



КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



*Лекция №7 Тема: «Энергосбережение в  
процессах выпаривания»*

*Зав. Каф. д.т.н., профессор, директор департамента НО:*

*Ильин В.К.*

# ***Вопросы***

1. Выпаривание
2. Устройство выпарных аппаратов
3. Выпарные аппараты с естественной циркуляцией
4. Расчет выпарных аппаратов
  - 4.1. Материальный баланс выпарного аппарата
  - 4.2. 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.
- Как правило, 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, используются в технологическом процессе или направляются в конденсирующее устройство.

- 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.

- 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 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).

- 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.

- 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.



- 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.

- 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:
  - кипятильник (греющая камера), в котором расположена поверхность теплообмена и происходит выпаривание раствора;
  - сепаратор — пространство, в котором вторичный пар отделяется от раствора.

- 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 со свободной циркуляцией;
  - 2) выпарные аппараты с естественной циркуляцией;
  - 3) выпарные аппараты с принудительной циркуляцией;
  - 4) пленочные выпарные аппараты.

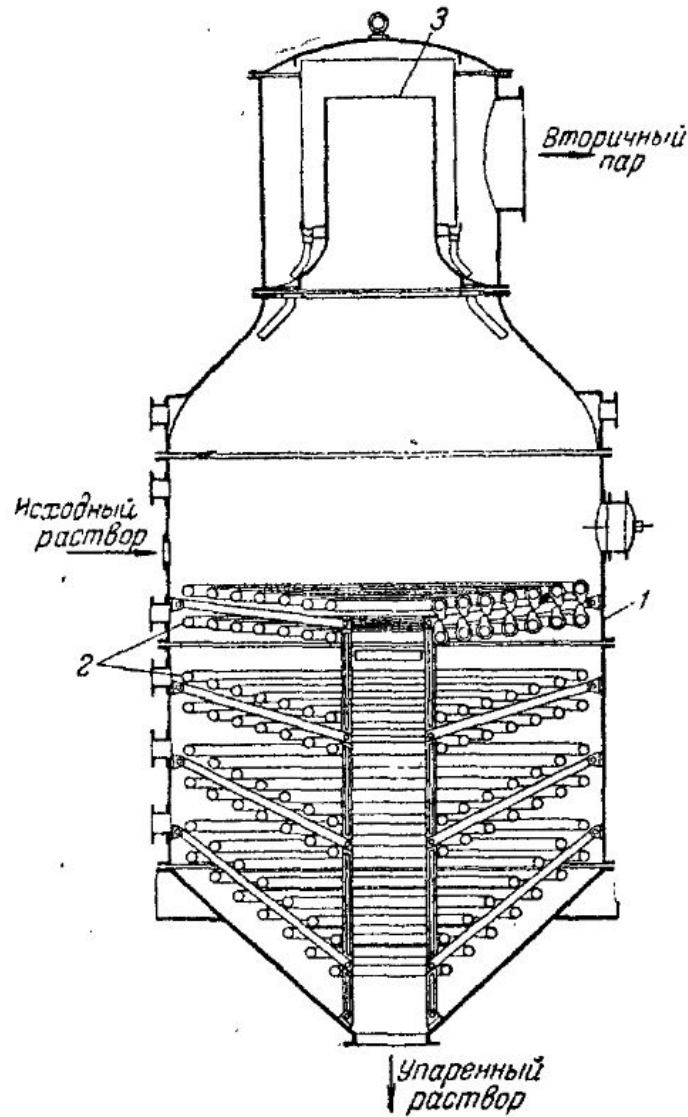
- В выпарных аппаратах со свободной циркуляцией неподвижный или медленно движущийся раствор находится снаружи труб.
- К данной группе относятся аппараты, выполненные в виде чаш или котлов, поверхность теплообмена которых образована стенками аппарата.
- В настоящее время такие аппараты применяются редко, главным образом при выпаривании очень вязких жидкостей.

- 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.

