

Выпаривание и выпарные установки

План (2 часа)

1. **Выпаривание**
2. **Устройство выпарных аппаратов**
3. **Расчет выпарных аппаратов**
4. **Материальный баланс выпарного аппарата**
5. **Тепловой баланс выпарного аппарата**

1 Выпаривание

- Выпаривание представляет собой термический процесс кипения раствора с выделением паров растворителей в практически чистом виде.
- При этом растворимое нелетучее вещество (соль или вязкая жидкость) остается в концентрированном виде в аппарате.
- Большой частью из раствора удаляют лишь часть растворителя, так как в выпарных аппаратах обычных конструкций упаренный раствор должен оставаться в текучем состоянии.
- Получаемые при выпаривании пары удаляются в атмосферу или в конденсирующее устройство.

Выпаривание

- Выпаривание широко применяется для повышения концентрации разбавленных растворов или выделения из них растворенного вещества путем кристаллизации.
- В промышленности в большинстве случаев выпариваются водные растворы различных веществ; поэтому в дальнейшем рассматривается только выпаривание водных растворов.
- Выпарные аппараты и методы их расчета применимы для выпаривания растворов с любыми растворителями, а также для испарения чистых жидкостей.

Выпаривание

- Для обогрева выпарных аппаратов применяют нагревающие агенты.
- Наибольшее распространение имеет водяной пар.
- Если необходимо проводить выпаривание при высокой температуре, применяют топочные газы и высокотемпературные нагревающие агенты.
- Нагревание выпариваемого раствора производится путем передачи тепла от нагревающего агента через стенку, разделяющую оба вещества, либо путем непосредственного соприкосновения веществ

Выпаривание

- Выпаривание ведут как под атмосферным, так и под пониженным или повышенным давлением.
- При выпаривании раствора под атмосферным давлением образующийся так называемый вторичный (соковый) пар выпускается в атмосферу.
- Вакуум-выпарка позволяет снизить температуру кипения раствора и применяется для выпаривания чувствительных к высокой температуре растворов (например, растворов органических веществ).

Выпаривание

- Использование вакуума позволяет также увеличить разность температур между нагревающим агентом и кипящим раствором, а следовательно, уменьшить поверхность теплообмена.
- Вследствие пониженной температуры кипения растворов потери тепла в окружающую среду, а следовательно и расход греющего пара будут меньше, чем при нормальном давлении
- Недостатком выпаривания в вакууме является удорожание установки.

Выпаривание

- При выпаривании под повышенным давлением вторичный пар может быть использован как нагревающий агент в подогревателях, для отопления и т.п.
- Выпаривание под давлением связано с повышением температуры кипения раствора, поэтому применение данного способа ограничено свойствами раствора и температурой нагревающего агента.
- Установки, состоящие из одиночного аппарата, вторичный пар из которого не используется, называются однокорпусными выпарными установками.

Выпаривание

- Многокорпусные выпарные установки включают несколько соединенных друг с другом аппаратов (корпусов), работающих под давлением, понижающимся по направлению от первого корпуса к последнему.
- Принцип многократного выпаривания – пар, выделившейся при кипении жидкости в одном аппарате, используется для нагрева и выпаривания раствора в другом аппарате, в котором вследствие понижения давления раствор кипит при более низких температурах.
- В многокорпусных выпарных установках осуществляется многократное использование одного и того же тепла.
- Расход пара уменьшается пропорционально увеличению числа совместно работающих аппаратов.

2 Устройство выпарных аппаратов

- По принципу работы выпарные установки разделяются на действующие периодически и непрерывно.
- В периодически действующих установках жидкость подается в аппарат, выпаривается до необходимой более высокой концентрации, затем упаренный раствор удаляется из аппарата.
- В аппаратах непрерывного действия неконцентрированный раствор непрерывно подается в аппарат, а упаренный раствор непрерывно отводится из него.
- Аппараты непрерывного действия более экономичны в тепловом отношении, т.к. в них отсутствуют потери, связанные с расходом тепла на разогрев аппарата.

Устройство выпарных аппаратов

- Отличительные признаки выпарных аппаратов:
- вид поверхности теплообмена:
 - паровые рубашки, змеевики и трубы.
- расположение
 - горизонтальные, вертикальные, наклонные.
- Наибольшее распространение получили выпарные аппараты с паровым обогревом, имеющие поверхность теплообмена, выполненную из труб.
- Выпарные аппараты с паровым обогревом состоят из двух основных частей:
 - кипятыльник (греющая камера), в котором расположена поверхность теплообмена и происходит выпаривание раствора;
 - сепаратор — пространство, в котором вторичный пар отделяется от раствора.

