
ленным)
слоем:

- 1 - вентилятор;
- 2 - камера смешения;
- 3 - сушильная камера;

Распылительные сушилки

высокая интенсивность испарения влаги за счет тонкого распыления высушиваемого материала в сушильной камере, через которую движется сушильный агент – скорость сушки примерно 15-30 с.

В условиях почти мгновенной сушки температура поверхности частиц материала, несмотря на высокую

температуру (около 150 °С), лишь незначительно повышается по сравнению с температурой жидкости. В результате достигается

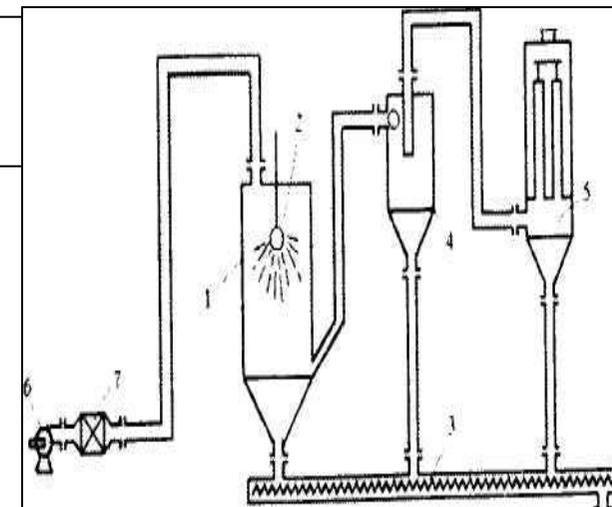
быстрая сушка в мягких температурных условиях, позволяющая получить

качественный порошок без слеживания.

Для сушки зернистых (неспаивающихся) и кристаллических материалов, хорошо растворимых и не требующих дальнейшего измельчения.

Сушка осуществляется во взвешенном состоянии в вертикальной трубе длиной до 20 м. Частицы движутся в потоке теплоносителя, когда распыливаемый материал предварительно нагрет.

Распыление с помощью механических и пневматических устройств. Распыление с помощью механических и пневматических устройств. Распыление с помощью механических и пневматических устройств.



Распылительная сушилка:

- 1 - камера сушилки;
- 2 - форсунка;
- 3 - шнек для выгрузки высушенного материала;
- 4 - циклон;
- 5 - рукавной фильтр;
- 6 - вентилятор;
- 7 - калорифер.

Применение: сушка очищенных вытяжек из ЛРС (в производстве ликвиритона, фламина и др.).

«-»

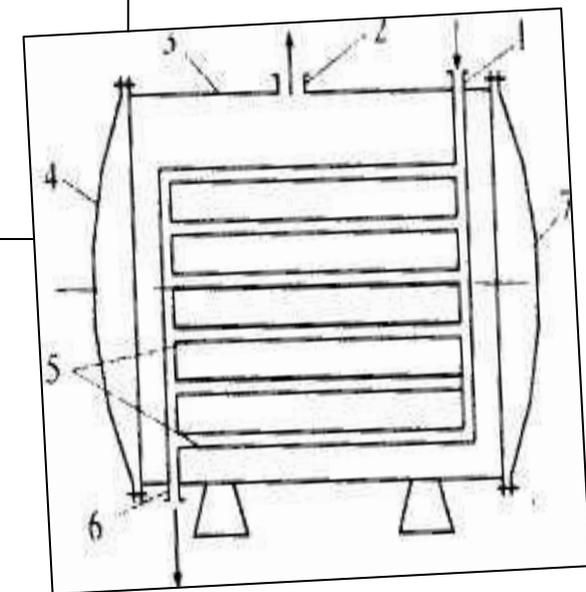
высокая стоимость распылителей, сложная их эксплуатация, большой диаметр распылительной камеры (из-за широкого факела распыла) и соответственно большой

вакуум-сушильный шкаф - простейшая контактная сушилка периодического действия являются, используются на малотоннажных производствах с широким ассортиментом сырья.

