



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Уравнение массоотдачи. Уравнение массопередачи.
Выпаривание

**к.т.н., старший преподаватель
НОЦ им. Кижнера
Богданов Илья Александрович**

среда, 15 октября 2025 г.



УРАВНЕНИЕ МАССООТДАЧИ

Ввиду сложности механизма процессов конвективного массообмена для практических расчетов его интенсивности используют феноменологическое уравнение – уравнение массоотдачи.

При этом принимают, что скорость массоотдачи пропорциональна движущей силе. Движущая сила массоотдачи выражается как разность концентраций распределяемого вещества в ядре потока фазы и на границе раздела фаз, либо наоборот – на границе раздела фаз и в ядре потока, в зависимости от направления перемещения распределяемого вещества.

Для стационарного процесса для газовой и жидкой фаз соответственно (при условии, что газовая фаза является отдающей) уравнение массоотдачи в дифференциальной форме записывается следующим образом:

$$dM = \beta_y dF (y - y_{gp})$$

$$dM = \beta_x dF (x_{gp} - x)$$

M – расход распределяемого компонента, переходящего из фазы в фазу, кмоль/с

β_y и β_x – коэффициенты массоотдачи в газовой и жидкой фазах соответственно, кмоль/(м²·с)

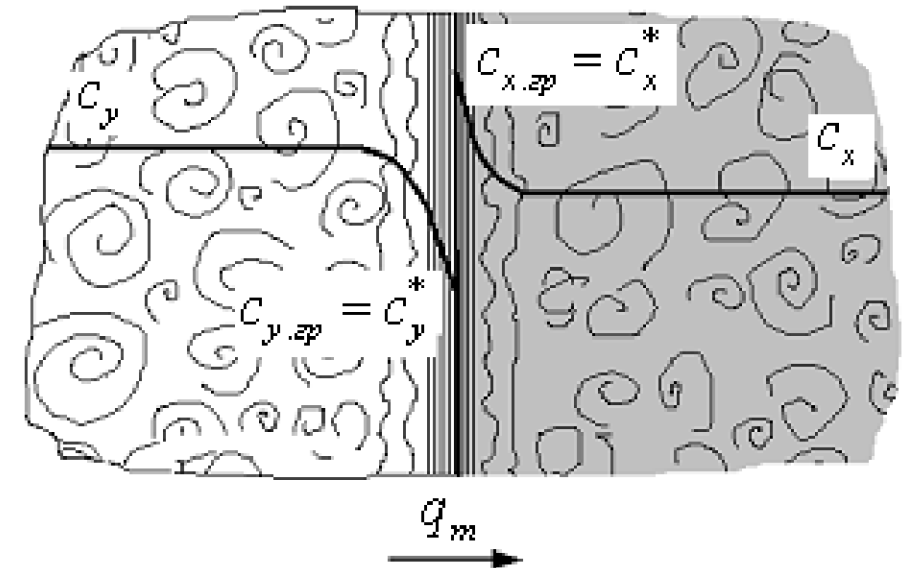
F – площадь поверхности контакта фаз, м²

y и x – рабочие молярные доли распределяемого компонента в ядрах потоков фаз, кмоль компонента/кмоль смеси;

y_{gp} и x_{gp} – молярные доли распределяемого компонента на границе раздела фаз, кмоль компонента/кмоль смеси.

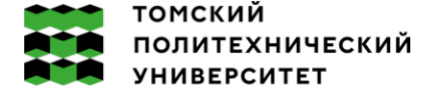
Газовая фаза

Жидкая фаза



УРАВНЕНИЕ МАССООТДАЧИ

Для стационарного массообмена в целом для всей поверхности раздела фаз уравнения массоотдачи представляются в следующем виде:



$$M = \beta_y F (y - y_{gr})_{cp} ;$$

$$M = \beta_x F (x_{gr} - x)_{cp} ,$$

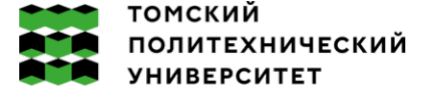
$(y - y_{gr})_{cp}$ и $(x - x_{gr})_{cp}$ – среднеинтегральные для всей поверхности контакта фаз величины движущих сил массоотдачи в газовой и жидкой фазах соответственно, кмоль компонента/кмоль смеси.

Коэффициент массоотдачи показывает, какое количество вещества переносится из ядра потока к границе раздела фаз через единицу поверхности в единицу времени при движущей силе, равной единице.

