

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:
 - кипятыльник (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.

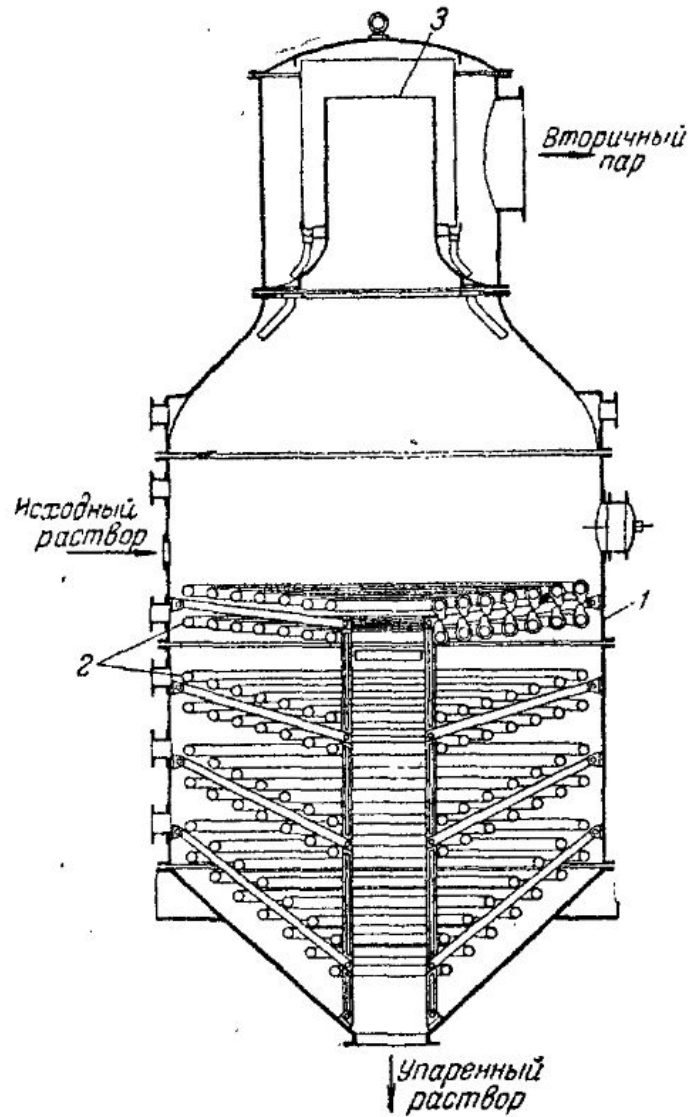
- В выпарных аппаратах со свободной циркуляцией неподвижный или медленно движущийся раствор находится снаружи труб.
- К данной группе относятся аппараты, выполненные в виде чаш или котлов, поверхность теплообмена которых образована стенками аппарата.
- В настоящее время такие аппараты применяются редко,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