- 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

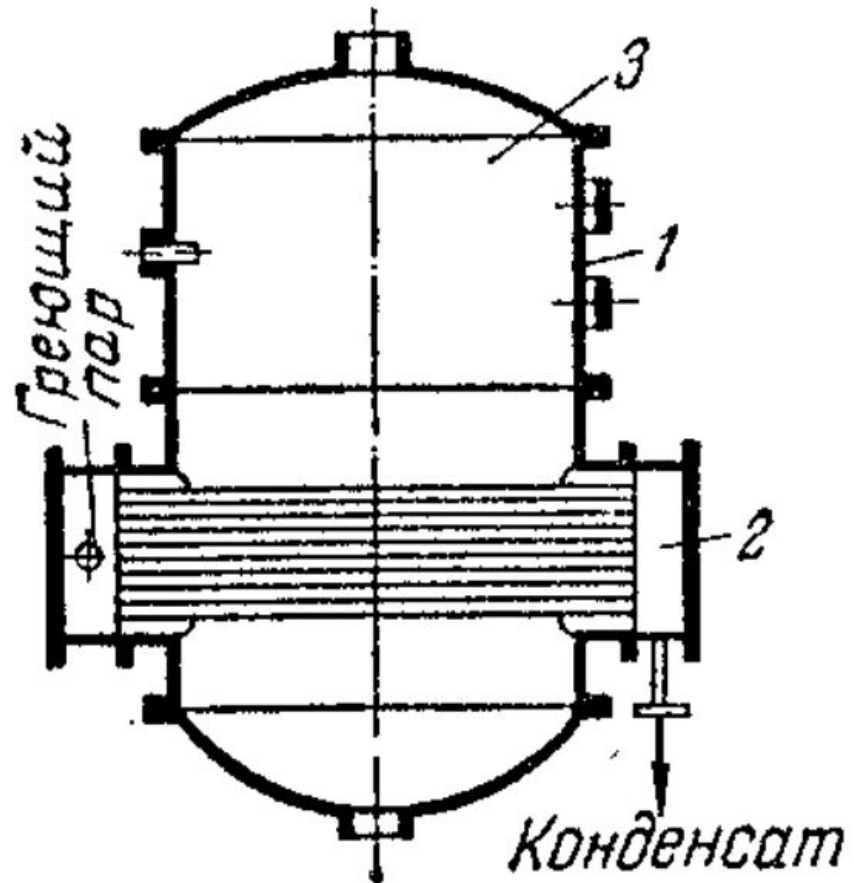
- 1 - корпус
- 2 - паровые змеевики
- 3 - брызгоуловитель





## Выпарной аппарат с горизонтальной трубчатой нагревательной камерой

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



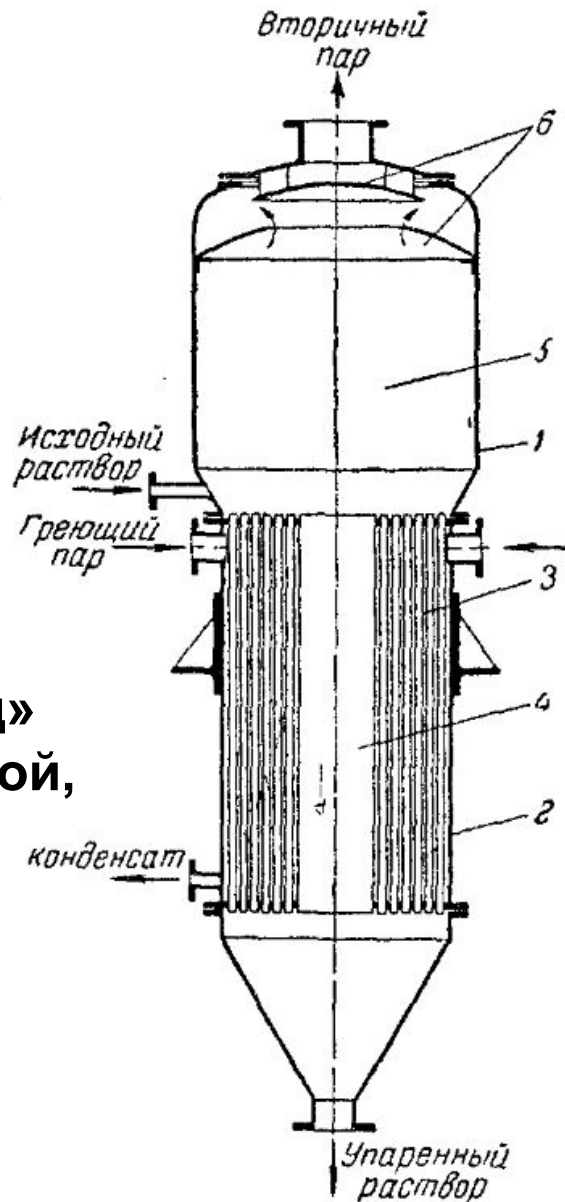
### 3. Выпарные аппараты с естественной циркуляцией

