



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Основы расчета массообменных аппаратов

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

среда, 15 октября 2025 г.



РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ РАЗМЕРОВ

Основными конструктивными размерами аппаратов для проведения массообменных процессов являются:



поперечное сечение (определяет производительность аппарата, его пропускную способность)

рабочая длина или **высота** (отражает интенсивность и глубину протекания процесса)

Поперечное сечение массообменного аппарата определяют исходя из уравнения расхода. Ввиду того, что основная масса аппаратов имеет цилиндрическую форму и, соответственно, круглое поперечное сечение, то для них рассчитывают диаметр **D**:

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi w_0}}$$

где Q – объемный расход фазы при рабочих условиях (температуре, давлении) $\text{м}^3/\text{с}$

w_0 – фиктивная (отнесенная к полному рабочему сечению аппарата) рабочая скорость сплошной фазы, $\text{м}/\text{с}$

При расчетах аппаратов для взаимодействия в системах газ (пар) – жидкость и газ – твердое определяющими величинами при использовании уравнения являются объемный расход и скорость газовой фазы.

**Расчет высоты аппарата проводят по различным методикам. Во многом применение той или иной методики зависит от того, как в аппарате организовано взаимодействие фаз (ступенчато или непрерывно) и специфики процесса.*

РАСЧЕТ ВЫСОТЫ АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОСНОВНОГО УРАВНЕНИЯ МАССОПЕРЕДАЧИ



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Для расчета высоты контактной части массообменного аппарата H , необходимо связать требуемую расчетную площадь поверхности массопередачи F , с этой высотой. Для массообменного аппарата с постоянным по высоте поперечным сечением S , и непрерывным контактом фаз объем зоны контакта (контактной части) V , определяется по зависимости:

$$V = SH = \frac{F}{\sigma} \longrightarrow F = SH\sigma$$

Учтем, что

$$M = K_y F \Delta y_{cp}$$

σ – удельная поверхность контакта фаз, $\text{м}^2/\text{м}^3$

Высота контактной части массообменного аппарата со ступенчатым контактом фаз (тарельчатого аппарата) рассчитывается по формуле:

$$H = hN$$

h – высота ступени контакта фаз
 N – число ступеней контакта фаз

Поверхность контакта фаз на одной ступени обозначим F_{ct} , м^2 . Тогда общая поверхность контакта фаз в аппарате определяется по формуле:

$$F = NF_{ct}$$

$$M = K_y SH\sigma \Delta y_{cp}$$

$$H = \frac{M}{K_y S \sigma \Delta y_{cp}}$$

РАСЧЕТ ВЫСОТЫ АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОСНОВНОГО УРАВНЕНИЯ МАССОПЕРЕДАЧИ

Таким образом из рассмотренных уравнений следует, что высота контактной части массообменного аппарата со ступенчатым контактом фаз вычисляется по формуле:



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

$$H = \frac{Mh}{F_{cm} K_y \Delta y_{cp}}$$

Поверхность контакта фаз на одной ступени выражают следующим образом:

$$F_{cm} = Sh\sigma_0$$

$$F_{cm} = S\sigma_s$$

σ_0 – удельная поверхность контакта фаз, отнесенная к единице объема ступени контакта, $\text{м}^2/\text{м}^3$

σ_s – удельная поверхность контакта фаз, отнесенная к единице площади поперечного сечения ступени контакта, $\text{м}^2/\text{м}^2$

Таким образом зависимость приобретает вид:

$$H = \frac{M}{S\sigma_0 K_y \Delta y_{cp}}$$

$$H = \frac{Mh}{S\sigma_s K_y \Delta y_{cp}}$$

При использовании выше изложенной методики, как правило, большую сложность составляет определение удельной поверхности контакта фаз. Аналогично, можно провести расчеты и при применении уравнения массопередачи, записанного через состав жидкой фазы.

МОДИФИЦИРОВАННОЕ УРАВНЕНИЕ МАССОПЕРЕДАЧИ. ЕДИНИЦА ПЕРЕНОСА

Для многих массообменных аппаратов поверхность контакта фаз не фиксирована, подвижна, постоянно деформируется и размер её установить трудно.