В цилиндре 3 размещены стеллажи 4, обогреваемые паром или горячей водой. Высушиваемый материал в виде сгущенной сметанообразной массы намазывается на стеллажи (толщина 5-4 см), которые устанавливаются на плиты.

Камеру герметически закрывают с помощью дверей 4, 7 и соединяют патрубком 2 с вакуумной линией.

Сушка происходит под вакуумом при температуре 50 °С, (зависит от глубины вакуума). При этом образуется слой пористого легкого материала, хорошо растворяющегося



Вакуум-сушильный шкаф:

- 1 - труба для введения пара;
- 2 - патрубок для создания вакуума;
- 3 - корпус шкафа;

Гребковые вакуум-сушилки

цилиндрический корпус 1, окружен паровой рубашкой 2, внутри медленно вращающейся горизонтальной мешалкой 3 с гребками 5.

Гребки закреплены взаимно перпендикулярно: на одной половине длины барабана они изогнуты в одну сторону, на другой - в противоположную.

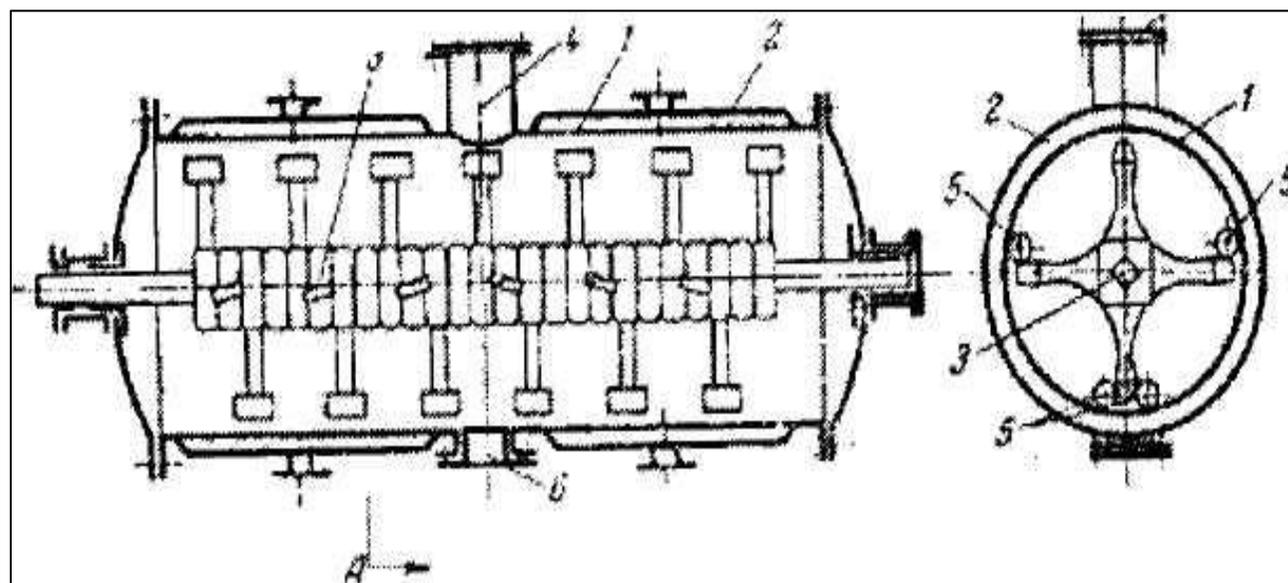
Мешалка имеет реверсивный привод, автоматически меняющий каждые 5-8 мин направление вращения. При работе мешалки материал, загруженный через люк 4, периодически перемещается от периферии к середине и в обратном направлении.

Вал мешалки может быть полым для нагрева высушиваемого материала. Свободно перекатывающиеся трубы 6 способствуют разрушению комков и дополнительно перемешивают материал.

Разгрузка через люк 7. Корпус сушилки соединен с поверхностным или барометрическим конденсатором и вакуум-насосом. Производительность зависит от температуры греющего пара, величины разрежения и начальной влажности материала.