Устройство выпарных аппаратов

- Необходимость в паровом пространстве (сепараторе) составляет основное конструктивное отличие выпарных аппаратов от теплообменников.
- В зависимости от характера движения кипящей жидкости в выпарном аппарате различают:
 - 1) выпарные аппараты с естественной циркуляцией;
 - 2) выпарные аппараты с принудительной циркуляцией;
 - 3) пленочные выпарные аппараты;
 - 4) роторно-пленочные выпарные аппараты.

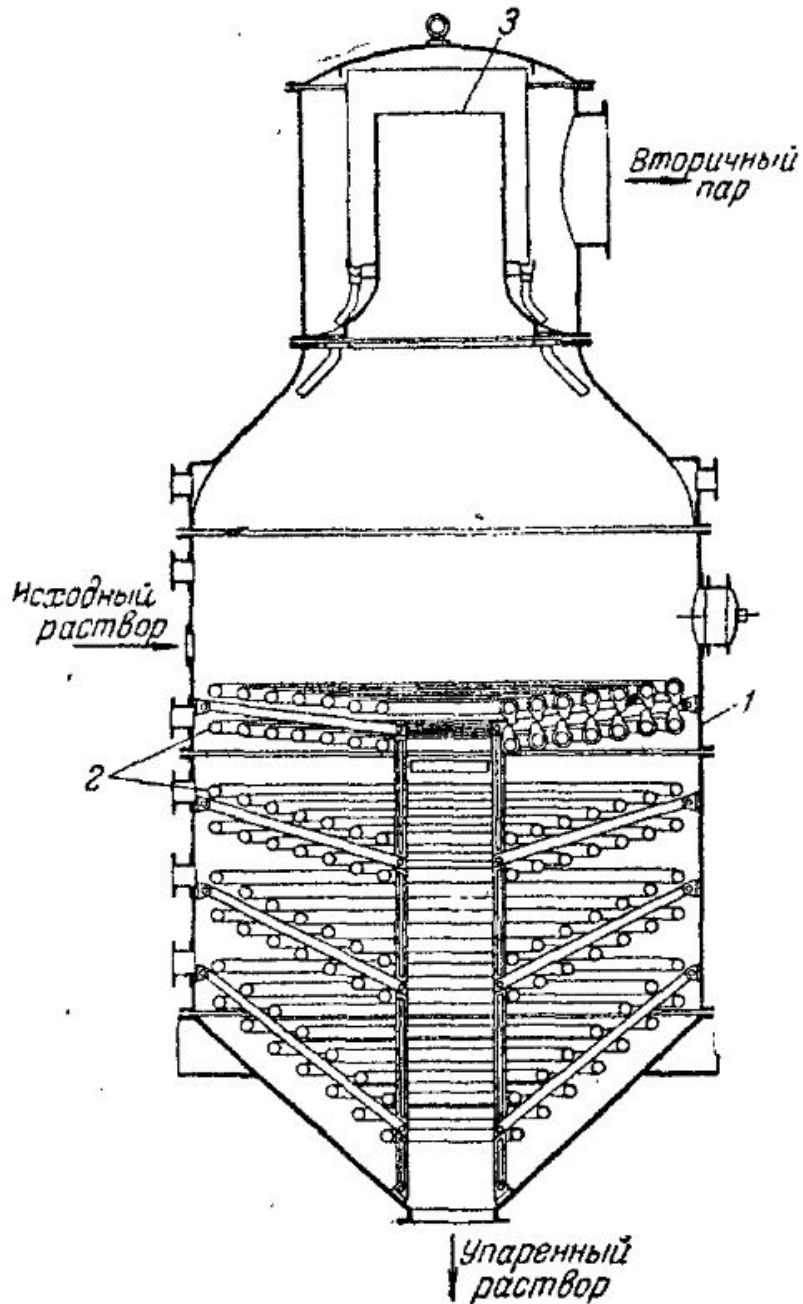
Устройство выпарных аппаратов

- Змеевиковые выпарные аппараты аналогичны змеевиковым погружным теплообменникам.
- Греющий пар проходит по змеевику, а выпариваемая жидкость находится снаружи.
- Змеевики полностью погружены в жидкость, над уровнем которой остается объем, необходимый для сепарации вторичного пара.
- Эти аппараты работают неинтенсивно и в настоящее время применяются лишь для выпаривания вязких растворов.
- Они могут быть использованы также при применении греющего пара высокого давления и при выпаривании агрессивных жидкостей.

