

## ЛЕКЦИЯ №9

### АБСОРБЦИЯ

**Минимальный и оптимальный расход поглотителя. Степень извлечения.**

**Направление процесса массопередачи.**

**Классификация массообменных процессов**

Материальный баланс процесса абсорбции описывается полученным ранее уравнением:

$$J_A = \dot{n}_G (Y_H - Y_K) = \dot{n}_L (X_K - X_H). \quad (9-1)$$

Обычно из уравнения материального баланса определяют общий расход абсорбента:

$$\dot{n}_L = \dot{n}_G \cdot \frac{Y_H - Y_K}{X_K - X_H}, \quad (9-2)$$

или его удельный расход:

$$l = \frac{\dot{n}_L}{\dot{n}_G} = \frac{Y_H - Y_K}{X_K - X_H}. \quad (9-3)$$

Уравнение (9-3) можно записать в виде:

$$Y = Y_H - l \cdot (X_K - X) \quad \text{или} \quad Y = Y_K - l \cdot (X - X_H), \quad (9-4)$$

где  $X$  – произвольное значение из интервала  $X_H - X_K$ .

При дальнейшем преобразовании получаем уравнение рабочей линии процесса абсорбции:

$$Y = a \cdot X + b, \quad (9-5)$$

где  $a = l = \frac{\dot{n}_L}{\dot{n}_G} = \frac{Y_H - Y_K}{X_K - X_H}$  – коэффициент наклона прямой,  $b = Y_K - l \cdot X_H = Y_H - l \cdot X_K$  –

отрезок, отсекаемый прямой на вертикальной оси координат.

Уравнение (9-5) определяет зависимость между составами газа и жидкости в произвольном сечении аппарата. Из этого уравнения видно, что рабочая линия представляет собой прямую с углом наклона, тангенс которого равен  $l = \frac{\dot{n}_L}{\dot{n}_G}$ .

### Минимальный и оптимальный расход поглотителя

Рассмотрим понятие о выборе удельного расхода абсорбента и размера аппарата для проведения процесса. Изобразим процесс абсорбции на  $X$ – $Y$  диаграмме (рис. 9-1). В данном случае заданными являются начальная  $Y_H$  и конечная  $Y_K$  концентрации газа, расход

инертного газа  $\dot{n}_G$  и начальная концентрация в жидкой фазе  $X_H$ . Таким образом переменными в уравнении (9-5) являются расход абсорбента  $\dot{n}_L$  и конечная концентрация в жидкой фазе  $X_K$ , от которых зависит положение рабочей линии. А от положения рабочей линии зависят движущая сила, и как следствие, размеры аппарата.