«+» сушка идет быстрее

«-» сложность и выше эксплуатационные расходы.



- 1 - корпус сушилки;
- 2 - паровая рубашка;
- 3 - мешалка;
- 4 - загрузочный люк;
- 5 - гребки;
- 6 - трубы;
- 7 - люк разгрузочный

Вальцовые сушилки осуществляют непрерывную сушку жидкостей и текучих пастообразных материалов при разрежении или атмосферном давлении.

Основная часть *двухвальцовых* сушилок - вальцы 2 и 3, медленно вращающиеся (2 об/мин) в кожухе 1 навстречу друг другу.

Сверху между вальцами непрерывно подается высушиваемый материал.

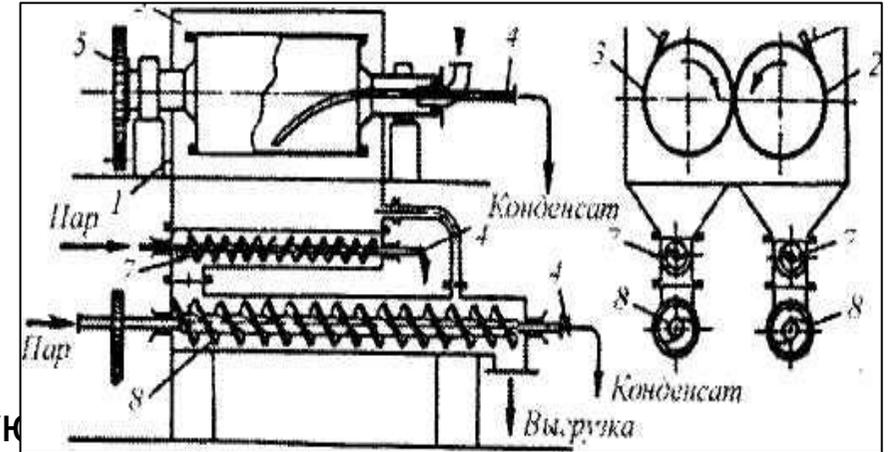
Греющий пар поступает через полость внутрь каждого из вальцов, паровой конденсат отводится через сифонную трубку 4.

Материал покрывает вращающуюся поверхность вальцов тонкой пленкой, толщина которой регулируется величиной зазора между вальцами. (0,5-1,0 мм)

Высушивание происходит интенсивно в тонком слое в течение одного неполного оборота вальцов.

Пленка подсушенного материала снимается ножами 6, расположенными вдоль образующей каждого вальца.

Чем тоньше слой, тем быстрее и равномернее он сушится, но из-за малой продолжительности сушки часто требуется досушивание после вальцов последовательно в верхнем досушивателе 7, и в нижнем 8



Двухвальцовая сушилка:

- 1 - кожух;
- 2 - ведомый полый валец на подвижных подшипниках;
- 3 - ведущий полый валец, неподвижный;
- 4 - сифонные трубки для отвода конденсата;
- 5 - привод;
- 6 - ножи, расположенные вдоль образующей вальцов;
- 7- верхние досушиватели;
- 8 - нижние досушиватели

Терморadiационные сушилки.

Сушка осуществляется за счет тепла инфракрасных лучей, в основном для высушивания тонколистовых материалов или лакокрасочных покрытий

