

ЛЕКЦИЯ 1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ. СПОСОБЫ ВЫРАЖЕНИЯ СОСТАВОВ ФАЗ. РАВНОВЕСНЫЕ УСЛОВИЯ И НАПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕНОСА. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС И УРАВНЕНИЯ РАБОЧИХ ЛИНИЙ

Целью проведения процессов разделения гомогенных систем является либо получение целевых продуктов в чистом виде, либо очистка различных веществ от примесей.

Классификация процессов массообмена

Применяются в основном следующие процессы массопередачи: между газовой (паровой) и жидкой, между газовой и твердой, между твердой и жидкой, а также между двумя жидкими фазами:

1. Процессы с непосредственным соприкосновением взаимодействующих фаз:

А. Массообменные процессы с подвижной свободной границей раздела фаз:

Абсорбция – избирательное поглощение газов (паров) жидким поглотителем (абсорбентом). Характеризуется переходом вещества из газовой фазы в жидкую. Обратный процесс выделения газа из жидкости называется десорбцией.

Перегонка и ректификация – разделение жидких однородных смесей путем обмена компонентами между кипящей жидкостью и паром над ней.

Экстракция (в системе жидкость – жидкость) – извлечение компонента, растворенного в жидкости другой жидкостью, которая не смешивается (или частично смешивается) с первой.

Б. Массообменные процессы с неподвижной границей раздела фаз (как правило, это процессы с участием твердой фазы):

Адсорбция – избирательное поглощение паров, газов или жидкостей из их смесей твердым поглотителем (адсорбентом). Обратный процесс – десорбция.

Твердофазная экстракция (выщелачивание) – выделение компонента из твердого тела жидкостью.

Растворение – переход твердой фазы в жидкую (растворитель). Обратный процесс – кристаллизация – выделение твердой фазы в виде кристаллов или расплавов.

Сушка – удаление влаги из твердых материалов, главным образом, путем ее испарения.

2. Мембранные процессы разделения –

Массообменные процессы, в которых фазы не соприкасаются, а разделены полунепроницаемыми перегородками (мембранами), которые способны пропускать одни компоненты и задерживать другие.

Общим для всех процессов является перенос вещества (компонента) внутри одной фазы к границе раздела, через границу раздела и перенос вещества внутри другой фазы. Этот многоступенчатый процесс называется массопередачей. Перенос вещества внутри фазы к границе раздела или от границы раздела называют массоотдачей.

Обозначения

В массообменных процессах принято обозначать:

Φ_y – газовая (паровая) фаза; Φ_x - жидкая фаза;

G , L – расходы газовой и жидкой фазы соответственно в $\left[\frac{\text{кмоль}}{\text{с}} \right]$ или $\left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right]$.

J - поток компонента из фазы в фазу в $\left[\frac{\text{кмоль}}{\text{с}} \right]$ или $\left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right]$.

Примем, что происходит массоперенос из фазы в фазу только одного из компонентов. Тогда каждую из взаимодействующих фаз можно считать бинарным раствором, состоящим из распределяемого (переносимого из одной фазы в другую) и инертного компонентов (все остальные компоненты данной фазы).

Например, при абсорбции аммиака из воздуха водой газовая фаза G состоит из аммиака (распределяемого компонента) и воздуха (смесь газов – инертный компонент), а жидкая L – из воды и аммиака. В этом случае, для определения состава фазы достаточно указать концентрацию распределяемого компонента в фазе, которая может быть выражена:

В мольных (молярных) долях, представляющих собой отношение количества данного компонента к количеству всей фазы:

y - в газовой фазе $\left[\frac{\text{кмоль компонента}}{\text{кмоль фазы } G} \right]$, x - в жидкой $\left[\frac{\text{кмоль компонента}}{\text{кмоль фазы } L} \right]$;

В массовых долях представляющих собой отношение массы данного компонента к массе всей фазы:

\bar{y} - в газовой фазе $\left[\frac{\text{кг компонента}}{\text{кг фазы } G} \right]$, \bar{x} - в жидкой $\left[\frac{\text{кг компонента}}{\text{кг фазы } L} \right]$

Для рассматриваемой в качестве примера системы аммиак – воздух-вода:

$$y \left[\frac{\text{кмоль аммиака}}{\text{кмоль (аммиак + воздух)}} \right], x \left[\frac{\text{кмоль аммиака}}{\text{кмоль (аммиак + вода)}} \right];$$

$$\bar{y} \left[\frac{\text{кг аммиака}}{\text{кг (аммиак + воздух)}} \right], \bar{x} \left[\frac{\text{кг аммиака}}{\text{кг (аммиак + вода)}} \right]$$

В ряде процессов (абсорбция, экстракция) фазы не участвуют в процессе массообмена, а являются только инертными носителями, их количества не меняются в процессе. Поэтому концентрацию распределяемого компонента удобно выражать в относительных единицах:

Мольных

$$Y - \text{в газовой фазе} \left[\frac{\text{кмоль компонента}}{\text{кмоль носителя}} \right], X - \text{в жидкой} \left[\frac{\text{кмоль компонента}}{\text{кмоль носителя}} \right]$$

Массовых

$$\bar{Y} - \text{в газовой фазе} \left[\frac{\text{кг компонента}}{\text{кг носителя}} \right], \bar{X} - \text{в жидкой} \left[\frac{\text{кг компонента}}{\text{кг носителя}} \right]$$

Для рассматриваемой в качестве примера системы аммиак – воздух-вода:

$$Y \left[\frac{\text{кмоль аммиака}}{\text{кмоль воздуха}} \right], X \left[\frac{\text{кмоль аммиака}}{\text{кмоль воды}} \right];$$

$$\bar{Y} \left[\frac{\text{кг аммиака}}{\text{кг воздуха}} \right], \bar{X} \left[\frac{\text{кг аммиака}}{\text{кг воды}} \right]$$

Если используются мольные доли, то расходы фаз будут иметь размерность:

$$- \text{газовой (паровой) фазы} - G \left[\frac{\text{кмоль смеси}}{c} \right], \left[\frac{\text{кмоль смеси}}{ч} \right]$$

$$- \text{жидкой фазы} - L \left[\frac{\text{кмоль смеси}}{c} \right], \left[\frac{\text{кмоль смеси}}{ч} \right]$$

Для рассматриваемого примера:

$$- \text{Расход газовой (паровой) фазы} G \left[\frac{\text{кмоль (аммиак + воздух)}}{c} \right];$$

$$\left[\frac{\text{кмоль (аммиак + воздух)}}{ч} \right]$$

$$- \text{Расход жидкой фазы} -L \left[\frac{\text{кмоль (аммиак + вода)}}{c} \right]; \left[\frac{\text{кмоль (аммиак + вода)}}{ч} \right]$$

Если составы фаз задаются в массовых долях, то расходы будут массовыми.

- газовой (паровой) фазы $G \left[\frac{\text{кг смеси}}{c} \right], \left[\frac{\text{кг смеси}}{ч} \right]$

- жидкой фазы $L \left[\frac{\text{кг смеси}}{c} \right], \left[\frac{\text{кг смеси}}{ч} \right]$

Для рассматриваемого примера:

- Расход газовой (паровой) фазы $G \left[\frac{\text{кг (аммиак + воздух)}}{c} \right];$
 $\left[\frac{\text{кг (аммиак + воздух)}}{ч} \right]$

- Расход жидкой фазы $-L \left[\frac{\text{кг (аммиак + вода)}}{c} \right]; \left[\frac{\text{кг (аммиак + вода)}}{ч} \right]$

Если используются относительные мольные единицы, то расходы фаз будут иметь размерность:

-газовой (паровой) фазы G

$$\left[\frac{\text{кмоль носителя фазы } G}{c} \right]; \left[\frac{\text{кмоль носителя фазы } G}{ч} \right]$$

- жидкой фазы L

$$\left[\frac{\text{кмоль носителя фазы } L}{c} \right]; \left[\frac{\text{кмоль носителя фазы } L}{ч} \right]$$

Для рассматриваемого примера:

- Расход газовой (паровой) фазы $G \left[\frac{\text{кмоль воздуха}}{c} \right]; \left[\frac{\text{кмоль воздуха}}{ч} \right]$

- Расход жидкой фазы $-L \left[\frac{\text{кмоль воды}}{c} \right]; \left[\frac{\text{кмоль воды}}{ч} \right]$

Если используются относительные массовые единицы, то расходы фаз будут иметь размерность:

-газовой (паровой) фазы G

$$\left[\frac{\text{кг носителя фазы } G}{c} \right]; \left[\frac{\text{кг носителя фазы } G}{ч} \right]$$

- жидкой фазы L

$$\left[\frac{\text{кг носителя фазы } L}{c} \right]; \left[\frac{\text{кг носителя фазы } L}{ч} \right]$$

Для рассматриваемого примера:

- Расход газовой (паровой) фазы $G \left[\frac{\text{кг воздуха}}{c} \right]; \left[\frac{\text{кг воздуха}}{ч} \right]$
- Расход жидкой фазы $-L \left[\frac{\text{кг воды}}{c} \right]; \left[\frac{\text{кг воды}}{ч} \right]$

Направление переноса

Процессы переноса являются обратимыми. Направление переноса зависит от:

- концентрации растворенного вещества в фазах;
- условий проведения процесса (температура, давление).

Определяется направление переноса законами равновесия. Условия равновесия определяются правилом фаз (законом равновесия фаз):

$$\Phi + C = K + n$$

Где: Φ – число фаз, C – число степеней свободы, число независимых переменных, которые можно произвольно (в известных пределах) менять, не изменяя числа и вида фаз (температура, давление, концентрация); K – число компонентов в системе; n – число внешних факторов, влияющих на равновесие системы. Для процессов массопередачи число внешних факторов равно 2. Это давление и температура.

На примере абсорбции:

$\Phi=2$ (две фазы: газ и жидкость); $K=3$ (три компонента: распределяемый компонент и фазы-носители – газовая и жидкая). При этом $C=3$ (температура, давление, концентрация).

Процессы абсорбции ведут при $P, T = \text{const}$, поэтому в состоянии равновесия концентрации компонента в одной фазе соответствует строго определенная концентрация в другой фазе: $y^* = f(x)$ или $x^* = f(y)$

Равновесные зависимости определяют экспериментально или из справочной литературы. Часто их представляют в графическом виде на диаграммах $y-x$:

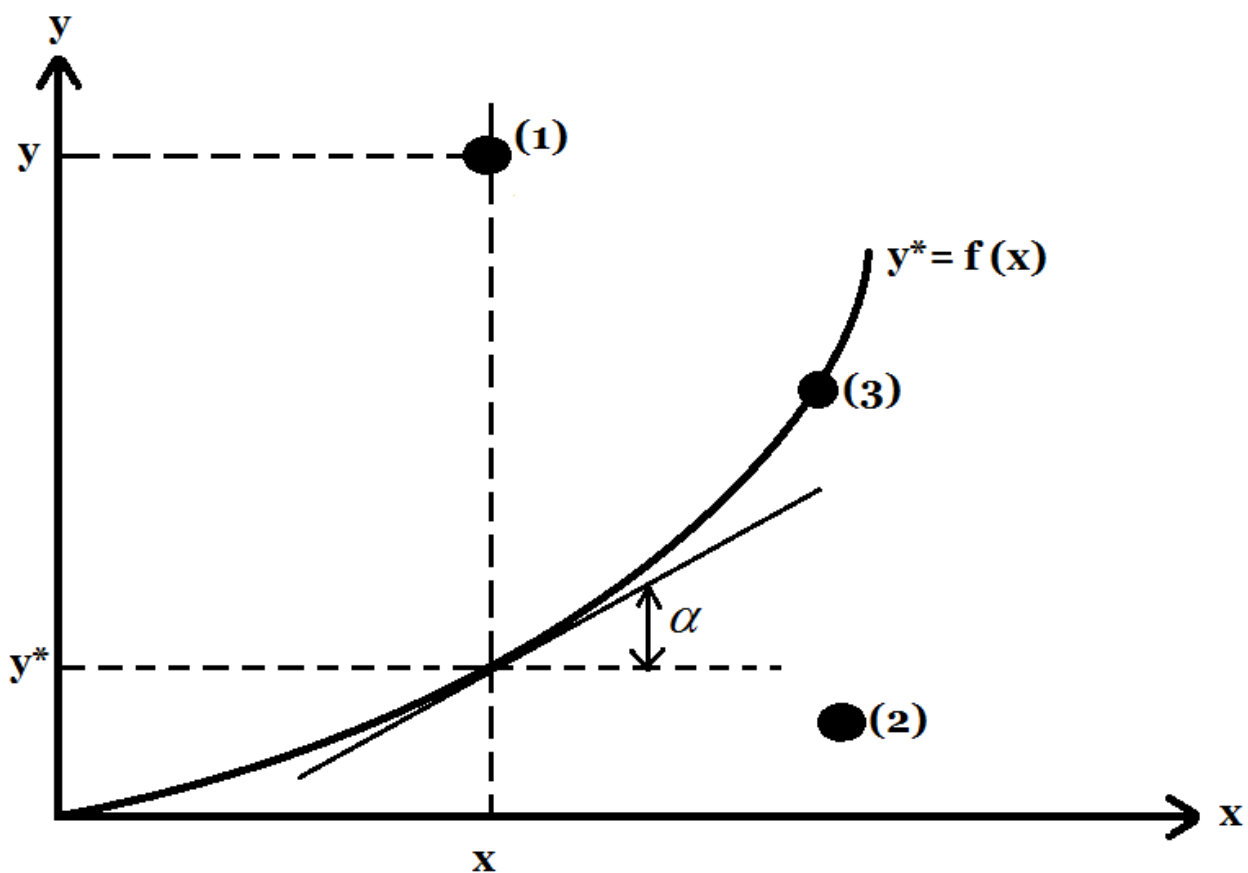


Рис.1.1 Равновесная зависимость $y^* = f(x)$ на диаграмме $y-x$ на примере абсорбции. 1, 2, 3 – возможные положения рабочей точки. $tg\alpha$ – коэффициент распределения.

Отношение составов фаз при равновесии называют коэффициентом распределения $m = y^* / x = tg\alpha$. Коэффициент распределения имеет размерность, которая зависит от размерностей концентраций газовой и жидкой фаз. Так, если они выражены абсолютных

$$\text{мольных долях, то } m = \left[\frac{\text{кмоль компонента}}{\text{кмоль фазы } G} / \frac{\text{кмоль компонента}}{\text{кмоль фазы } L} \right] = \left[\frac{\text{кмоль фазы } L}{\text{кмоль фазы } G} \right]$$

Анализируя диаграмму равновесия (см. рис.1.1) можно выделить три возможных случая направления переноса вещества:

1. Рабочая концентрация в газовой фазе выше равновесной $y > y^*$, в жидкой - меньше равновесной $x < x^*$. Распределяемый компонент будет переходить из газовой фазы в жидкую, что соответствует процессу абсорбции.

2. Рабочая концентрация в газовой фазе ниже равновесной $y^* > y$, в жидкой - выше равновесной $x^* < x$. Распределяемый компонент будет переходить из жидкой фазы в газовую, что соответствует процессу десорбции.