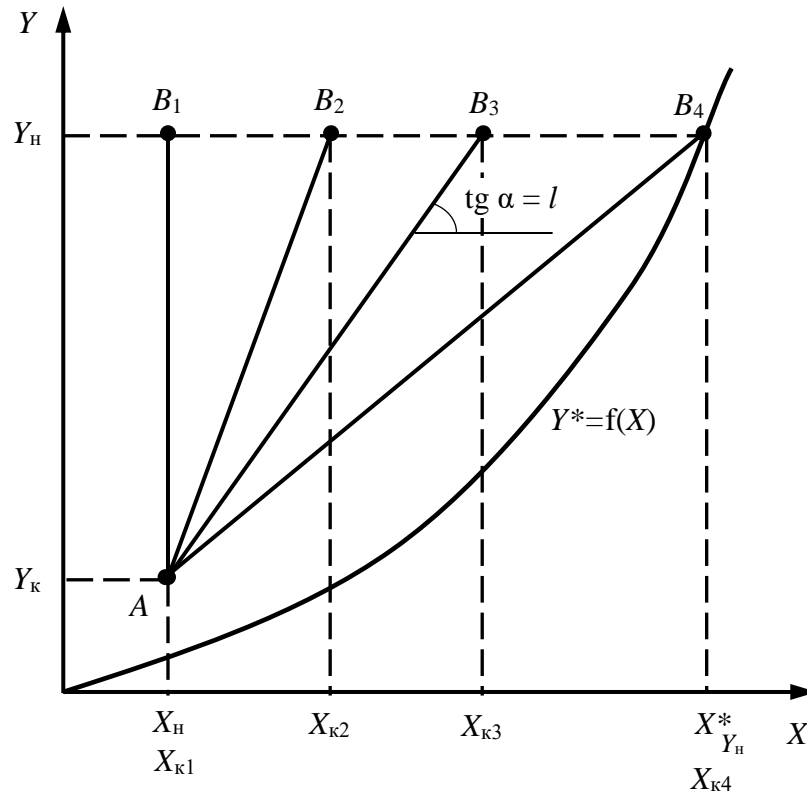


Рис. 9-1. Рабочие линии при различных расходах абсорбента

Через точку A с координатами  $X_K$  и  $Y_K$  в соответствии с уравнением (9-5) проведены рабочие линии  $AB_1, AB_2, AB_3, AB_4$ , отвечающие различным концентрациям  $X_K$  или разным удельным расходам абсорбента. Поскольку начальная концентрация газа задана, то точки  $B_1, B_2, B_3, B_4$  будут лежать на одной горизонтальной прямой.

Движущая сила процесса абсорбции для любого значения  $X$  и выбранной величины  $l$  будет выражаться разностью координат  $Y - Y^*$ . Средняя движущая сила будет рассчитываться по формуле:

$$\Delta Y_{\text{ср}} = \frac{\Delta Y_{\text{низ}} - \Delta Y_{\text{верх}}}{\ln \frac{\Delta Y_{\text{низ}}}{\Delta Y_{\text{верх}}}}, \quad (9-6)$$

где  $\Delta Y_{\text{низ}} = Y_H - Y^*_{X_K}$  — движущая сила в нижнем сечении абсорбера,  $\Delta Y_{\text{верх}} = Y_K - Y^*_{X_H}$  — движущая сила в верхнем сечении абсорбера.

Поскольку точка  $A$  с координатами  $X_n$  и  $Y_k$ , соответствующая верхнему сечению абсорбера фиксированная, и не меняет своего положения при разных  $l$ , то движущая сила для верхнего сечения постоянна, и средняя движущая сила изменяется в зависимости от движущей силы в нижнем сечении. Движущая сила для нижнего сечения, а, следовательно, и средняя движущая сила тем больше, чем круче наклон рабочей линии и (чем больше расход поглотителя). При совпадении рабочей линии с вертикалью (отрезок  $AB_1$ ) движущая сила будет иметь максимальное значение, а размеры аппарата будут минимальными. Удельный расход абсорбента при этом будет бесконечно большим, поскольку  $X_{k1} = X_n$ , и знаменатель в уравнении (9-3) будет равен 0.

Если же рабочая линия касается линии равновесия (отрезок  $AB_4$ ), то удельный расход абсорбента минимален  $l = l_{\min}$ , а движущая сила в точке касания рабочей и равновесной линий  $\Delta Y_{\text{низ}} = 0$ , поскольку в этой точке  $X_{k4} = X^*_{Y_n}$ , а  $Y^*_{X_{k4}} = Y_n$ . А следовательно, и средняя движущая сила для этого случая будет равна нулю, в итоге размеры аппарата будут бесконечно большие.

В технике в массообменных, в том числе и в абсорбционных, аппаратах равновесие между фазами не достигается и всегда  $X_k < X^*_{Y_n}$ . Поэтому величина удельного расхода абсорбента  $l$  всегда должна быть больше минимального значения  $l_{\min}$ , отвечающего предельному положению рабочей линии (отрезок  $AB_4$ ). Заменив  $X_k$  на  $X^*_{Y_n}$  в уравнении (9-3), получим выражение для определения минимального расхода абсорбента:

$$l_{\min} = \frac{\dot{n}_{L \min}}{\dot{n}_G} = \frac{Y_n - Y_k}{X^*_{Y_n} - X_n}. \quad (9-7)$$