В рассмотренных уравнениях β_y и β_x – осредненные для всей поверхности контакта фаз коэффициенты массоотдачи. Также считают, что на границе раздела фаз устанавливаются составы фаз, близкие к равновесным. Поэтому в рассмотренных уравнениях можно заменить граничные концентрации распределяемого компонента на соответствующие его равновесные концентрации: y_{gr} на y^* и x_{gr} на x^* .

УРАВНЕНИЕ МАССОПЕРЕДАЧИ

Согласно общим закономерностям химико-технологических процессов (основного кинетического закона явлений переноса) основной закон массопередачи формулируется следующим образом:



$$\frac{dM}{dF d\tau} = \frac{\Delta}{R}$$

«Скорость процесса массопередачи пропорциональна его движущей силе и обратно пропорциональна общему диффузионному сопротивлению»

M – масса (количество) распределяемого вещества, переносимого из фазы в фазу; F – поверхность взаимодействия фаз; τ – время; Δ – движущая сила; R – общее диффузионное сопротивление

Величину, обратную общему диффузионному сопротивлению R , называют коэффициентом массопередачи K . С учетом этого и преобразования получим основное *уравнение массопередачи*:

$$dM = K dF d\tau \Delta$$

Для стационарного массообменного процесса для всей поверхности взаимодействия фаз расход распределяемого вещества, переносимого из фазы в фазу, определяется по уравнению массопередачи, представленному в следующем виде:

$$M = KF \Delta$$

Движущая сила массопередачи – это разность рабочей и равновесных концентраций (долей) распределяемого вещества в отдающей фазе или разность равновесной и рабочей его концентраций (долей) в принимающей фазе.

ВЫПАРИВАНИЕ

Выпаривание – процесс концентрирования жидких растворов практически нелетучих веществ путем частичного удаления растворителя испарением при кипении жидкости. В процессе выпаривания растворитель удаляется из всего объема раствора, в то время как при температурах ниже температур кипения испарение происходит только с поверхности жидкости.

В химической промышленности выпариванию подвергают растворы твердых веществ (главным образом водные растворы щелочей, солей и др.), а также растворы высококипящих жидкостей, обладающих при температуре выпаривания очень малым давлением-пара (некоторые минеральные и органические кислоты, многоатомные спирты и др.). Выпаривание иногда применяют также для выделения растворителя в чистом виде: при опреснении морской воды выпариванием образующийся из нее водяной пар конденсируют и полученную воду используют для питьевых или технических целей.

В ряде случаев выпаренный раствор подвергают последующей кристаллизации в специальных выпарных аппаратах.

Концентрированные растворы и твердые вещества, получаемые в результате выпаривания, легче и дешевле перерабатывать, хранить и транспортировать.

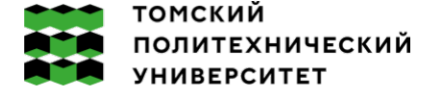


ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



ВЫПАРИВАНИЕ

Тепло для выпаривания можно подводить любыми теплоносителями, применяемыми при нагревании. Однако в подавляющем большинстве случаев в качестве греющего агента при выпаривании используют водяной пар, который называют **греющим**, или **первичным**.



Первичным служит либо пар, получаемый из парогенератора, либо отработанный пар, или пар промежуточного отбора паровых турбин.

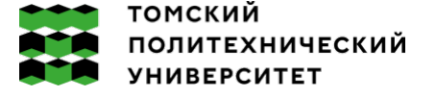
Пар, образующийся при выпаривании кипящего раствора, называется **вторичным**.

Тепло, необходимое для выпаривания раствора, обычно подводится через стенку, отделяющую теплоноситель от раствора. В некоторых производствах концентрирование растворов осуществляют при непосредственном соприкосновении выпариваемого раствора с топочными газами или другими газообразными теплоносителями.



ВЫПАРИВАНИЕ

Процессы выпаривания проводят под вакуумом, при повышенном и атмосферном давлениях. Выбор давления связан со свойствами выпариваемого раствора и возможностью использования тепла вторичного пара.



Выпаривание **под вакуумом** имеет определенные преимущества перед выпариванием при атмосферном давлении, несмотря на то что теплота испарения раствора несколько возрастает с понижением давления и соответственно увеличивается расход пара на выпаривание 1 кг растворителя (воды).