3. Рабочая точка находится на линии равновесия: $y^* = y$; $x^* = x$. Это говорит о том, что система находится в состоянии динамического равновесия, переноса не происходит.

Разность между рабочей и равновесной концентрациями называют движущей силой процесса массопередачи. Движущую силу можно выражать через концентрации любой из фаз. Для случая абсорбции:

$$\begin{aligned}\Delta y &= y - y^* \\ \Delta x &= x^* - x\end{aligned}\tag{1.1}$$

Чем больше движущая сила, тем выше скорость процесса массопередачи. Уравнения (1.1) характеризуют движущую силу в любой точке аппарата. По высоте аппарата концентрация вещества меняется и, следовательно, меняется равновесная концентрация, и таким образом, изменяется и движущая сила. Поэтому для расчета движущей силы по всему аппарату ее усредняют. Чтобы это сделать, необходимо, кроме равновесной, иметь и зависимость между рабочими концентрациями, которую отражает уравнение рабочей линии. Получают это уравнение на основании материального баланса процесса.

Материальные балансы

Применяемые для массообмена в системах газ (пар) – жидкость [Г(П)–Ж], и жидкость-жидкость [Ж–Ж] аппараты принято подразделять на две группы: с **непрерывным** и со **ступенчатым контактом фаз**. Принципиальные схемы аппаратов обоих типов показаны на рис. 1.2:

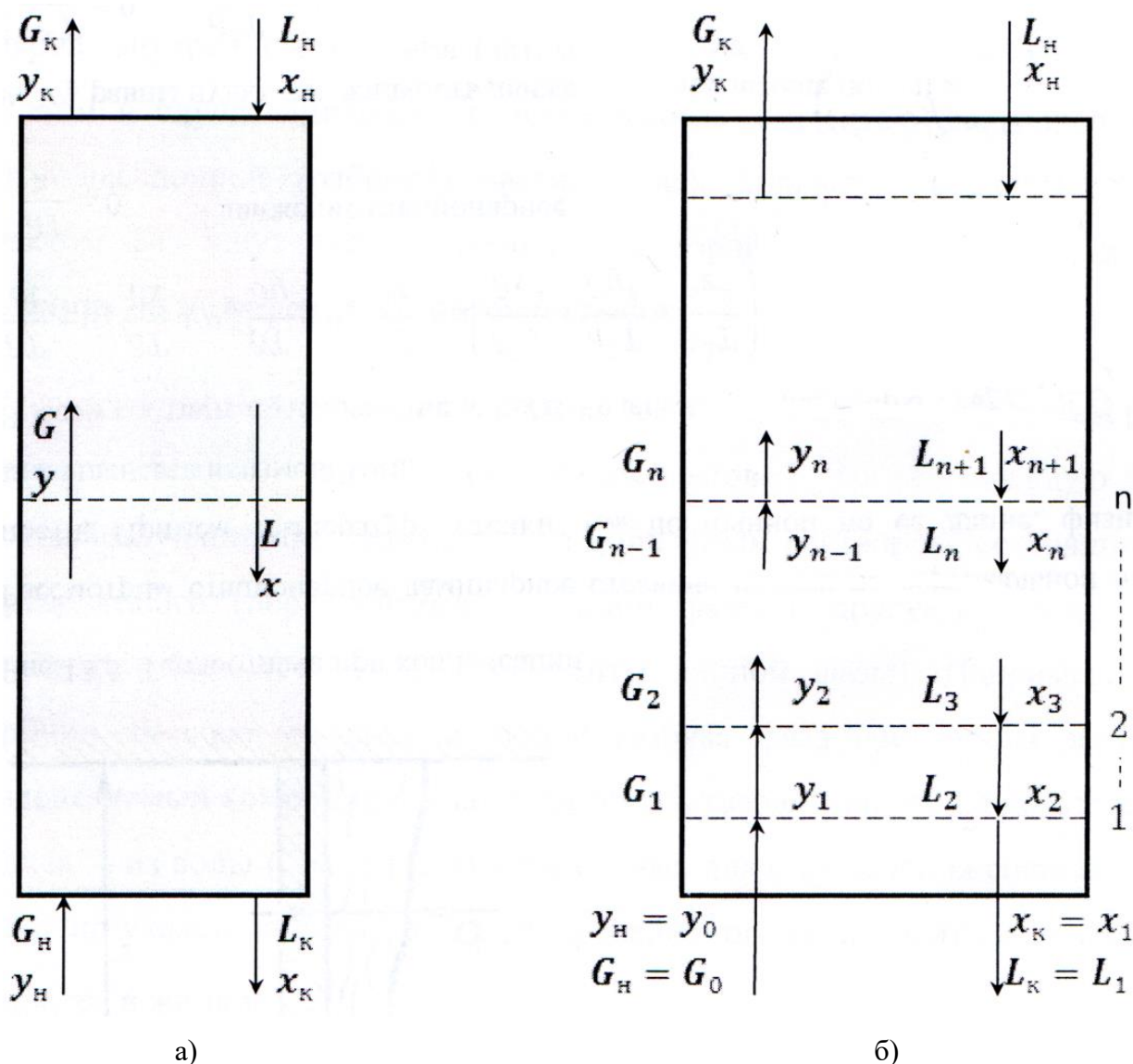


Рис. 1.2 Принципиальные схемы противоточных колонных аппаратов:
а – с непрерывным контактом фаз;
б – со ступенчатым.

К аппаратам с непрерывным контактом фаз относятся насадочные, барботажные, распылительные колонны. К аппаратам со ступенчатым контактом фаз относят тарельчатые колонны. В обоих случаях назначение насадки или тарельчатых устройств состоит в развитии поверхности контакта взаимодействующих фаз.

В качестве исходных данных при расчете, например, абсорбционных аппаратов обычно заданы начальный состав и расход исходной смеси (G_H, y_H) и конечная концентрация извлекаемого компонента (y_K) а также характеристики абсорбента (L_H, x_H)

Материальный баланс непрерывного процесса абсорбции в установившихся условиях может быть представлен для всего аппарата следующей системой уравнений:

$$G_n y_n + L_n x_n - G_k y_k - L_k x_k = 0 \quad (1.2)$$

$$G_n (1 - y_n) - G_k (1 - y_k) = 0 \quad (1.3)$$

$$L_n (1 - x_n) - L_k (1 - x_k) = 0 \quad (1.4)$$

$$G_n + L_n - G_k - L_k = 0 \quad (1.5)$$

В этих уравнениях концентрации распределяемого компонента выражены в мольных (молярных) долях, расходы фаз-мольные (кмоль смеси/с). Если составы фаз задаются в массовых долях, то расходы будут массовыми (кг смеси/с). При этом первое уравнение – материальный баланс, составленный по распределяемому компоненту, второе и третье выражения – материальные балансы по инертным компонентам, четвертое уравнение – материальный баланс для смесей.

Материальные балансы для абсорбции упрощаются при выражении составов фаз в относительных концентрациях (кг распределяемого компонента/кг инертного компонента или кмоль распределяемого компонента/кмоль инертного компонента). Расходы газа и жидкости выражаются в этом случае через количества носителей (инертного газа и поглотителя), которые в процессе абсорбции не меняются (если поглотитель нелетуч). Тогда материальный баланс по распределяемому компоненту приобретает вид:

$$G_{ин} (Y_n - Y_k) = L_{ин} (X_n - X_k) = J \quad (1.6)$$

где: $G_{ин} = G_n (1 - y_n) = G_k (1 - y_k) = G (1 - y)$

$$L_{ин} = L_n (1 - x_n) = L_k (1 - x_k) = L (1 - x)$$

$$Y = \frac{y}{1-y}; X = \frac{x}{1-x}$$

x, y – средние концентрации в произвольном сечении;

J – полный массовый или мольный поток распределяемого компонента, переносимого из одной фазы в другую.