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Подставив в основное уравнение массопередачи площадь поверхности контакта фаз, выраженную таким образом, и получим:

В то же время из уравнения материального баланса (при условии, что расход газовой фазы G меняется незначительно):

$$M = K_y S H \sigma \frac{y_H - y_K}{\int_{y_K}^{y_H} \frac{dy}{y - y^*}}$$

$$M = G(y_H - y_K)$$



$$G = K_y S H \sigma \frac{1}{\int_{y_K}^{y_H} \frac{dy}{y - y^*}}$$

$$H = \frac{G}{K_y S \sigma} \int_{y_K}^{y_H} \frac{dy}{y - y^*} = \frac{G}{K_y S \sigma} \cdot \frac{y_H - y_K}{\Delta y_{cp}} \leftarrow$$

ЧИСЛО ЕДИНИЦ ПЕРЕНОСА (ЧЕП). ВЫСОТА ЕДИНИЦЫ ПЕРЕНОСА (ВЕП)



Единица переноса – это участок аппарата, на котором концентрация распределяемого компонента в фазе изменяется на величину средней движущей силы в этой фазе.

Сомножитель в выражении является безразмерным и называется числом единиц переноса (**ЧЕП**) по газовой фазе.

$$\longrightarrow \frac{y_H - y_K}{\Delta y_{cp}} = n_{0y}$$

Сомножитель в этом же выражении имеет размерность длины (метр) и называется высотой единицы переноса (**ВЕП**) по газовой фазе.

$$\longrightarrow \frac{G}{K_y S \sigma} = h_{0y}$$

Высота контактной части аппарата через ЧЕП и ВЕП выражается:

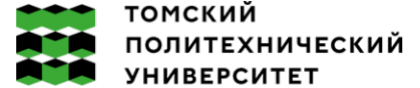
$$H = n_{0y} h_{0y}$$

Число единиц переноса можно также выразить следующим образом:

$$n_{0y} = \int_{y_K}^{y_H} \frac{dy}{y - y^*}$$

ЧИСЛО ЕДИНИЦ ПЕРЕНОСА (ЧЕП). ВЫСОТА ЕДИНИЦЫ ПЕРЕНОСА (ВЕП)

Выражения, подобные ранее рассмотренным зависимостям, могут быть получены при расчетах аппарата через расход жидкой фазы L и концентрации распределяемого компонента в ней:



$$H = \frac{L}{K_x S \sigma} \int_{x_H}^{x_K} \frac{dx}{x^* - x} = \frac{L}{K_x S \sigma} \cdot \frac{x_K - x_H}{\Delta x_{cp}} \quad n_{0x} = \int_{x_H}^{x_K} \frac{dx}{x^* - x} = \frac{x_K - x_H}{\Delta x_{cp}}$$
$$h_{0x} = \frac{L}{K_x S \sigma} \quad H = n_{0x} h_{0x}$$

n_{0x} – число единиц переноса по жидкой фазе h_{0x} – высота единицы переноса по жидкой фазе

Существует также понятия числа единиц переноса в фазе и высоты единицы переноса в фазе. Для установления сущности этих величин проводится совместный анализ уравнений материального баланса и массоотдачи, например:

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

ЧИСЛО ЕДИНИЦ ПЕРЕНОСА (ЧЕП). ВЫСОТА ЕДИНИЦЫ ПЕРЕНОСА (ВЕП)

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



Число единиц переноса в газовой фазе n_y :

$$n_y = \int_{y_k}^{y_n} \frac{dy}{y - y_{zp}} = \frac{\beta_y}{G} F$$

Число единиц переноса в жидкой фазе n_x :

$$n_x = \int_{x_n}^{x_k} \frac{dx}{x_{zp} - x} = \frac{\beta_x}{L} F$$

Из уравнения массопередачи ЧЕП по газовой фазе равно:

$$n_{0y} = \int_{y_k}^{y_n} \frac{dy}{y - y^*} = \frac{K_y}{G} F$$

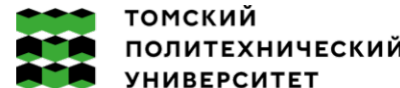
При использовании правила аддитивности фазовых сопротивлений получаем:

$$\frac{1}{n_{0y}} = \frac{1}{K_y} \cdot \frac{G}{F} = \left(\frac{1}{\beta_y} + \frac{m}{\beta_x} \right) \frac{G}{L}$$