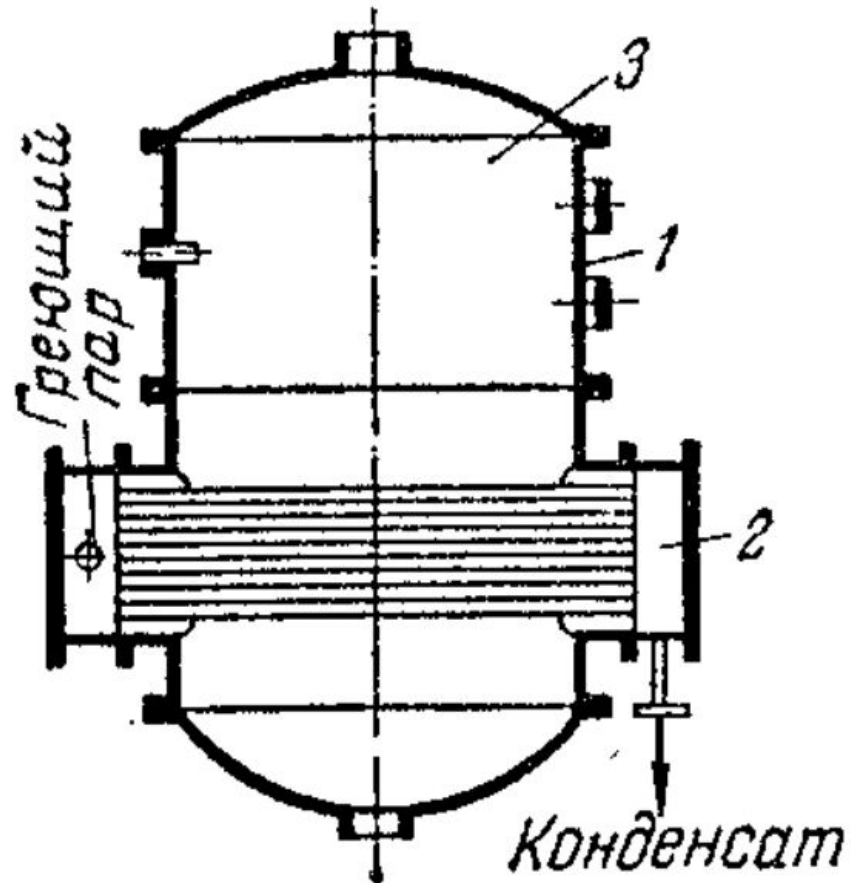
Змеевиковый выпарной аппарат

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



Выпарной аппарат с горизонтальной трубчатой нагревательной камерой

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



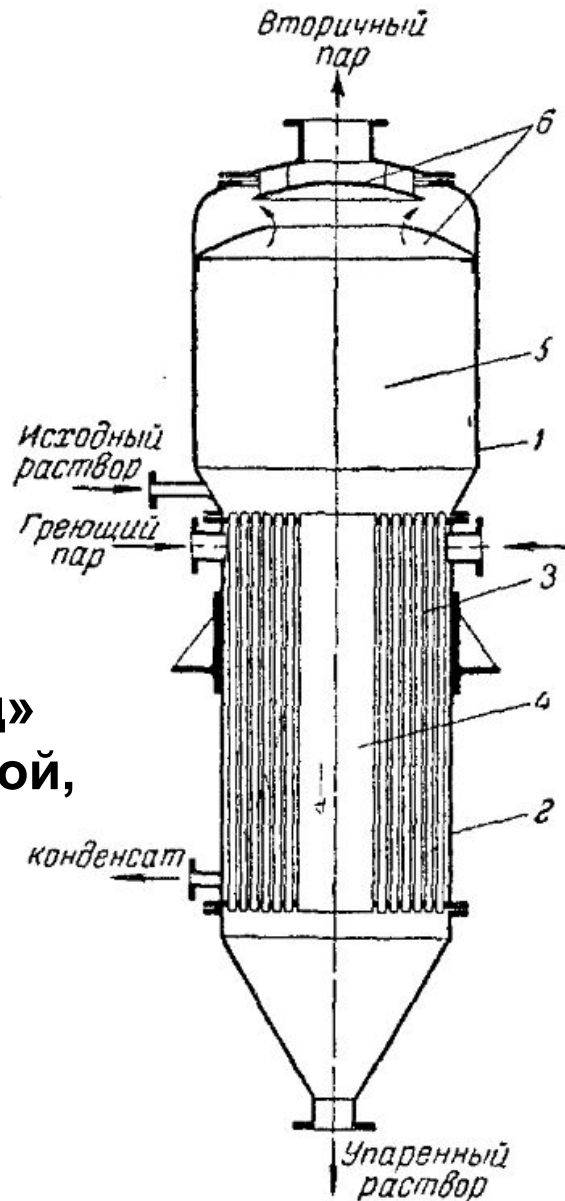
3. Выпарные аппараты с естественной циркуляцией

- 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.

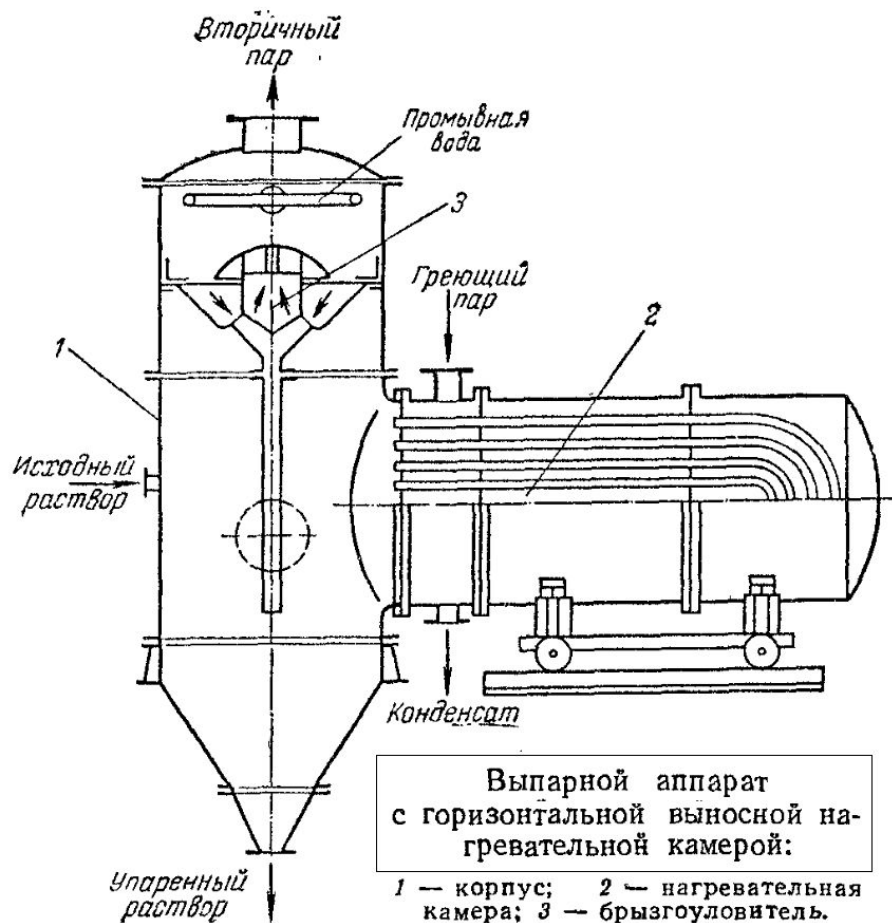
- 1-нагревательная камера
- 2 - решетки
- 3-кипятильные трубки
- 4-циркуляционная труба

