

## Лекция 12

### НЕПРЕРЫВНАЯ РЕКТИФИКАЦИЯ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ

Ректификация – процесс разделения жидкой гомогенной смеси летучих веществ, осуществляемый путём испарения части разделяемой жидкой смеси и последующей конденсации образующегося пара, с организацией массообмена между движущимися противотоком потоками жидкости и пара.

Ректификацию проводят в ректификационной колонне, представляющей собой цилиндрическую колонну, заполненную контактными устройствами в виде насадок (насадочная колонна) или барботажных тарелок (тарельчатая колонна). Контактные устройства обеспечивают эффективный массообмен между жидкой и паровой фазами.

Для непрерывной ректификации необходимо организовать нисходящий поток жидкости и восходящий поток пара. Исходная смесь подается в то место колонны, которое называется тарелкой питания (питающей тарелкой), которая присутствует как в тарельчатой, так и в насадочной колонне. Эта тарелка делит колонну на две части – верхнюю укрепляющую и нижнюю – исчерпывающую. В укрепляющей – обогащение поднимающихся паров низкокипящего компонента (НК). В исчерпывающей – удаление или исчерпывание НК. Точка ввода исходной смеси относится к нижней части ректификационной колонны.

Исходная смесь с расходом  $F$  поступает на тарелку питания колонны (Рис.12.1) при температуре обычно равной температуре кипения, для того, чтобы снизить тепловую нагрузку на колонну. В ректификационной колонне происходит взаимодействие между стекающей сверху жидкостью и восходящим потоком пара. На элементе насадки или на тарелке перегретый по сравнению с жидкостью пар частично конденсируется, причем в жидкость переходит преимущественно ВК, содержание которого в поступающем паре выше равновесного с составом жидкости на контактной поверхности. При конденсации пара выделяется тепло, которое приводит к кипению жидкости и частичному испарению, причем в пар переходит преимущественно НК.

Пар поступает в колонну снизу из кипятильника и представляет собой почти чистый ВК. По мере движения вверх по колонне пар все более обогащается низкокипящим компонентом и на выходе из колонны представляет собой почти чистый НК. Пары конденсируются в дефлегматоре, охлаждаемом водой, затем разделяются на 2 потока: дистиллят с расходом  $P$  направляется в сборник, а флегма с расходом  $\Phi$  возвращается обратно в колонну. Флегма, представляющая собой почти чистый НК, подается на верх ректификационной колонны для обеспечения нисходящего потока

жидкости, включающего затем поток исходной смеси. Жидкость стекая по колонне и взаимодействуя с паром, все более обогащается ВК, конденсирующимся из пара. Выходящий снизу из колонны поток жидкости делится на 2 части: одна часть – кубовый остаток с расходом  $W$  - направляется в сборник кубового остатка, вторая - поступает в кипятильник, где испаряется. Полученный пар, представляющий собой почти чистый ВК, поступает снизу в колонну и обеспечивает восходящий поток пара в колонне.