Устройство выпарных аппаратов

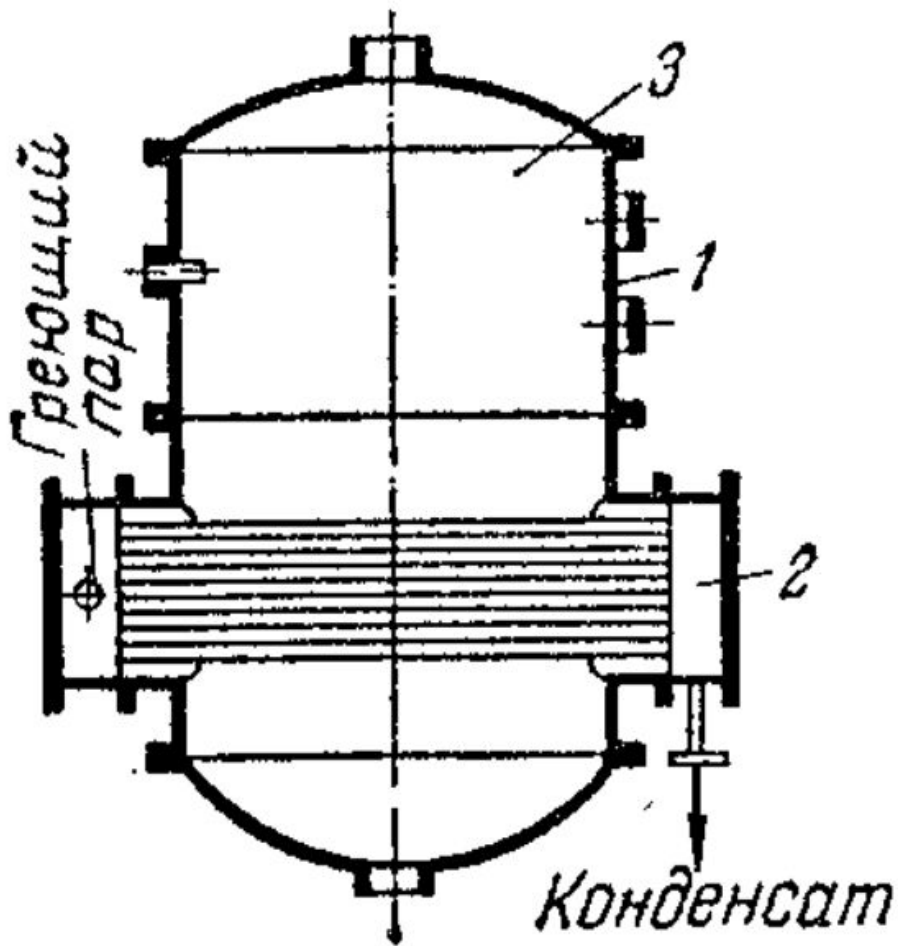
- В выпарных аппаратах с горизонтальными трубами пар пропускается по трубам, жидкость — снаружи труб. Они могут быть изготовлены с значительными поверхностями нагрева.
- Основным недостатком аппаратов этого типа является трудность очистки межтрубного пространства, вследствие чего они непригодны для выпаривания кристаллизующихся растворов.
- Кроме того, такие аппараты имеют невысокий коэффициент теплопередачи, громоздки и требуют значительного количества металла для изготовления.