ЧИСЛО ЕДИНИЦ ПЕРЕНОСА (ЧЕП). ВЫСОТА ЕДИНИЦЫ ПЕРЕНОСА (ВЕП)

После подстановки в зависимость вместо β_y и β_x их выражения через n_y и n_x , получим что:

$$\frac{1}{n_{0y}} = \frac{1}{n_y} + \frac{mG}{n_x L}$$



Введем параметр, называемый фактором массопередачи A :

$$A = \frac{L}{mG}$$

С учетом этого параметра уравнения взаимосвязи чисел единиц переноса по фазам с числами единиц переноса в фазах принимают вид:

$$\frac{1}{n_{0y}} = \frac{1}{n_y} + \frac{1}{n_x A}$$

$$\frac{1}{n_{0x}} = \frac{A}{n_y} + \frac{1}{n_x}$$

Выражения и в практических расчетах мало применяется из-за трудности определения граничных концентраций распределяемого вещества в фазах. С помощью этих выражений также можно установить:

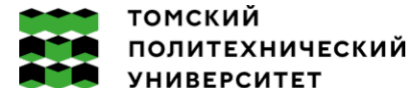
$$h_{0y} = h_y + \frac{h_x}{A}$$

$$h_{0x} = A h_y + h_x$$

h_y и h_x – высоты единиц переноса в газовой и жидкой фазах соответственно

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА АППАРАТОВ СО СТУПЕНЧАТЫМ (ДИСКРЕТНЫМ) КОНТАКТОМ ФАЗ

Аппараты со ступенчатым контактом фаз являются противоточными. Фазы в них последовательно взаимодействуют на контактных ступенях (тарелках).



После разделения одна из фаз следует для последующего взаимодействия на выше расположенную ступень, а вторая – на ниже расположенную. Для оценки глубины протекания массообмена между фазами на ступени контакта вводят понятие ее эффективности ее или КПД.

По фазам в таком случае эффективность ступени контакта E определяется по следующим формулам:

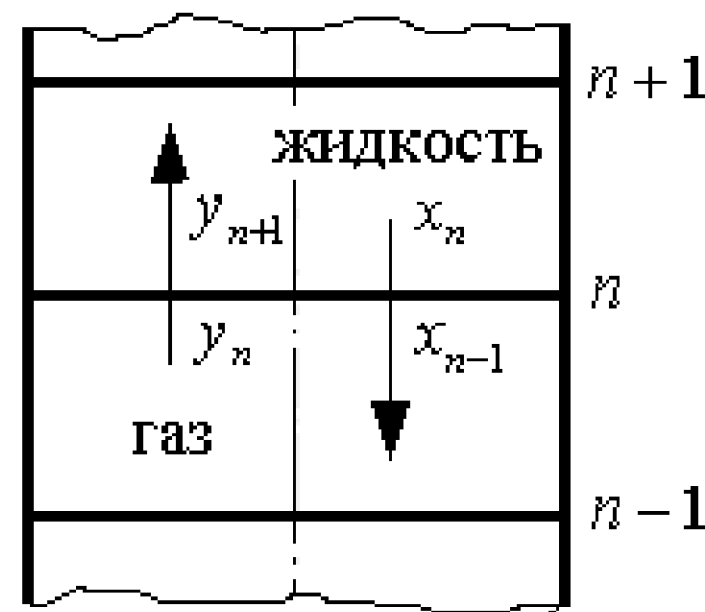
$$E_y = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n - y_n^*} \quad E_x = \frac{x_{n-1} - x_n}{x_n^* - x_n}$$

y_n и y_{n+1} – концентрация распределяемого компонента в газовой фазе на входе и на выходе из ступени контакта с номером n соответственно

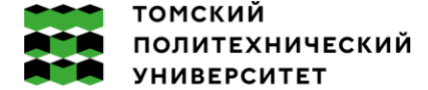
y_n^* – равновесная концентрация распределяемого компонента в газовой фазе на входе в ступень контакта с номером n .