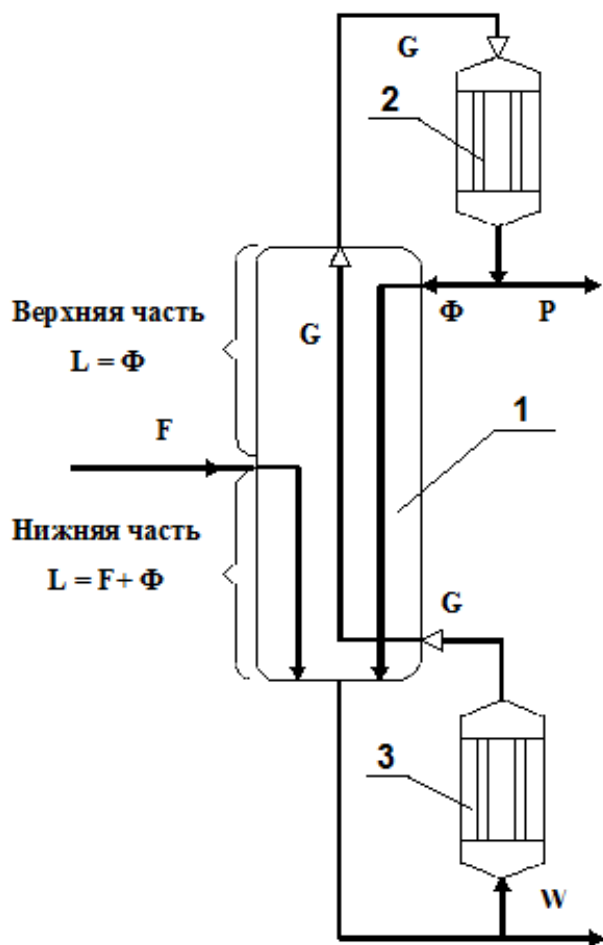


Рис.12.1. Схема ректификационной колонны

- 1 – ректификационная колонна, включающая верхнюю (укрепляющую) и нижнюю (исчерпывающую) части;
- 2 – дефлегматор;
- 3 - кипятильник

### Допущения принятые при ректификации

1) Разделяемая смесь следует правилу Трутона: отношение мольной теплоты испарения или конденсации  $r_i$  к абсолютной температуре кипения для всех жидкостей  $T_i$  является приближенно величиной постоянной.

Для смеси состоящей из  $n$  – компонентов:

$$\frac{r_{см}}{T_{см}} = \frac{r_1}{T_1} = \frac{r_2}{T_2} = \dots = \frac{r_n}{T_n} = const \quad (12.1)$$

$$\text{Или при} \quad T_{см} = T_1 = T_2 = \dots = T_n = const \quad (12.2)$$

$$r_{см} = r_1 = r_2 = \dots = r_n = const \quad (12.3)$$

Мольные теплоты испарения (конденсации) компонентов при одной и той же температуре приблизительно одинаковы. Поэтому при конденсации 1 кмоль высококипящего компонента испарится 1 кмоль низкокипящего. Отсюда следует вывод о *постоянстве мольного расхода паров*.

2) Состав пара, выходящего из ректификационной колонны в дефлегматор, равен составу дистиллята, т.е. укрепляющим действием дефлегматора можно пренебречь:

$$x_P = y_P \quad (12.4)$$

3) Состав пара, выходящего из кипятильника и поступающего в колонну, равен составу кубовой жидкости, т.е. исчерпывающим действием кипятильника можно пренебречь:

$$x_W = y_W \quad (12.5)$$

4) Теплоты смешения компонентов разделяемой смеси равны нулю

Обычно в расчетах исходят из предположения, что исходная смесь поступает в колонну при температуре кипения.

### Материальный баланс ректификационной колонны

$$\left. \begin{aligned} F &= W + P \\ F \cdot x_F &= W \cdot x_W + P \cdot x_P \end{aligned} \right\} \quad (12.6)$$

$$(12.7)$$

где  $F$  – расход исходной смеси;  $W$  - расход кубового остатка;  $P$  – расход дистиллята;

$x_W$ ,  $x_F$ ,  $x_P$  – мольная доля низкокипящего компонента в кубовом остатке, в исходной смеси и в дистилляте, соответственно.

Расход пара по колонне:

$$G = \Phi + P \quad (12.8)$$

$G$  – расход пара по колонне;  $\Phi$  – расход флегмы;

$R$  – флегмовое число

$$R = \frac{\Phi}{P} \quad (12.9)$$

$$G = P(R + 1) \quad (12.10)$$

### *Уравнения рабочих линий*

#### Верхняя (укрепляющая) часть колонны

Запишем уравнение материального баланса для малого объема с поверхностью  $dA$  в верхней части колонны

$$G \cdot dy = -L \cdot dx \quad (12.11)$$

Проинтегрируем это уравнение с учетом того, что концентрация в паровой фазе меняется от  $y$  до  $y_P$ , концентрация в жидкой фазе меняется от  $x_P$  до  $x$ :

$$G \int_y^{y_P} dy = -L \int_{x_P}^x dx \quad (12.12)$$

$$G(y_P - y) = L(x_P - x) \quad (12.13)$$

$$(y_P - y) = \frac{L}{G}(x_P - x) \quad (12.14)$$

$$y = \frac{L}{G}x + y_P - \frac{L}{G}x_P \quad (12.15)$$

Уравнение (12.15) связывает рабочие концентрации в паровой  $y$  и жидкой  $x$  фазах. Для удобства использования этого уравнения представим его в другом виде. Подставим выражения для  $L$  (расход жидкой фазы) и  $G$  (расход паровой фазы) (Ур.12.10).