Отметим, что увеличение удельного расхода абсорбента одновременно с уменьшением высоты абсорбера может привести к заметному увеличению его диаметра. Это происходит потому, что с увеличением расхода поглотителя растёт снижаются допустимые скорости газа в абсорбере, по которым находят его диаметр. Поэтому, если удельный расход абсорбента не задан (т.е. не задана конечная концентрация в жидкой фазе  $X_k$ ), следует выбирать такое соотношение между размерами абсорбера, затратами на его эксплуатацию и удельным расходом абсорбента, при котором величина удельного расхода будет оптимальной. Величину оптимального удельного расхода абсорбента находят с помощью технико-экономического расчёта.

### Максимальная степень извлечения

Ключевым показателем эффективности абсорбционного процесса является *степень извлечения* абсорбтива из газовой фазы (степень поглощения абсорбтива жидкой фазой):

$$\varphi = \frac{J_A}{\dot{n}_{A_H}} = \frac{Y_H - Y_K}{Y_H}, \quad (9-8)$$

где  $J_A$  – межфазный поток абсорбтива,  $\dot{n}_{A_H}$  – начальное количество абсорбтива в газовой фазе.

Рассмотрим понятие о выборе степени извлечения для проведения процесса абсорбции. Изобразим процесс абсорбции на  $X$ – $Y$  диаграмме (рис. 9-2). В данном случае заданными являются начальная концентрация газа  $Y_H$ , расход инертного газа  $\dot{n}_G$  и начальная концентрация в жидкой фазе  $X_H$  и удельных расход абсорбента  $l$ , определяющий угол наклона рабочей линии. Таким образом переменными в уравнении рабочей линии (9-5) являются конечная концентрация в газовой фазе  $Y_K$  (связанная со степенью извлечения) и конечная концентрация в жидкой фазе  $X_K$ , от которых зависит положение рабочей линии. А от положения рабочей линии зависят движущая сила, и как следствие, размеры аппарата.