- 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.

- 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.

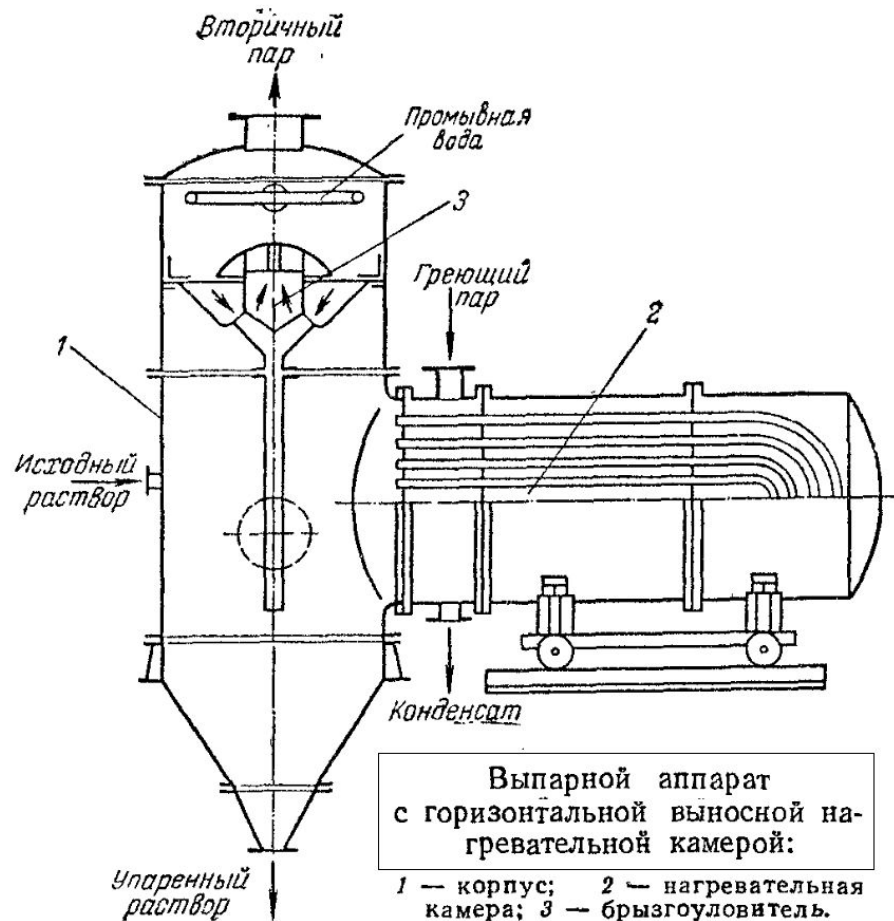
- 1-нагревательная камера
- 2 - решетки
- 3-кипятильные трубки
- 4-циркуляционная труба

**Выпарной аппарат системы «Рapid»  
с центральной циркуляционной трубой,  
применяемый для выпарки  
концентрированных  
электролитических щелочей.**