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

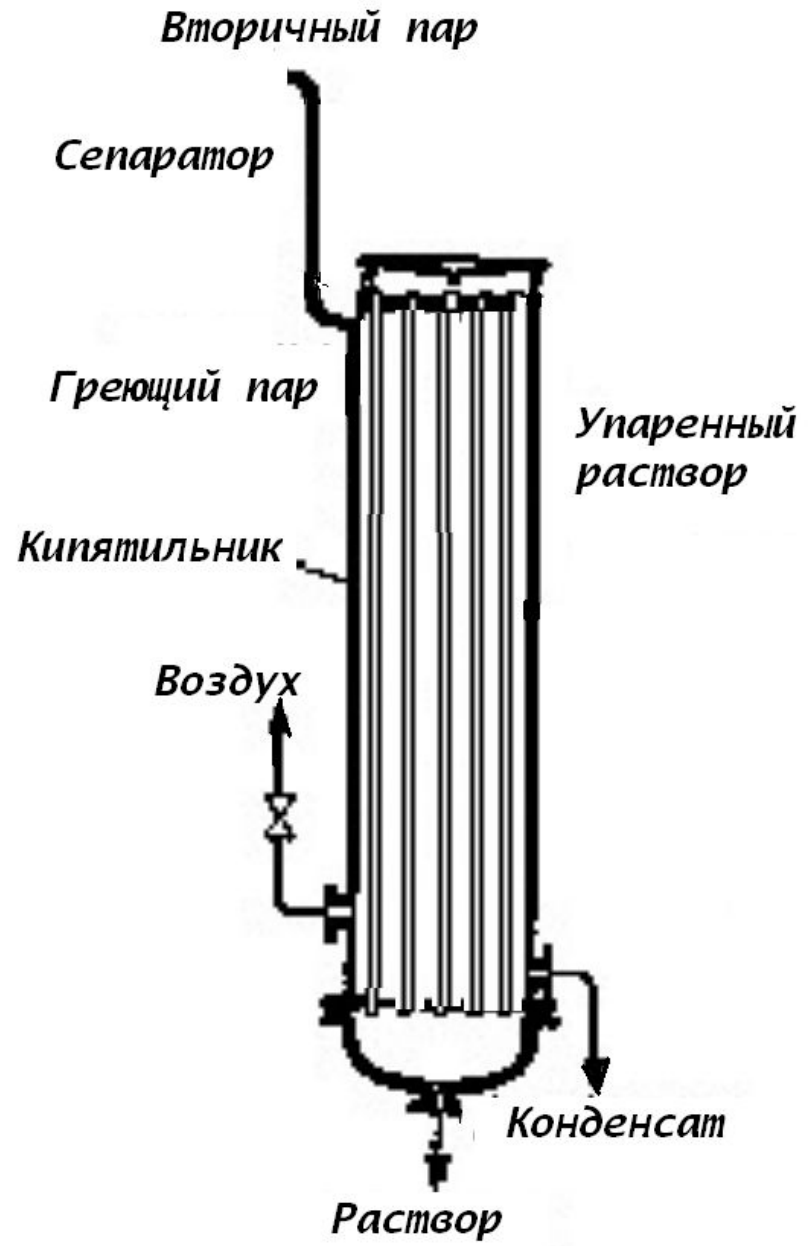


- Естественная циркуляция раствора здесь происходит благодаря тому, что на единицу объема жидкости в кипятильных трубах приходится значительно большая поверхность нагрева, чем в циркуляционной трубе.
- Поэтому удельный вес раствора, находящегося в циркуляционной трубе, больше, чем в тонких трубах. Благодаря 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°C , так как давление ее пара при этой температуре равно 1 ат;
- для 30% раствора NaOH давление водяного пара над раствором будет при 100°C ниже 1 ат, и раствор закипит при более высокой температуре (117°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 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.

4.1. 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 α_1 и α_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 , α_1 и α_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:

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

- α_1 и α_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