Змеевиковый выпарной аппарат



- 1 - корпус
- 2 - паровые змеевики
- 3 - брызгоуловитель

Выпарной аппарат с горизонтальной трубчатой нагревательной камерой



- 1 - корпус;
- 2 - нагревательная камера;
- 3 - сепаратор

Выпарные аппараты с естественной циркуляцией

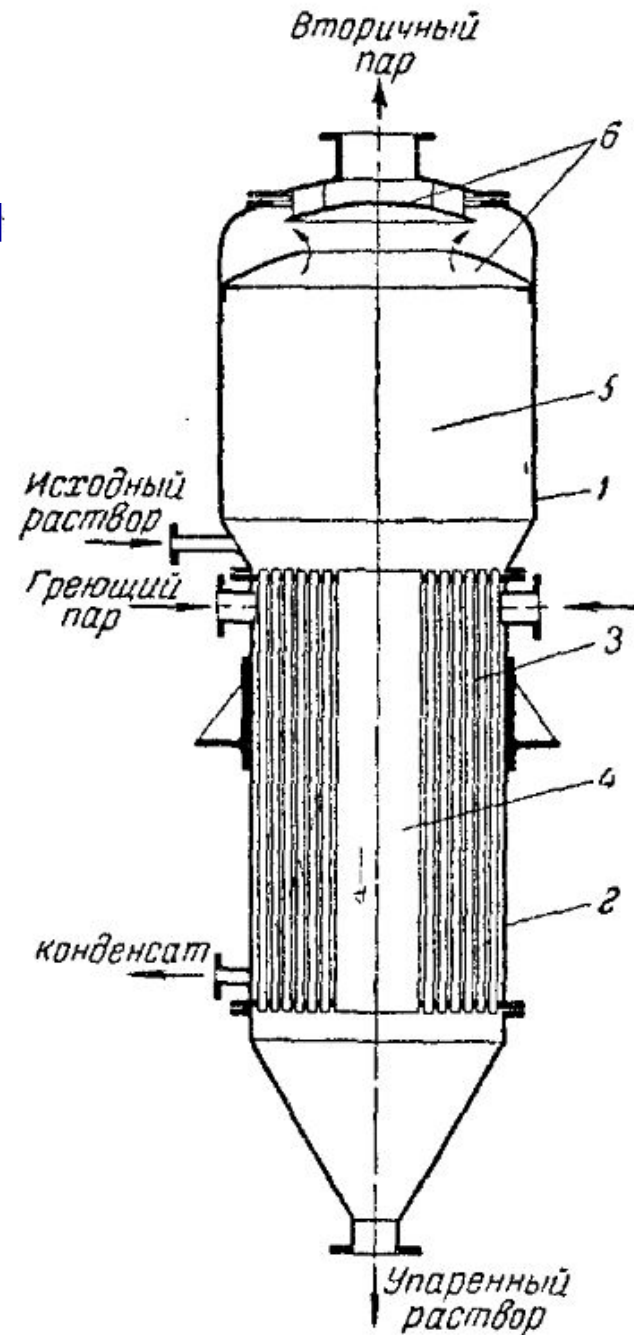
- Естественная циркуляция возникает в замкнутой системе, состоящей из необогреваемой опускной (циркуляционной) трубы и обогреваемых подъемных (кипятильных) труб.
- Если жидкость в подъемных трубах нагрета до кипения, то в результате испарения части жидкости в этой трубе образуется парожидкостная смесь, плотность которой меньше плотности самой жидкости.
- Таким образом, вес столба жидкости в опускной трубе больше, чем в подъемных трубах, вследствие чего происходит упорядоченное движение (циркуляция) кипящей жидкости.

Выпарные аппараты с естественной циркуляцией

- При циркуляции повышается коэффициент теплоотдачи со стороны кипящей жидкости и предохраняется поверхность труб от образования накипи
- Для естественной циркуляции требуются два условия:
- 1) достаточная высота уровня жидкости в опускной трубе, чтобы уравновесить столб парожидкостной смеси в кипятильных трубах и сообщить этой смеси необходимую скорость;
- 2) достаточная интенсивность парообразования в кипятильных трубах, чтобы парожидкостная смесь имела возможно малую плотность.