Достоинства использования выпаривания под вакуумом:

1. Становится возможным проводить процесс при более низких температурах, что важно в случае концентрирования растворов веществ, склонных к разложению при повышенных температурах.
2. Увеличивается полезная разность температур между греющим агентом и раствором, что позволяет уменьшить поверхность нагрева аппарата (при прочих равных условиях). В случае одинаковой полезной разности температур при выпаривании под вакуумом можно использовать греющий агент более низких рабочих параметров (температура и давление). Вследствие этого выпаривание под вакуумом широко применяют для концентрирования высококипящих растворов, например растворов щелочей, а также для концентрирования растворов с использованием теплоносителя (пара) невысоких параметров.
3. Применение вакуума дает возможность использовать в качестве греющего агента, кроме первичного пара, вторичный пар самой выпарной установки, что снижает расход первичного греющего пара. Вместе с тем при применении вакуума удорожается выпарная установка, поскольку требуются дополнительные затраты на устройства для создания вакуума (конденсаторы, ловушки, вакуум-насосы), а также увеличиваются эксплуатационные расходы.

ВЫПАРИВАНИЕ

Процессы выпаривания проводят под вакуумом, при повышенном и атмосферном давлении. Выбор давления связан со свойствами выпариваемого раствора и возможностью использования тепла вторичного пара.



Достоинства использования выпаривания под давлением:

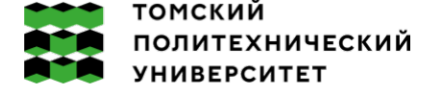
1. При выпаривании под давлением выше атмосферного также можно использовать вторичный пар как для выпаривания, так и для других нужд, не связанных с процессом выпаривания. Вторичный пар, отбираемый на сторону, называют экстра-паром. Отбор экстра-пара при выпаривании под избыточным давлением позволяет лучше использовать тепло, чем при выпаривании под вакуумом. Однако выпаривание под избыточным давлением сопряжено с повышением температуры кипения раствора. Поэтому данный способ применяется лишь для выпаривания термически стойких веществ. Кроме того, для выпаривания под давлением необходимы греющие агенты с более высокой температурой.

При выпаривании под атмосферным давлением вторичный пар не используется и обычно удаляется в атмосферу. Такой способ выпаривания является наиболее простым, но наименее экономичным.



ВЫПАРНЫЕ АППАРАТЫ

Разнообразные конструкции выпарных аппаратов, применяемые в промышленности, можно классифицировать.



по типу поверхности нагрева	по расположению поверхности нагрева	по роду теплоносителя
<ul style="list-style-type: none">• паровые рубашки• змеевики• трубчатки различных видов	<ul style="list-style-type: none">• вертикальной нагревательной камерой• горизонтальной нагревательной камерой• наклонной нагревательной камерой	<ul style="list-style-type: none">• водяной пар• высокотемпературные теплоносители• электрический ток

Однако более существенным признаком классификации выпарных аппаратов, характеризующим интенсивность их действия, следует считать вид и кратность циркуляции раствора.

Различают выпарные аппараты с **неорганизованной (свободной), направленной (естественной)** и **принудительной** циркуляцией раствора.