где x_n и x_{n-1} – концентрация распределяемого компонента в жидкой фазе на входе и на выходе из ступени контакта с номером n соответственно

x_n^* – равновесная концентрация распределяемого компонента в газовой фазе на входе в ступень контакта с номером n



ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА АППАРАТОВ СО СТУПЕНЧАТЫМ (ДИСКРЕТНЫМ) КОНТАКТОМ ФАЗ



Эффективность ступени контакта фаз может быть использована для расчета числа действительных ступеней контакта в массообменном аппарате N . Для этого ее следует связать с коэффициентом извлечения (обогащения) φ для аппарата в целом. Этот коэффициент через концентрации в отдающей газовой фазе рассчитывается по формуле:

$$\varphi = \frac{y_H - y_K^*}{y_H - y_K}$$

где y_H и y_K – концентрация распределяемого компонента в газовой фазе на входе и на выходе из аппарата соответственно
 y_K^* – равновесная концентрация распределяемого компонента в газовой фазе на выходе ее из аппарата.

Для противоточного аппарата при условии, в соответствии с законом равновесия:

$$y_K^* = mx_H$$



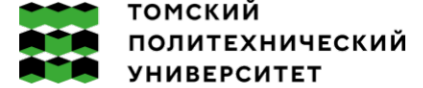
$$\varphi = \frac{y_H - y_K}{y_H - mx_H}$$

где m – коэффициент распределения вещества по фазам

x_H – концентрация распределяемого компонента в жидкой фазе на ее входе в аппарат.

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА АППАРАТОВ СО СТУПЕНЧАТЫМ (ДИСКРЕТНЫМ) КОНТАКТОМ ФАЗ

Анализируя концентрации распределяемого компонента на выходе из ступеней контакта, получим, что их число определяется по зависимости:

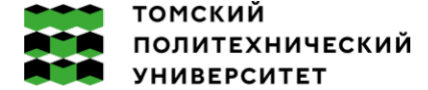


$$N = \frac{\log \frac{A(1-\varphi)}{A-\varphi}}{\log \left[1 - E_y \left(1 - \frac{1}{A} \right) \right]} \longrightarrow A = \frac{L}{mG} - \text{фактор массопередачи}$$