$$L = \Phi = PR; \quad (12.16)$$

$$y = \frac{PR}{P(R+1)}x + y_P - \frac{PR}{P(R+1)}x_P = \frac{R}{R+1}x + y_P - \frac{R}{R+1}x_P \quad (12.17)$$

С учетом соотношения (12.4)

$$y = \frac{R}{R+1}x + x_P - \frac{R}{R+1}x_P = \frac{R}{R+1}x + \frac{x_P}{R+1} \quad (12.18)$$

Уравнение рабочей линии верхней (укрепляющей) части ректификационной колонны

$$y = \frac{R}{R+1}x + \frac{x_P}{R+1} \quad (12.19)$$

Это уравнение прямой  $y = Ax + B$

Где  $A$  – тангенс угла наклона рабочей линии к оси абсцисс

$$A = \operatorname{tg} \alpha = \frac{R}{R+1} \quad (12.20)$$

$B$  – отрезок, отсекаемый рабочей линией на оси ординат диаграммы  $y$ - $x$

$$B = \frac{x_P}{R+1} \quad (12.21)$$

#### Нижняя (исчерпывающая) часть колонны

Запишем уравнение материального баланса для малого объема с поверхностью  $dA$  в нижней части колонны

$$G \cdot dy = -L \cdot dx \quad (12.11)$$

Проинтегрируем это уравнение с учетом того, что концентрация в паровой фазе меняется от  $y_W$  до  $y$ , концентрация в жидкой фазе меняется от  $x$  до  $x_W$ :

$$G \int_{y_W}^y dy = -L \int_x^{x_W} dx \quad (12.22)$$

$$G(y - y_W) = L(x - x_W) \quad (12.23)$$

$$G \cdot y + L \cdot x_W = G \cdot y_W + L \cdot x \quad (12.24)$$

$$y = \frac{L}{G}x + y_W - \frac{L}{G}x_W \quad (12.25)$$

Подставим выражения для  $L$  (расход жидкой фазы) и  $G$  (расход паровой фазы) (Ур.12.10).

$$L = \Phi + F \quad (12.26)$$

$$y = \frac{PR + F}{P(R + 1)} x + y_W - \frac{PR + F}{P(R + 1)} x_W \quad (12.27)$$

С учетом соотношения (12.5)

$$y = \frac{PR + F}{P(R + 1)} x + x_W - \frac{PR + F}{P(R + 1)} x_W = \frac{PR + F}{P(R + 1)} x + \frac{P - F}{P(R + 1)} x_W \quad (12.28)$$

Обозначим отношение  $F/P = f$

В результате преобразований получим уравнение рабочей линии нижней (исчерпывающей) части ректификационной колонны:

$$y = \frac{R + f}{R + 1} x - \frac{f - 1}{R + 1} x_W \quad (12.29)$$

Это уравнение прямой  $y = Ax + B$

Где  $A$  – тангенс угла наклона рабочей линии нижней (исчерпывающей) части ректификационной колонны:

$$A = \operatorname{tg} \alpha = \frac{R + f}{R + 1} \quad (12.30)$$

Определим точку пересечения рабочих линий. Для этого приравняем уравнения рабочих линий (12.19) и (12.29)

$$\frac{R}{R + 1} x + \frac{x_P}{R + 1} = \frac{R + f}{R + 1} x - \frac{f - 1}{R + 1} x_W \quad (12.31)$$

$$Rx + x_P = (R + f)x - (f - 1)x_W \quad (12.32)$$

$$x_P = f x - f x_W + x_W = \frac{F}{P} x - \frac{F}{P} x_W + x_W = \frac{F}{P} x - x_W \frac{(F - P)}{P} \quad (12.33)$$

$$P x_P = F x - W x_W \quad (12.34)$$

$$F x = P x_P + W x_W \quad (12.35)$$

Сравнивая это уравнение с уравнением материального баланса получаем

$$x = x_F$$

Абсцисса точки пересечения рабочих линий равна составу исходной смеси  $x_F$ .

