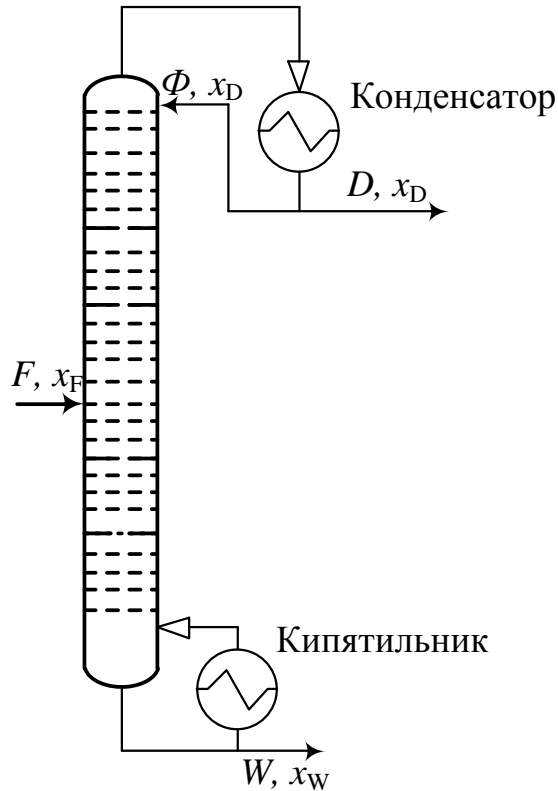


Тема: Ректификация

Для решения наших задач нужно знать принципиальную схему ректификационной установки и следующие формулы