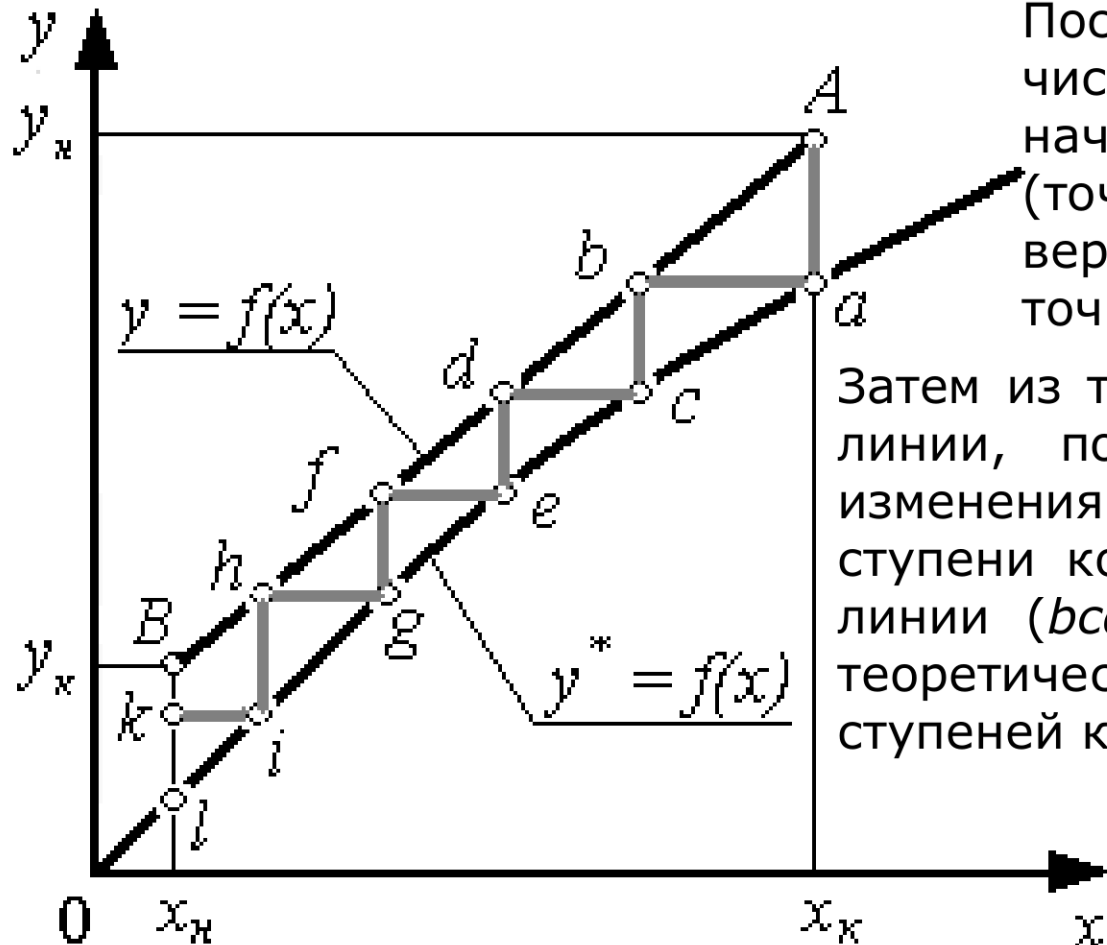
Для расчета числа ступеней контакта вводят также понятие теоретической ступени контакта фаз (теоретической тарелки). Теоретическая ступень контакта фаз – это гипотетический (воображаемый) участок аппарата, на выходе из которого фазы достигают равновесного состава и жидкость полностью перемешана. Поэтому можно считать, что эффективность теоретической тарелки $E_T=1$. Тогда при заданной степени извлечения φ число теоретических ступеней контакта в аппарате n равно:

$$N_m = \frac{\log \frac{A(1-\varphi)}{A-\varphi}}{m \cdot \log \frac{1}{A}}$$

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА АППАРАТОВ СО СТУПЕНЧАТЫМ (ДИСКРЕТНЫМ) КОНТАКТОМ ФАЗ



Число теоретических тарелок может быть определено графически при помощи $x - y$ - диаграммы. Для этого на диаграмме строят равновесную $y^* = f(x)$ и рабочую $y = f(x)$ линии. Любой вертикальный отрезок между рабочей и равновесной линиями отражает графически движущую силу по газовой фазе в каком-то из сечений аппарата, любой горизонтальный отрезок между рабочей и равновесной линиями – движущую силу по жидкой фазе.



Построения, необходимые для графического определения числа теоретических ступеней контакта, начинают с начальной концентрации по отдающей газовой фазе (точка A с координатами x_k и y_n). Из точки A проводим вертикальный отрезок до линии равновесия, получая точку **a** (x_k ; y_n^*).

Затем из точки **a** проводим горизонтальный отрезок до рабочей линии, получая точку **b**. Ломаная **Aab** отражает процесс изменения концентраций в обеих фазах на одной теоретической ступени контакта. Продолжая вписывать аналогичные ломаные линии (**bcd**, **def** и т.д.) до концентрации y_k , получаем число теоретических ступеней контакта N_T . Число действительных ступеней контакта рассчитывается по формуле:

где E – средняя эффективность ступени контакта

$$N = \frac{N_m}{E}$$