Выпарные аппараты с естественной циркуляцией

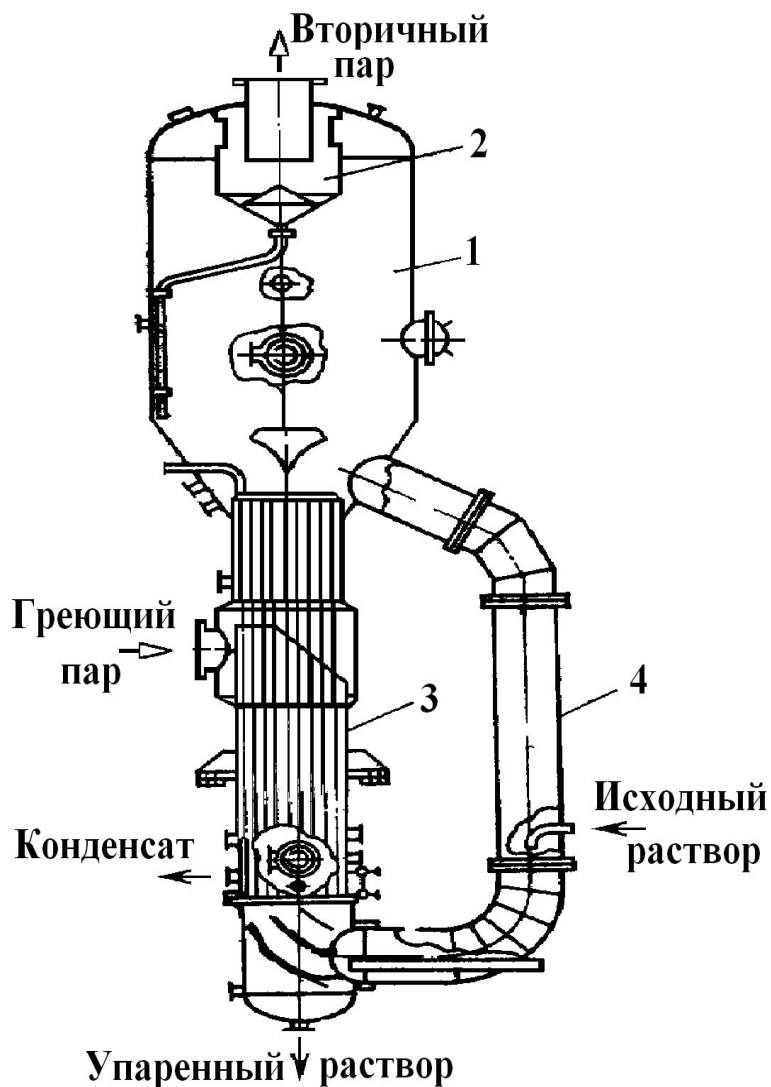
- 1 - нагревательная камера
- 2 - решетки
- 3 - кипяtilьные трубы
- 4 - центральная циркуляционная труба



Выпарные аппараты с естественной циркуляцией

- Естественная циркуляция раствора здесь происходит благодаря тому, что на единицу объема жидкости в кипятильных трубах приходится