## Построение рабочих линий на диаграмме $y - x$

- Строим диаграмму  $y - x$  в виде квадрата с диагональю;
- Наносим равновесные данные и строим равновесную линию
- Наносим точки  $x_P = y_P, x_W = y_W$ ;
- Строим рабочую линию верхней части колонны, предполагая  $R$  известным. Откладываем отрезок  $B$  на оси ординат и соединяем конец отрезка с точкой  $(x_P, y_P)$ .
- Из точки  $x = x_F$  строим вертикальную линию до пересечения с построенной прямой, точка пересечения этих линий - точка питания  $(x_F, y_F)$ ; построенная прямая на участке  $(x_F, x_P)$  является рабочей линией верхней части колонны;
- Соединяем точку питания  $(x_F, y_F)$  и точку  $(x_W, y_W)$ , строим рабочую линию нижней части колонны

Рабочие линии расположены ниже линии равновесия.

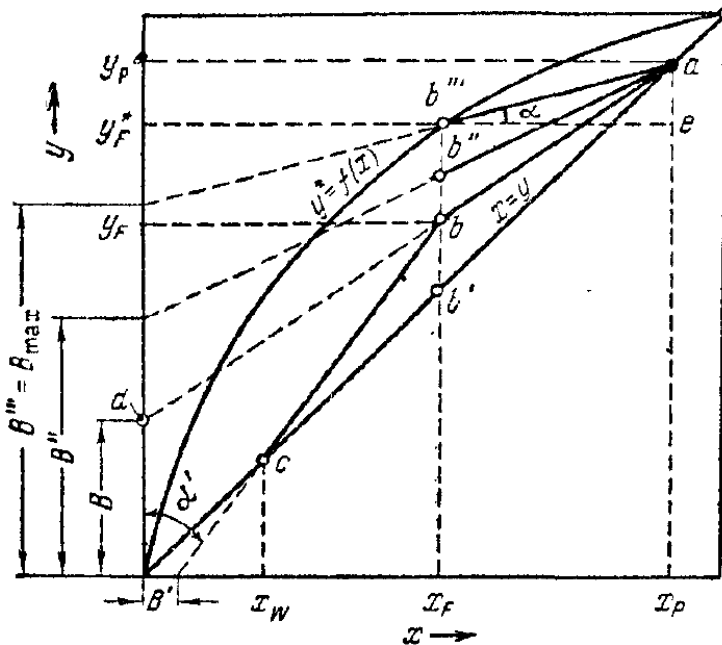


Рис.12.2. Построение рабочих линий ректификационной колонны на  $y - x$  диаграмме

### Минимальное и действительное флегмовое число

*Минимальное флегмовое число.*

Отрезок  $B$ , откладываемый при построении диаграммы  $y - x$ , при постоянном значении  $x_P$  зависит только от  $R$  согласно (12.21). Минимальное значение  $B = 0$ , что соответствует  $R = \infty$ . Увеличение отрезка  $B$  соответствует уменьшению  $R$ . Изменение угла наклона рабочей линии при изменении длины отрезка  $B$  приводит к изменению движущей

силы процесса ректификации, например на тарелке питания ( $y_F^* - y_F$ ). При минимальном значении отрезка  $B = 0$  движущая сила максимальна ( $y_F^* - y_F = \max$ ), в случае когда движущая сила равна нулю ( $y_F^* - y_F = 0$ ), длина отрезка  $B$  максимальна и тогда флегмовое число минимально  $R_{min}$ :

$$B_{max} = \frac{x_P}{R_{min} + 1} \quad (12.36)$$

При  $R_{min}$  в общем случае рабочая линия верхней части колонны при построении проходит через точку  $(x_F, y_F^*)$ , следовательно,  $R_{min}$  также можно найти из тангенса угла наклона рабочей линии верха колоны (Ур.12.20):

$$tg\alpha = \frac{R_{min}}{R_{min} + 1} = \frac{x_P - y_F^*}{x_P - x_F} \quad (12.37)$$

*Действительное флегмовое число  $R_D$*  – это флегмовое число, при котором работает ректификационная колонна.

Действительное флегмовое число должно находиться в диапазоне  $R_{min} < R_D < \infty$ .

$R_D$  находится на основании техно-экономического расчета.

Действительное флегмовое число может задаваться приближенно с помощью коэффициента избытка флегмы  $\beta$ :

$$\beta = \frac{R_D}{R_{min}} \quad (12.38)$$

В большинстве случаев значения этого коэффициента находятся в пределах

$$1,04 < \beta < 1,5$$