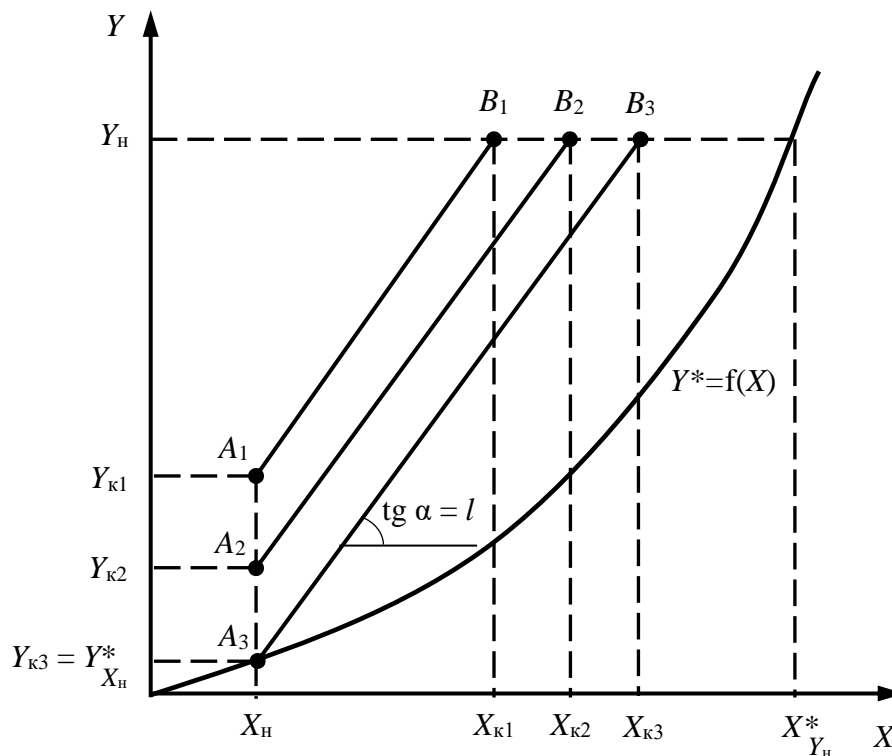


Рис. 9-2. Рабочие линии при разной степени извлечения

Поскольку удельный расход абсорбента  $l$  задан и является постоянным, то все рабочие линии на рис. 9-2 имеют одинаковый угол наклона, т.е. параллельны. Положение точки  $A$  с координатами  $X_H$  и  $Y_K$ , определяется степенью извлечения: чем больше степень извлечения, тем меньше конечное содержание абсорбтива в газовой фазе. Максимально возможная степень извлечения соответствует точке  $A_3$ , в которой рабочая линия

соприкасается с линией равновесия, при этом конечная концентрация в газовой фазе равна равновесной концентрации  $Y_K = Y^*_{X_n}$ . Тогда максимальная степень извлечения может быть найдена из уравнения (9-8) при замене конечной концентрации в газовой фазе на равновесную:

$$\Phi_{\max} = \frac{Y_n - Y^*_{X_n}}{Y_n}. \quad (9-9)$$

Движущая сила процесса абсорбции тем меньше, чем ближе рабочая линия к равновесной. Таким образом, наибольшая движущая сила будет наблюдаться для рабочей линии, представленной отрезком  $A_1B_1$ , для которого степень извлечения наименьшая. Для отрезка  $A_3B_3$ , показывающего предельное положение рабочей линии при максимальной степени извлечения, движущая сила будет равна нулю. Следовательно, чем больше степень извлечения, тем меньше движущая сила, и тем больше размеры абсорбционного аппарата. Оптимальное значение степени извлечения находят с помощью технико-экономического расчёта.

### Влияние условий на направление массопереноса

При взаимодействии газовой смеси с жидкостью возникает система, состоящая как минимум из трёх компонентов (распределяемое вещество и два распределяющих вещества) и двух фаз – жидкой и газовой. Такая система по правилу фаз имеет три степени свободы:  $C = K - \Phi + 2 = 3 - 2 + 2 = 3$ .

Для данного случая массообмена переменными являются температура, давление и концентрации распределяемого компонента в газовой и жидкой фазах. Следовательно, в состоянии равновесия при условии постоянства температуры и общего давления зависимость между концентрациями распределяемого компонента в газовой и жидкой фазах (или парциальным давлением газа и составом жидкости) будет однозначной. Эта зависимость выражается законом Генри: *парциальное давление растворённого газа пропорционально его мольной доле в растворе*:

$$p^*_A = E \cdot x_A, \quad (9-10)$$

или *растворимость газа в жидкости пропорциональна его парциальному давлению над жидкостью*:

$$x^*_A = \frac{p_A}{E}, \quad (9-11)$$

где  $E$  – константа Генри;  $p^*_A$  – парциальное давление поглощаемого газа, находящегося в равновесии с раствором, имеющим концентрацию  $x_A$ ;  $x^*_A$  – концентрация газа в растворе,

равновесная с газовой фазой, в которой парциальное давление поглощаемого компонента равно  $p_A$ .

Константа Генри  $E$  для данного газа не зависит от общего давления в системе, но зависит от природы абсорбента, природы поглощаемого газа и температуры. Зависимость константы Генри от температуры выражается следующим уравнением:

$$E = -\frac{q}{RT} + c, \quad (9-12)$$

где  $q$  – дифференциальная теплота растворения газа;  $c$  – постоянная, зависящая от природы газа и абсорбента.

Таким образом, с повышением температуры константа Генри увеличивается и растворимость газа в жидкости снижается. Изменяя температуру можно повлиять не только на скорость, но и направление протекания процесса, при достаточно высокой температуре процесс абсорбции изменится на обратный процесс – десорбцию.

При общем давлении  $p$  в системе и концентрации извлекаемого компонента в газовой фазе  $y_A$  парциальное давление этого компонента  $p_A$  по закону Дальтона:

$$p_A = p \cdot y_A. \quad (9-13)$$

С учётом уравнения (9-10) получим:

$$y_A^* = \frac{E}{p} \cdot x_A, \quad (9-14)$$

тогда закон Генри можно выразить следующим образом:

$$y_A^* = m \cdot x_A, \quad (9-15)$$

где  $m = \frac{E}{p}$  – коэффициент распределения или константа фазового распределения.