значительно большая поверхность нагрева, чем в циркуляционной трубе.
- Поэтому удельный вес раствора, находящегося в циркуляционной трубе, больше, чем в тонких трубах. Благодаря устройству циркуляционной трубы усиливается естественная циркуляция, увеличивается коэффициент теплообмена.

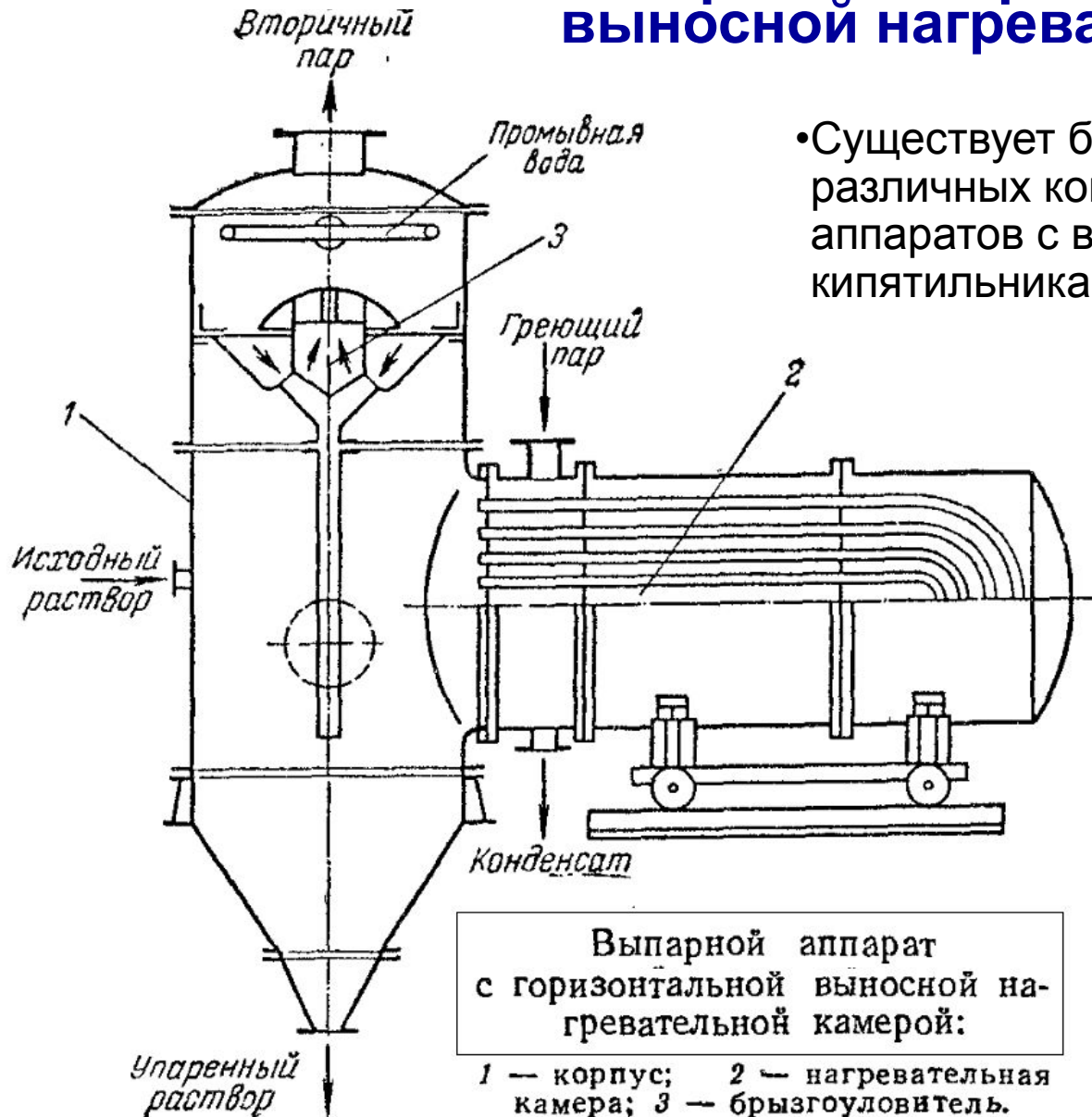
Выпарные аппараты с естественной циркуляцией