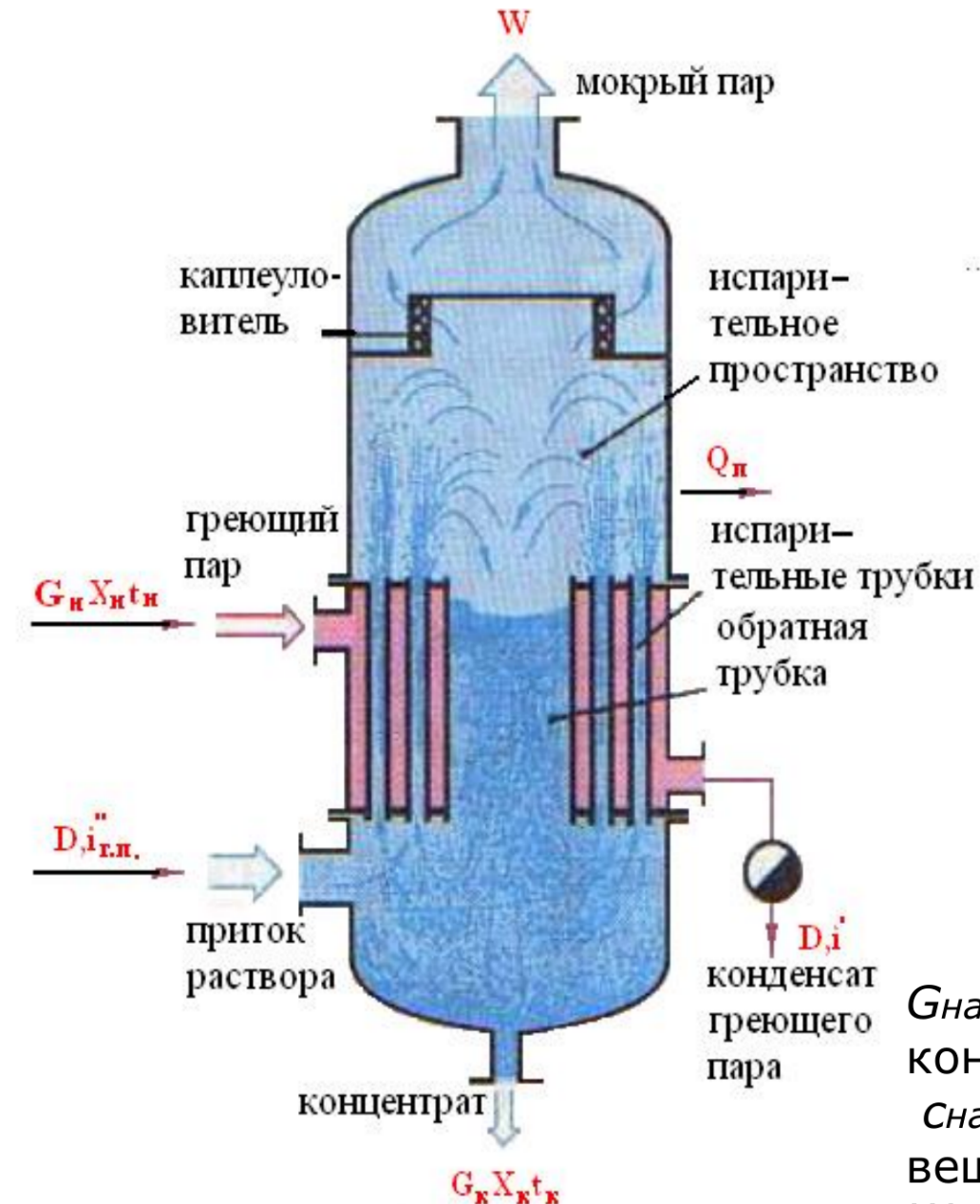
Выпарные аппараты делят также на аппараты **прямоточные**, в которых выпаривание раствора происходит за один его проход через аппарат без циркуляции раствора, и аппараты, работающие с **многократной циркуляцией** раствора.

В зависимости от организации процесса различают **периодически** и **непрерывно** действующие выпарные аппараты.

Выпарной аппарат должен отвечать ряду предъявляемых требований:

1. Быть простым, компактным, надёжным в эксплуатации
2. Иметь высокую производительность
3. Допускать возможно большие напряжения поверхности нагрева
4. Иметь высокие коэффициенты теплопередачи при минимальном весе и стоимости.

ВЫПАРНОЙ АППАРАТ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ



Аппарат имеет нагревательную камеру, состоящую из корпуса с кипящими трубками и с центральной циркуляционной трубой большого диаметра, закреплёнными в трубных решётках. Греющий пар подаётся в межтрубное пространство, конденсируется и отводится из аппарата в виде конденсата. Исходный упариваемый раствор непрерывно подаётся сверху, а упаренный раствор также непрерывно удаляется.

Уравнение материального баланса выпаривания:

$$G_{нач} \cdot c_{нач} = G_{кон} \cdot c_{кон}$$

$$G_{нач.} = G_{кон.} + W$$

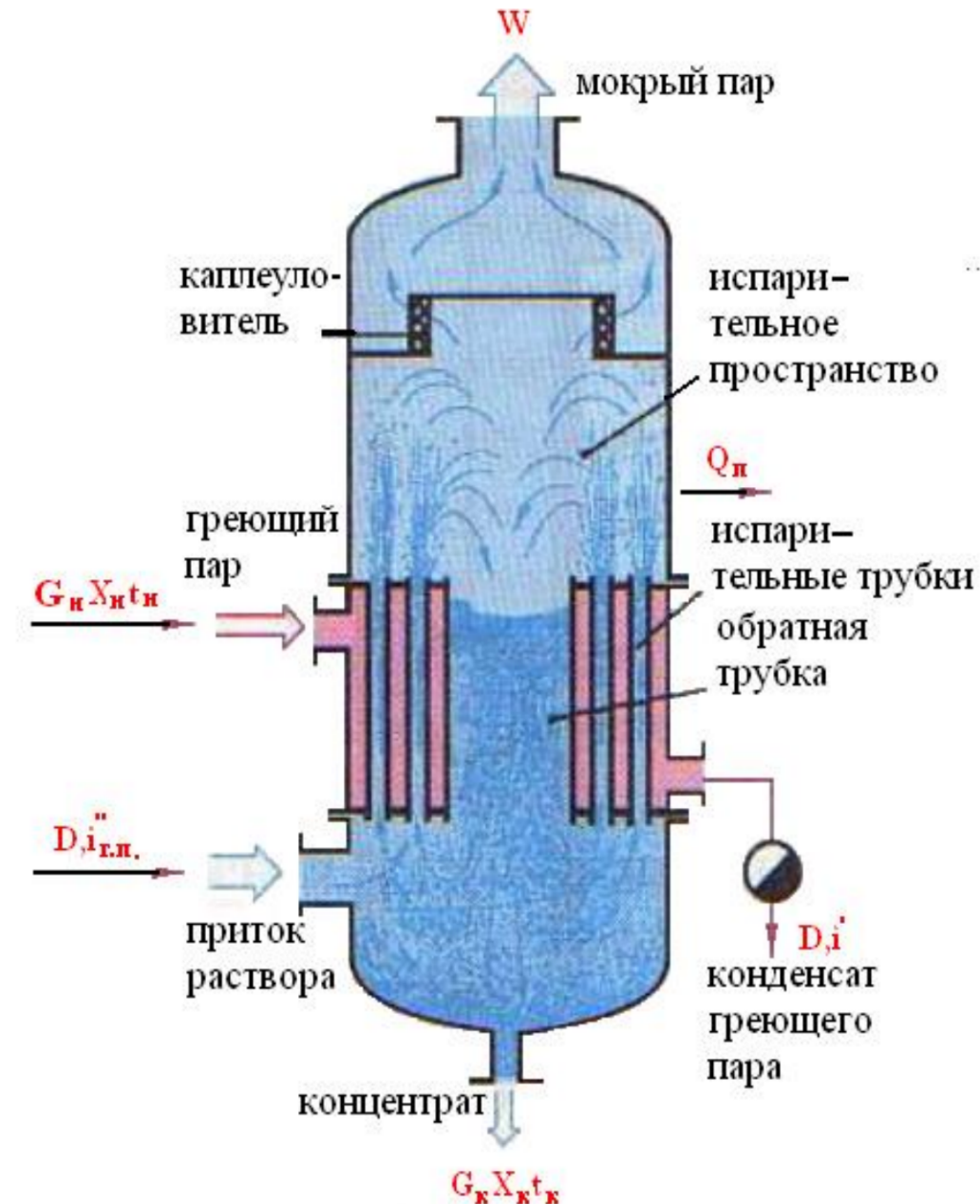
$$W = G_{нач} \left(1 - \frac{c_{нач}}{c_{кон}} \right)$$

$G_{нач}$, $G_{кон}$ – соответственно массовые расходы начального и конечного раствора, кг/с

$c_{нач}$, $c_{кон}$ – соответственно массовые доли растворенного вещества в начальном и конечном растворе

W – массовый расход выпариваемой воды, кг/с

ВЫПАРНОЙ АППАРАТ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ



Уравнение теплового баланса выпаривания:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_k + Q_{п}$$

$$Q_1 = G_H \cdot c_H \cdot t_H$$

$$Q_2 = D \cdot I''$$

$$Q_3 = G_K \cdot c_K \cdot t_K$$

$$Q_4 = W \cdot I''$$

$$Q_5 = D \cdot i'$$

I'' - энтальпия греющего пара

D - расход конденсирующего пара

i' - энтальпия конденсата греющего пара

**Целью составления теплового баланса является определение затрат теплоты на проведение процесса*

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОТЕРИ

Температурные потери, возникающие в выпарном аппарате, снижают разность температур между греющим паром и выпариваемым раствором.

В общем случае температурные потери складываются из температурной депрессии (Δ'), гидростатической депрессии (Δ'').

Температурная депрессия Δ' равна разности между температурой кипения раствора и температурой кипения чистого растворителя при одинаковом давлении. Вызвана уменьшением упругости паров растворителя над раствором по сравнению с упругостью паров чистого растворителя

Гидростатическая депрессия Δ'' вызвана повышением температуры кипения раствора вследствие гидростатического давления столба жидкости в греющих трубках аппарата

Гидравлическая депрессия Δ''' вызвана понижением давления вторичного пара за счет гидравлических сопротивлений в паропроводах между корпусами многокорпусной выпарной установки

Температура кипения раствора с учетом температурных потерь, обусловленных температурной Δ' и гидростатической Δ'' депрессиями, составляет:

$$t_k = T' + \Delta' + \Delta''$$

T' — температура вторичного пара