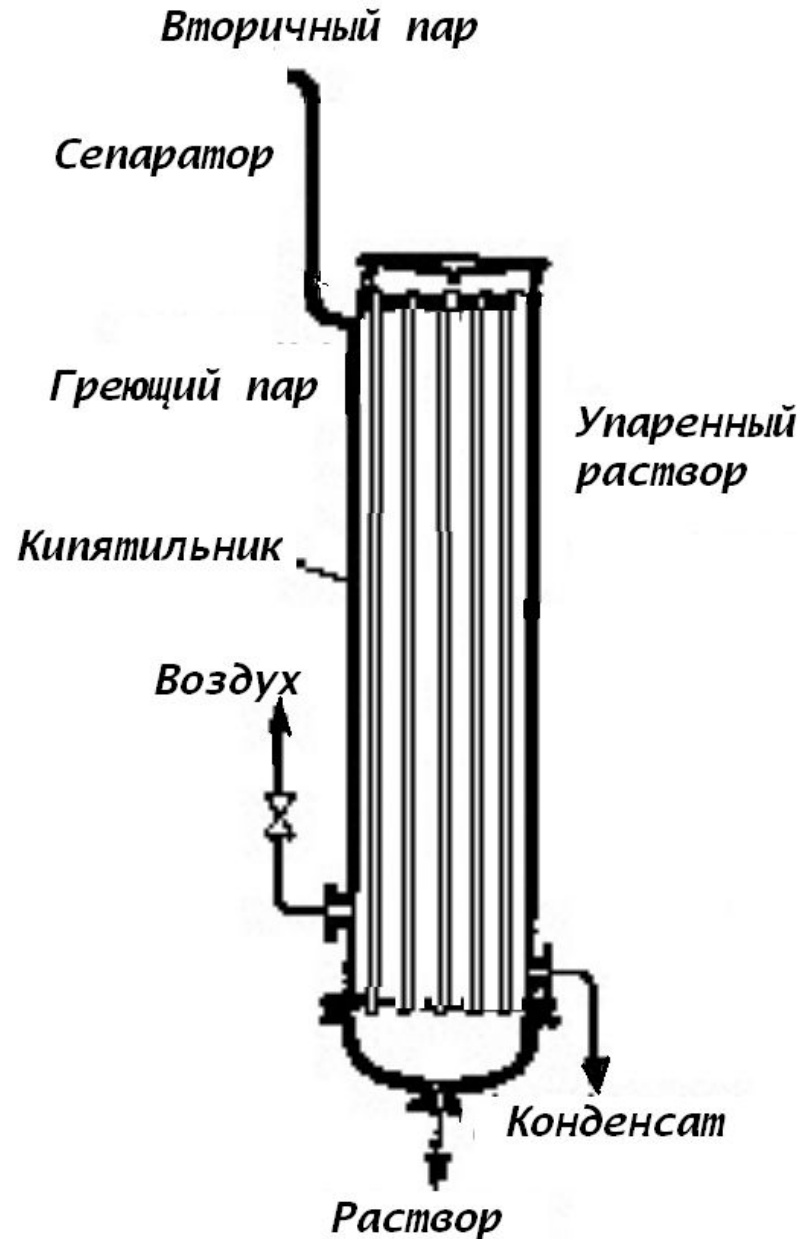


- Естественная циркуляция раствора здесь происходит благодаря тому, что на единицу объема жидкости в кипятильных трубах приходится значительно большая поверхность нагрева, чем в циркуляционной трубе.
- Поэтому удельный вес раствора, находящегося в циркуляционной трубе, больше, чем в тонких трубах. Благодаря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

# Выпарной аппарат с горизонтальной выносной нагревательной камерой



# Выпарной аппарат пленочного типа



## 4. Расчет выпарных аппаратов

Давление пара растворителя над раствором всегда ниже, чем давление над чистым растворителем.

Вследствие этого, температура кипения раствора выше температуры кипения чистого растворителя при том же давлении.

- Например, вода кипит под атмосферным давлением при  $100^{\circ}\text{C}$ , так как давление ее пара при этой температуре равно 1 ат;
- для 30% раствора NaOH давление водяного пара над раствором будет при  $100^{\circ}\text{C}$  ниже 1 ат, и раствор закипит при более высокой температуре ( $117^{\circ}\text{C}$ ), когда давление пара над ним достигнет 1 ат.



- Разность между температурами кипения раствора ( $t$ ) и чистого растворителя называется температурной 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:

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

- Здесь  $T$ — абсолютная температура кипения (в К) ,  $r$  -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  $\Delta''$  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  $\Delta'''$  учитывает повышение давления в аппарате вследствие гидравлических потерь при прохождении вторичного пара через ловушку и выходной трубопровод.
- При расчетах  $\Delta'''$  принимают равной 1 К.