- 1 – сепаратор;
- 2 – брызгоуловитель;
- 3 – греющая камера;
- 4 – циркуляционная труба

- Данная конструкция с вынесенной циркуляционной трубой позволяет увеличить интенсивность циркуляции раствора и тем самым повысить коэффициент теплоотдачи со стороны кипящей жидкости.

Выпарной аппарат с горизонтальной выносной нагревательной камерой

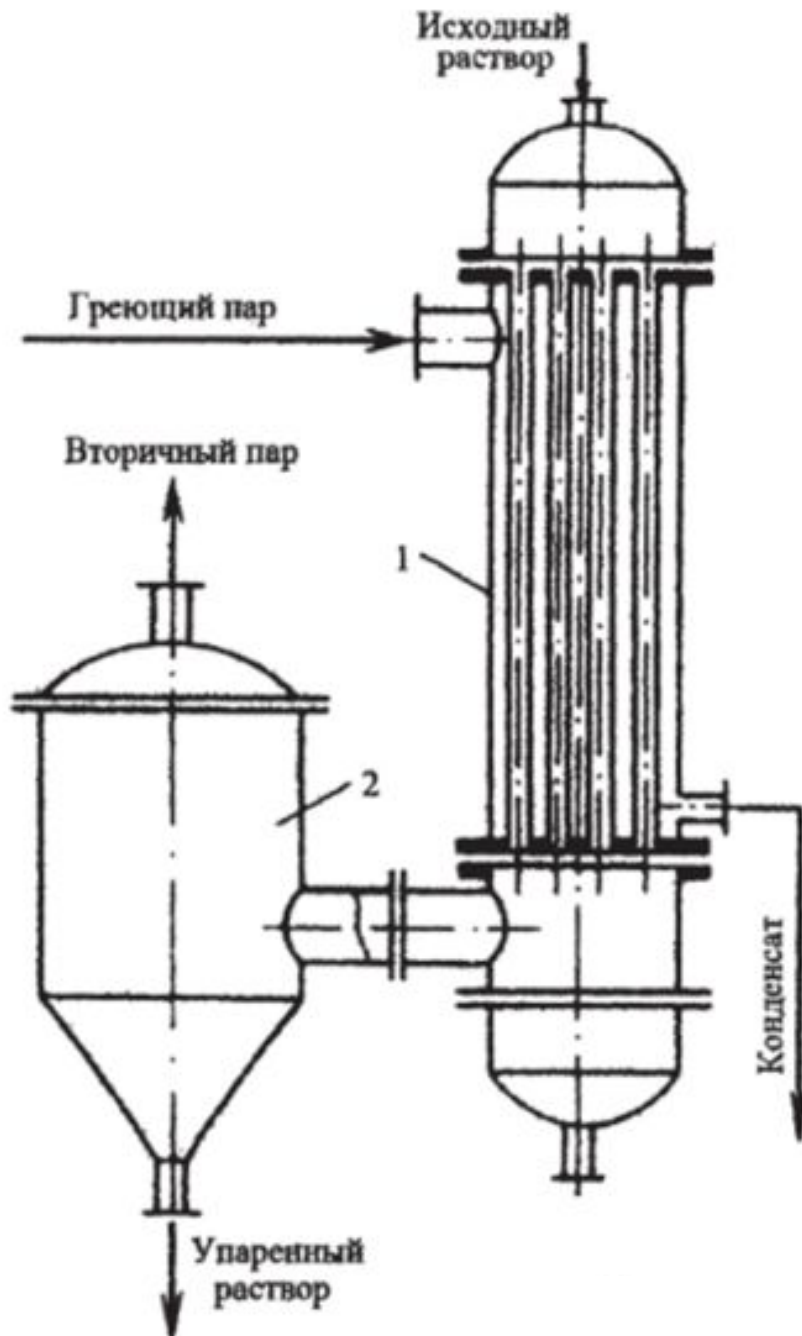


- Существует большое количество различных конструкций выпарных аппаратов с выносными кипятилниками.

Выпарной аппарат с горизонтальной выносной нагревательной камерой:

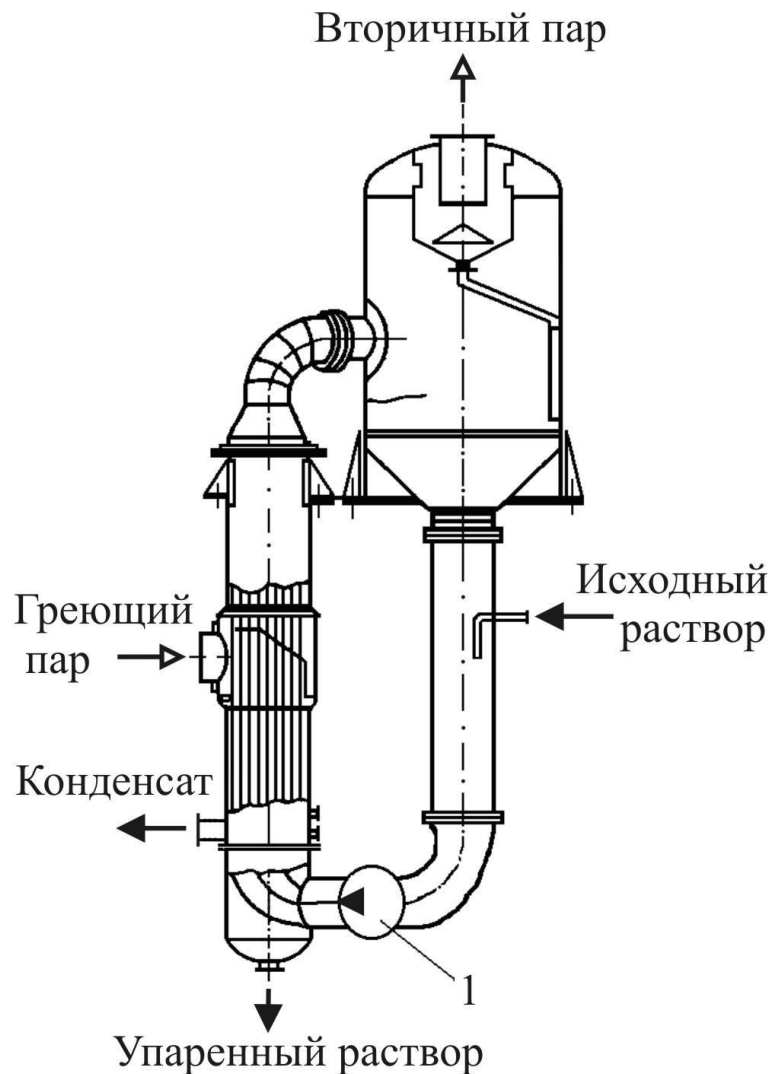
1 — корпус; 2 — нагревательная камера; 3 — брызгоуловитель.