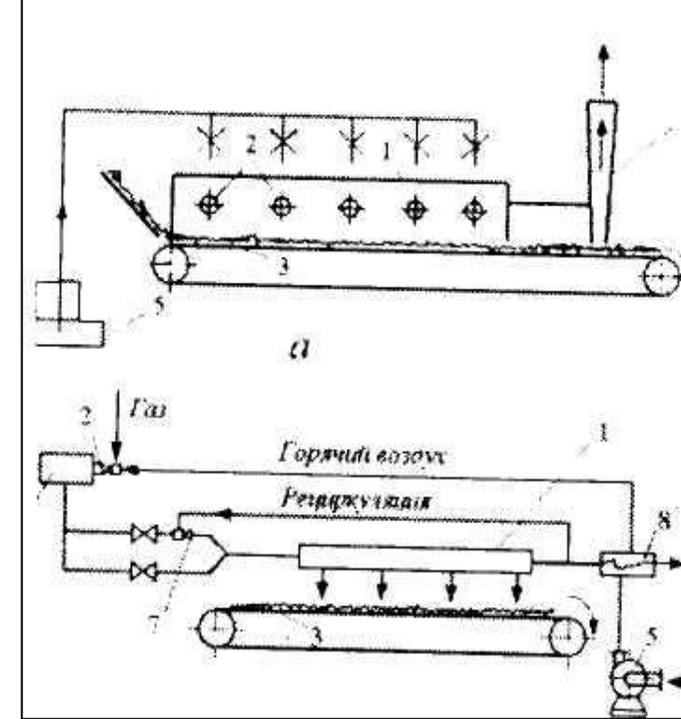
«+» высокая скорость испарения влаги из материала.

Терморadiационные сушилки с газовым обогревом:

а - открытым пламенем; б - продуктами сгорания газов.

1 - излучающая панель; 2 - газовая горелка; 3 - транспортер, с высушиваемым материалом;

4 - выхлопная труба; 5 - вентилятор; 6 - камера сгорания; 7 - эжектор; 8 - воздухоподогреватель



По способу подвода тепла:

с электрическим нагревом – излучатели зеркальные лампы, элементы сопротивления (панельные или трубчатые), керамические нагреватели — электрические спирали, запрессованные в керамике (более сложны и инерционны, чем ламповые, используемые в первый период применения терморadiационной сушилки, однако они обеспечивают большую равномерность сушки).

с газовым обогревом (проще и экономичнее) - излучатели металлические или керамические плиты, обогреваемые открытым пламенем или продуктами сгорания газов.

в первом случае (рис а) обогрев излучающей панели 1 открытым пламенем газовых горелок 2 производится со стороны, обращенной к материалу, который перемещается на транспортере 3.

во втором случае (лучше условия труда и больший КПД) - при нагреве продуктами сгорания газов, движущимися внутри излучателя 1 (рис.б). Газ и горячий воздух поступают в горелку 2. Продукты сгорания из камеры 6 направляются на обогрев излучающей поверхности. По пути они подсасывают с

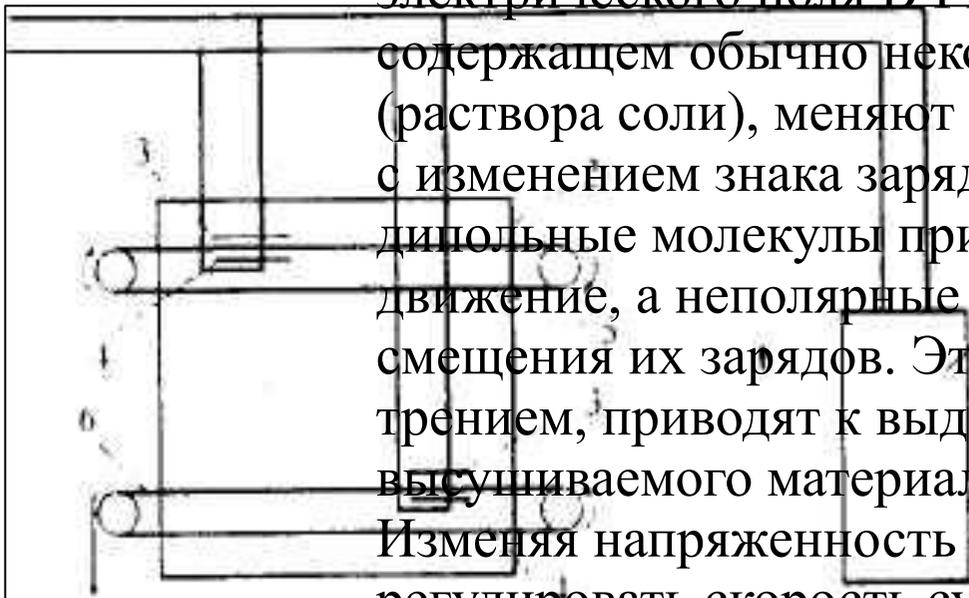
Высокочастотные (диэлектрические) сушилки.