Кроме уравнений (1.2-1.6), выражающих материальный баланс для всего аппарата, можно составить подобные выражения, описывающие работу части массообменного аппарата или отдельных его ступеней.

Материальные балансы такого рода, представляющие собой зависимости между средними составами взаимодействующих фаз в каком-либо сечении аппарата, называют **уравнениями рабочих линий**.

В зависимости от способа выражения состава фаз рабочие линии могут быть описаны следующими уравнениями:

$$y = \frac{L}{G}x + \frac{G_n y_n}{G} - \frac{L_k x_k}{G} = \frac{L}{G}x + \frac{G_k y_k}{G} - \frac{L_n}{G}x_n \quad (1.7)$$

$$Y = \frac{L_{ин}}{G_{ин}}X + Y_n - \frac{L_{ин}}{G_{ин}}X_k = \frac{L_{ин}}{G_{ин}}X + Y_k - \frac{L_{ин}}{G_{ин}}X_n \quad (1.8)$$

При выражении составов фаз в относительных концентрациях (X, Y) уравнения рабочих линий являются прямыми. При использовании других концентраций, эти уравнения линейны только в случае малого расхода фаз или малых концентраций распределяемого компонента. Построение рабочей линии как прямой в соответствии с уравнением (1.7) допустимо лишь при содержании компонента в газовой и жидкой фазах ниже 5-10%, когда относительные концентрации могут быть с достаточной точностью приравнены к мольным долям.

При существенном изменении расхода фаз уравнение (1.7) должно быть дополнено балансовыми соотношениями для инертных компонентов, которые позволяют находить расходы фаз в любом сечении аппарата.

$$G(1-y) = G_n(1-y_n) = G_k(1-y_k) \quad (1.9)$$

$$L(1-x) = L_n(1-x_n) = L_k(1-x_k) \quad (1.10)$$

$$G-L = G_k - L_n = G_n - L_k \quad (1.11)$$

Для противоточных аппаратов со ступенчатым контактом фаз (рис. 1б) уравнения рабочих линий связывают концентрацию распределяемого компонента в фазе, выходящей из какой-либо ступени, например n -ной с его концентрацией в другой фазе, поступающей на ту же ступень – $y_n(x_{n+1})$ (см. рис. 1б) или $Y_n(X_{n+1})$:

$$y_n = \frac{L_{n+1}}{G_n}x_{n+1} + \frac{G_n y_n}{G_n} - \frac{L_k x_k}{G_n} = \frac{L_{n+1}}{G_n}x_{n+1} + \frac{G_k y_k}{G_n} - \frac{L_n}{G_n}x_n \quad (1.12)$$

$$Y_n = \frac{L_{ин}}{G_{ин}}X_{n+1} + Y_n - \frac{L_{ин}}{G_{ин}}X_k = \frac{L_{ин}}{G_{ин}}X_{n+1} + Y_k - \frac{L_{ин}}{G_{ин}}X_n \quad (1.13)$$

Следует отметить, что выражения (1.12) и (1.13) справедливы в отсутствие взаимного уноса фаз. При этом структура потоков внутри ступени может быть произвольной.

Как и для аппаратов с непрерывным контактом, если расходы фаз меняются по высоте аппарата – т.е. зависят от номера ступени, уравнение (1.12) не линейно и должно быть дополнено балансовыми соотношениями для инертных компонентов:

$$G_n(1 - y_n) = G_n(1 - y_n) = G_k(1 - y_k) \quad (1.14)$$

$$L_{n+1}(1 - x_{n+1}) = L_n(1 - x_n) = L_k(1 - x_k) \quad (1.15)$$

$$G_n - L_{n+1} = G_k - L_n = G_n - L_k \quad (1.16)$$