## 4.1. Материальный баланс выпарного аппарата

- Обозначим:
  - начальное (до выпарки) и конечное (после выпарки) количество раствора (в кг) через  $G_1$  и  $G_2$ .
  - Начальную и конечную концентрацию (в весовых долях) через  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$
  - Количество выпаренной воды (в кг) через  $W$ .
- Тогда можно написать уравнение материального баланса по всему количеству вещества:

$$G_1 = G_2 + W \quad (1)$$

- Уравнение материального баланса по растворенному веществу:

$$G_1\alpha_1 = G_2\alpha_2 \quad (2)$$

- В уравнения 1 и 2 входят пять величин; три величины должны быть заданы, а остальные две можно определить из этих уравнений.
- Обычно бывают известны  $G_1$ ,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , тогда, решая совместно уравнения (1) и (2), находим:

$$G_2 = \frac{\alpha_2}{G_1\alpha_1}$$

- Последнее уравнение дает возможность определить количество выпаренной воды.

$$W = G_1 - G_2 = G_1 \left(1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right) \quad (3)$$

- Из уравнений (1) и (2) вычисляют конечную концентрацию раствора:

$$\alpha_2 = \frac{G_1 \alpha_1}{G_1 - W}$$

а из уравнения (3) находят  $G_2$ .

## 4.2. Тепловой баланс выпарного аппарата

- Составим уравнение теплового баланса выпарного аппарата для выпариваемого раствора

$$Q + G_1 c_1 t_0 = W_{deg} + G_2 c_2 t + Q_n + Q \quad (4)$$

- где  $Q$ - тепло, отдаваемое нагревающим агентом,
- $c_1$  и  $c_2$ - удельные теплоемкости поступающего и уходящего растворов, Дж/Кг К;
- $t_0$  и  $t$  - температуры поступающего и уходящего растворов, К;
- $i$  - энтальпия вторичного пара, Дж/Кг;
- $Q_{deg}$  - теплота дегидратации;
- $Q_n$  - потери теплоты в окружающую среду.

- Теплота дегидратации представляет собой затрату тепла на повышение концентрации раствора; Обычно теплота дегидратации невелика и поэтому не учитывается.
- Рассматривая поступающий раствор как смесь упаренного раствора и испаренной воды, можно написать:

$$Q_1 t_1 = G_2 c_2 t + W_B$$

- Здесь  $c_B$  — удельная теплоемкость воды, Дж/Кг К

- Откуда следует:

$$G_2 c_2 = G_1 c_1 - W_B$$

- Подставляя значение  $G_2 c_2$  в уравнение (4), получим:

$$Q = G_1 c_1 (t - t_0) + W (i - c_B t) + Q_{deg} + Q_n$$

- Если пренебречь теплотой дегидратации и потерями тепла, то предыдущее уравнение запишется в виде:

$$Q = G_1 c_1 (t - t_0) + W (i - c_B t) \quad (5)$$



- В этом уравнении член -  $G_1 C_1 (t - t_0)$  представляет собой расход тепла на подогрев поступающего раствора до температуры кипения, а член -  $w (i - c_v t)$  - расход тепла на испарение воды.
- Энтальпия вторичного пара  $i$  принимается равной энтальпии насыщенного водяного пара при давлении в аппарате и находится по справочным таблицам.
- Определив по уравнению (5) расход тепла на выпаривание (тепловую нагрузку аппарата), вычисляют расход греющего пара.

- Определение поверхности теплообмена:

$$F = \frac{Q}{k\Delta t\tau};$$

- $k$  - коэффициент теплопередачи определяется следующим образом:

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

- $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - коэффициенты теплоотдачи от греющего пара к стенке трубы и от стенки трубы к выпариваемому раствору.
- $\frac{\delta_1}{\lambda_1}$  и  $\frac{\delta_2}{\lambda_2}$  - термические сопротивления стенки трубы и накипи.

*Благодарю за внимание*