Из уравнения (9-15) следует, что зависимость между концентрациями распределяемого компонента в газовой смеси и в равновесной с ней жидкости выражается прямой линией (линия равновесия), проходящей через начало координат и имеющей угол наклона, тангенс которого равен константе фазового распределения  $m$ . Значение величины  $m$  уменьшается при снижении температуры и увеличении давления в системе. Поэтому растворимость газа в жидкости увеличивается с повышением давления и снижением температуры. Следовательно, для повышения эффективности абсорбции необходимо снизить температуру и повысить давление, а для регенерации абсорбента с помощью десорбции, наоборот, повысить температуру и снизить давление.

## **Принципы выбора абсорбентов**

Абсорбционные процессы, используемые в химической технологии, можно условно разделить на следующие группы:

- 1) хемосорбционные процессы, основанные на химическом взаимодействии абсорбтива с активной частью абсорбента;
- 2) процессы физической абсорбции, в которых извлечение абсорбтива происходит за счёт его растворимости в абсорбенте;
- 3) комбинированные процессы, использующие одновременно химические и физические поглотители.

Выбор того или иного процесса абсорбции определяется экономикой и зависит от многих факторов, основными из которых являются: состав и параметры сырья, требуемая степень очистки и область использования очищенного газа, наличие и параметры энергоресурсов, способы переработки или утилизации отходов.

Основным преимуществом хемосорбционных процессов является высокая и надёжная степень очистки газа независимо от парциального давления извлекаемых компонентов, а также низкая абсорбция инертных компонентов сырьевого газа. Основной недостаток хемосорбентов заключается в частичной или полной необратимости процесса хемосорбции, не позволяющей эффективно регенерировать абсорбент. Также процесс хемосорбции часто экзотермичен, поэтому при его проведении часто требуется осуществлять отвод тепла, что влечёт усложнение оборудования.

При физической абсорбции извлечение абсорбтива происходит за счёт физического растворения его в применяемом абсорбенте. Растворению способствует повышение давления в абсорбере и понижение температуры, поэтому процесс физической абсорбции проводят при значительных давлениях (достигающих часто нескольких десятков атмосфер). Это существенно увеличивает энергозатраты на проведение процесса очистки. Однако лёгкость регенерации физических абсорбентов в значительной мере компенсирует повышенные энергозатраты на стадии абсорбции. Процесс физической абсорбции обычно имеет незначительный экзотермический эффект, а, следовательно, отвода тепла не требуется. Существенным недостатком физических абсорбентов является их способность частично растворять инертные компоненты газовой смеси, удаление которых не требуется.

### **Общие принципы устройства и классификации массообменных аппаратов**

Разделение гомогенных систем осуществляют путём перехода одного из компонентов разделяемой системы в другую фазу. Контактующие фазы взаимно нерастворимы и образуют поверхность раздела фаз. Процесс перехода вещества (или

нескольких веществ) из одной фазы в другую в направлении достижения равновесия называют массопередачей. В отличие от теплопередачи, которая обычно осуществляется через стенку, массопередача проходит при непосредственном соприкосновении фаз. Исключение составляют мембранные процессы, где массопередача осуществляется через мембрану – перегородку, обладающую избирательной проницаемостью.

Производительность массообменных аппаратов по разделяемым веществам определяется в первую очередь площадью поверхности контакта фаз. В процессах с подвижной поверхностью контакта фаз, к которым относятся процессы в двухфазных системах газ-жидкость, площадь поверхности контакта фаз можно увеличить путём механического воздействия на фазы. Для этой цели используют контактные устройства, в которых происходит диспергирование (дробление) одной из фаз, приводящее к увеличению поверхности массопередачи. Классификация массообменных аппаратов по типу контактных устройств представлена на рис. 9-3. Массообменные аппараты, применяемые в процессах с подвижной поверхностью контакта фаз, в большинстве случаев представляют собой цилиндрические колонны.