эффективно для высушивания толстослойных материалов, когда необходимо регулировать температуру и влажность на поверхности и в глубине материала. (пластмассы, смолы, древесина)

ВЧ сушилка состоит из лампового ВЧ 1 и сушильной камеры 2. Из сети переменный ток поступает в выпрямитель 7, затем - в генератор 1, где преобразуется в переменный ВЧ ток. Этот ток подводится к пластинам конденсаторов 3 и 4, между которыми движется на ленте высушиваемый материал. В сушилке материал высушивается сначала на ленте 5, а затем на ленте 6 досушивается. Под действием

электрического поля ВЧ ионы и электроны в материале, содержащем обычно некоторое количество электролита (раствора соли), меняют направление движения синхронно с изменением знака заряда пластин конденсатора: дипольные молекулы приобретают вращательное движение, а неполярные молекулы поляризуются за счет смещения их зарядов. Эти процессы, сопровождаемые трением, приводят к выделению тепла и нагреванию высушиваемого материала.

Изменяя напряженность электрического поля, можно регулировать скорость сушки, или избирательно нагревать лишь одну из составных частей неоднородного материала



Вода может быть: твердой, жидкой и газообразной.

Фазы могут существовать самостоятельно и совместно, точка одновременного существования трех фаз называется *тройной точкой*. Для воды она при температуре $0,0098^{\circ}\text{C}$ и парциальным давлением пара $4,58$ мм рт.ст.

Сублимация происходит при состоянии веществ ниже этой точки (см. диаграмму).

Если нагревать вещество (линия *FD*) в твердом состоянии при постоянном давлении ниже давления тройной точки, то при достижении точки *D* произойдет испарение твердого тела, называемое *возгонкой*, или *сублимацией*.

При обратном процессе (*ED*) при достижении точки *D* будет происходить кристаллизация пара без перехода в жидкое состояние.

Ниже тройной точки вода будет находиться в твердом или парообразном состоянии.

При низких давлениях создаются условия, при которых сопротивление окружающей среды настолько незначительно, что кристаллическая решетка льда распадается и переходит в пар без образования жидкой фазы.

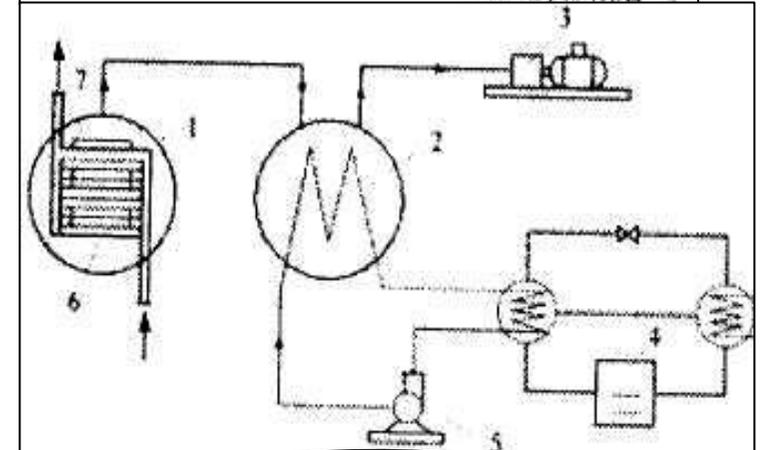
На линии лед-пар соотношение между давлениями и температурой такое, что твердая и газообразная фазы находятся в равновесии.