Выпарной аппарат пленочного типа с вынесенной греющей камерой



- 1 – греющая камера;
- 2 - сепаратор

Выпарные аппараты с принудительной циркуляцией



- Позволяют повысить интенсивность циркуляции раствора и коэффициент теплопередачи
- Эти аппараты также бывают с соосной и вынесенной греющими камерами
- Скорость циркуляции в кипяточных трубах 1,5-3,5 м/с
- Коэффициент теплопередачи в 3-4 раза выше чем при естественной циркуляции.

1 – циркуляционный насос

3 Расчет выпарных аппаратов

- Разность между температурами кипения раствора (t) и чистого растворителя называется температурной (физико-химической) депрессией.

$$\Delta' = t - \vartheta$$

- Температурная депрессия зависит от свойств растворенного вещества и растворителя; она повышается с увеличением концентрации раствора и давления. Определяется температурная депрессия опытным путем (большинство опытных данных относится к температурной депрессии при атмосферном давлении).
- Если известна температурная депрессия при атмосферном давлении можно найти депрессию и при других давлениях по приближенной формуле Тищенко:

$$\Delta' = 16.2 \frac{T^2}{r} \Delta^{атм}$$

Расчет выпарных аппаратов

- Здесь T — абсолютная температура кипения (в К) и u r - теплота испарения (в Дж/кг) для воды при данном давлении.
- Повышение температуры кипения раствора определяется не только температурной депрессией, но также гидростатической и гидравлической депрессиями.
- Гидростатическая депрессия Δ'' вызывается тем, что нижние слои жидкости в аппарате закипают при более высокой температуре, чем верхние (вследствие гидростатического давления верхних слоев). В среднем гидростатическая депрессия составляет 1-3 К.
- Гидравлическая депрессия Δ''' учитывает повышение давления в аппарате вследствие гидравлических потерь при прохождении вторичного пара через ловушку и выходной трубопровод.
- При расчетах Δ''' принимают равной 1 К.

4 Материальный баланс выпарного аппарата

- Обозначим:
 - начальное (до выпарки) и конечное (после выпарки) количество раствора (в кг) через G_H и G_K .
 - Начальную и конечную концентрацию (в весовых долях) через x_H и x_K
 - Количество выпаренной воды (в кг) через W .
- Тогда можно написать уравнение материального баланса по всему количеству вещества:

$$G_H = G_K + W \quad (1)$$

Материальный баланс выпарного аппарата

- Уравнение материального баланса по растворенному веществу:

$$G_H X_H = G_K X_K \quad (2)$$

- В уравнения входят пять величин; три величины должны быть заданы, а остальные две можно определить из этих уравнений.
- Обычно бывают известны G_H , x_H и x_K , тогда из уравнения (2):

$$G_K = G_H \frac{x_H}{x_K}$$

Материальный баланс выпарного аппарата

- Последнее уравнение с учетом (1) дает возможность определить количество выпаренной воды.

$$W = G_H \left(1 - \frac{X_H}{X_K} \right)$$

и конечную концентрацию раствора:

$$X_K = \frac{G_H X_H}{G_H - W}$$

5 Тепловой баланс выпарного аппарата

- Уравнение теплового баланса

$$G_H c_H t_H + D \cdot i_n = G_K c_K t_K + W \cdot i + D \cdot i_K + Q_n, \quad (4)$$

где G_H , G_K – массовый расход соответственно поступающего и упаренного растворов, кг/с;

c_H и c_K – удельные теплоемкости поступающего и упаренного растворов, Дж/(кг °С);

t_H и t_K – температуры поступающего и упаренного растворов, °С;

D – массовый расход греющего пара, кг/с;

W – расход вторичного пара, кг/с;

i_n , i , i_K – энтальпия соответственно греющего пара, вторичного пара и конденсата, Дж/кг.

Q_n – потери теплоты в окружающую среду, Вт.

Тепловой баланс выпарного аппарата

- Определение поверхности теплообмена:

$$F=Q/(k\Delta t)$$

где k - коэффициент теплопередачи определяется следующим образом:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

где α_1 и α_2 - коэффициенты теплоотдачи от греющего пара к стенке трубы и от стенки трубы к выпариваемому раствору, Вт/(м²°С);

δ_1, δ_2 – толщина осадка (пригара) по обе стороны стенки, м;

λ_1, λ_2 – коэффициент теплопроводности осадка (пригара) по обе стороны стенки, Вт/(м · град).

Благодарю за внимание