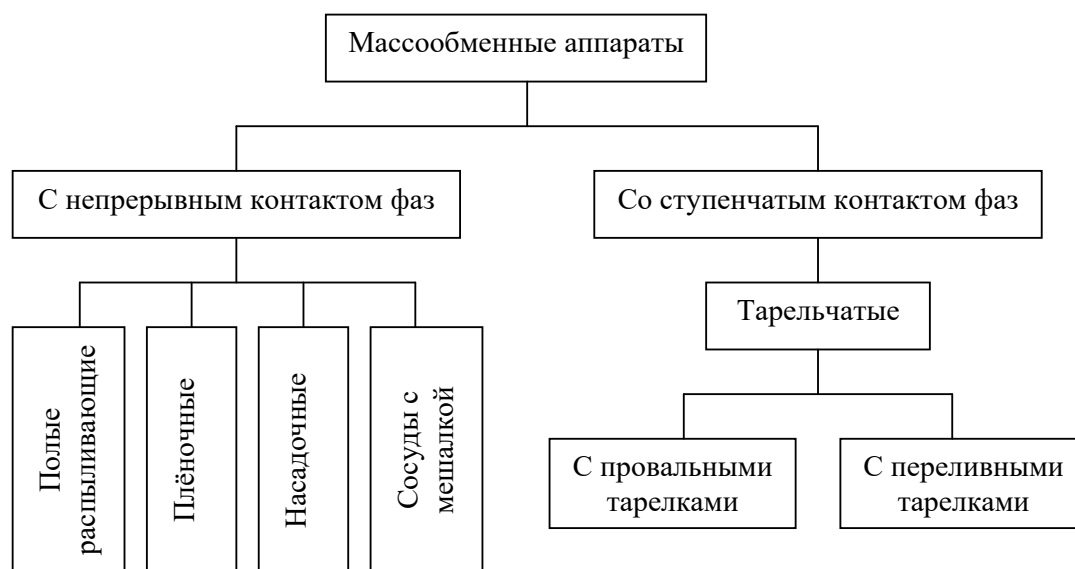


Рис. 9-3. Классификация массообменных аппаратов по типу и способу контакта фаз

Ключевыми факторами, определяющими выбор массообменного аппарата, являются: производительность, площадь поверхности контакта фаз, гидравлическое сопротивление, соотношение расходов фаз, возможность отвода тепла. С точки зрения производительности и поверхности контакта фаз наиболее эффективными являются тарельчатые аппараты с переливными тарелками; им несколько уступают по площади поверхности контакта фаз тарельчатые аппараты с провальными тарелками. На третьем месте по поверхности контакта фаз и производительности стоят насадочные аппараты.



При выборе аппаратов для проведения процесса абсорбции важным фактором, определяющим экономическую рентабельность процесса, является гидравлическое сопротивление аппарата по газовой фазе, что связано с энергозатратами на работу компрессоров, осуществляющих прокачку газа через аппарат. Поэтому предпочтение обычно отдают насадочным абсорберам, обеспечивающим хорошую поверхность контакта фаз при невысоком гидравлическом сопротивлении. Однако диаметр насадочных аппаратов не может быть большим, что вызвано сложностью с организацией равномерного орошения насадки. Как следствие, производительность насадочных аппаратов недостаточно велика. Кроме того, насадочные аппараты требуют достаточно хорошего орошения, т.е. соотношение расходов жидкой и газовой фаз в них так же регламентировано. Также в насадочных аппаратах нет возможности эффективно отводить тепло, что необходимо, когда абсорбция имеет ощутимый экзотермический эффект. В том случае, если по какой-то из перечисленных причин невозможно применение насадочного аппарата, выбирают тарельчатый аппарат с провальными тарелками. Полые распиливающие и плёночные аппараты применяют в тех редких случаях, когда не требуется высокая степень очистки или невелики расходы.