с увеличением разрежения снижается температура фазового перехода; при подводе тепла в условиях глубокого вакуума можно создать большие разности температур между материалом и источником тепла по сравнению с обычной вакуумной сушкой

материалов в замороженном состоянии. При этой сушке находящаяся в материале влага переходит в пар, минуя жидкое состояние, т.е. *сублимирует*.

Она же – *лиофильная* – получаемые продукты очень гигроскопичны и легко растворимы.

Изменение состояния влаги в диаграмме *p-t*

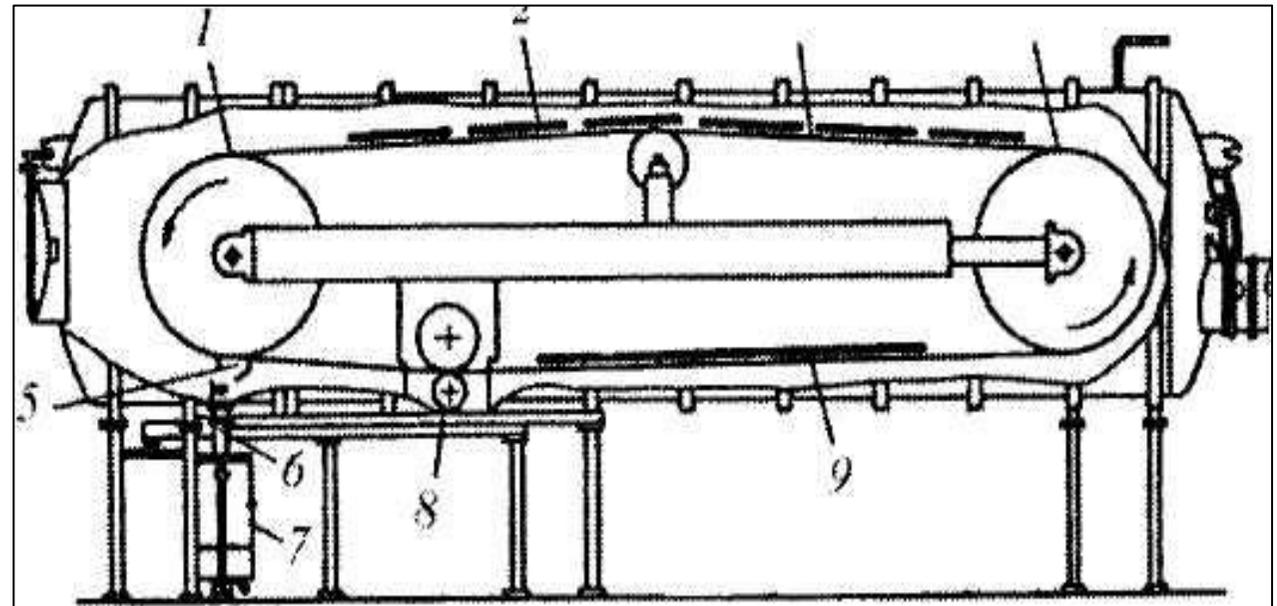


- 1 - камера сушки (сублиматор);
- 2 - конденсатор-вымораживатель;
- 3 - вакуум-насос;
- 4 - холодильная установка;

Применение: в лабораторных и промышленных масштабах в медицине и биологии для консервирования препаратов крови и кровезаменителей, биологических растворов, сывороток, микробных культур, в производстве антибиотиков, гормональных препаратов, а также в химико-фармацевтическом и пищевом производствах при выработке продуктов, превосходящих по качеству законсервированные другими способами.

На практике получили применение терморadiационные сублимационные сушилки с непрерывной загрузкой и периодической выгрузкой материала.

Сублимационная установка с непрерывной загрузкой и периодической выгрузкой материала:



- 1 - контактное охлаждение зоны;
- 2, 9 - излучатели;
- 3 - лента с высушиваемым материалом;
- 4 - контактный подогрев ленты;
- 5 - скребки;
- 6 - шлюз;