1. Материальный баланс по всему сырью

$$F = D + W$$

2. Материальный баланс по низкокипящему компоненту

$$Fx_F = Dx_D + Wx_W$$

3. Флегмовое число

$$R \equiv \frac{\Phi}{D}$$

4. Материальный баланс верха колонны

$$G = D(R + 1)$$

5. Минимальное флегмовое число

$$R_{\min} = \frac{x_D - y_F^*}{y_F^* - x_F}$$

6. Уравнение рабочей линии верхней части колонны

$$y = \frac{R}{R+1}x + \frac{x_D}{R+1}$$

7. Уравнение линии равновесия

$$y^* = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x}$$

8. Тепловой баланс конденсатора ректификационной колонны

$$Q = G_1 r_1 = G_2 c_2 (t_{2K} - t_{2H}).$$

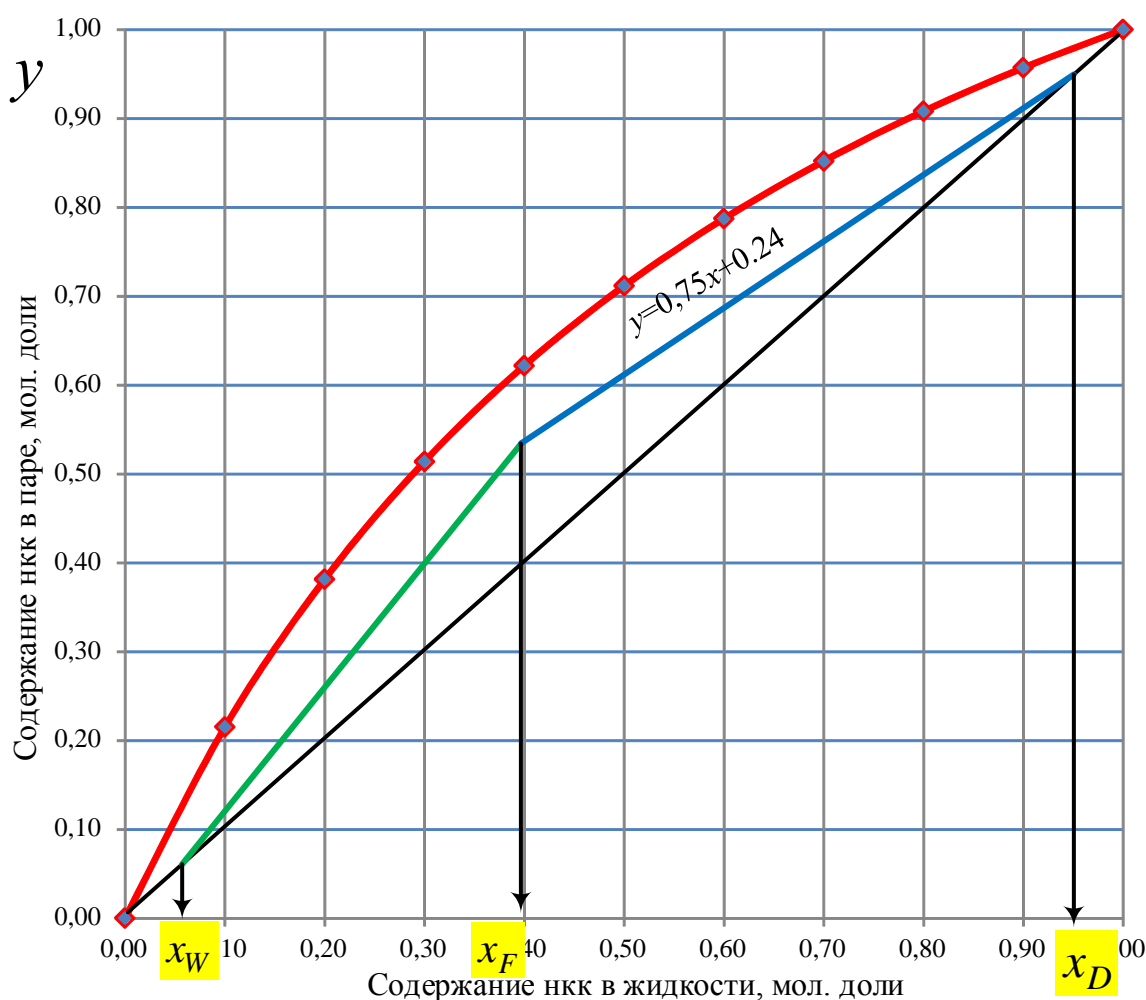
Задача 1

В ректификационную колонну подаётся 30 кмоль/час сырья с концентрацией низкокипящего компонента 40% мол. Количество отбираемого дистиллята 12 кмоль/час. Уравнение рабочей линии верхней части колонны $y=0,75x+0.24$. Определить состав кубового остатка.

Решение

Состав кубового остатка мы можем найти только из уравнения материального баланса по низкокипящему компоненту! Ни в одном уравнении этого состава больше нет. Вот это уравнение

$$Fx_F = Dx_D + Wx_W.$$



1. Используя уравнение рабочей линии верхней части колонны, находим значение флегмового числа R . Уравнение рабочей линии верхней части колонны в общем случае имеет вид

$$y = \frac{R}{R+1}x + \frac{x_D}{R+1}.$$

Для нашего конкретного случая $y=0,75x+0,24$.

Следовательно, делаем вывод, что

$$\frac{R}{R+1} = 0,75.$$

Отсюда находим флегмовое число R

$$R = \frac{0,75}{0,25} = 3.$$

2. Продолжаем сравнение уравнения рабочей линии верха колонны, записанное в общем виде, и для нашего случая. Делаем вывод, что

$$\frac{x_D}{R+1} = 0,24.$$

Тогда состав дистиллята будет равен

$$x_D = 0,24 \cdot (R+1) = 0,24 \cdot (3+1) = 0,96$$

3. Уравнение материального баланса по нкк имеет вид

$$Fx_F = Dx_D + Wx_W.$$

Находим состав кубового остатка

$$x_W = \frac{Fx_F - Dx_D}{F - D} = \frac{30 \cdot 0,4 - 12 \cdot 0,96}{30 - 12} = 0,026.$$

Задача 2

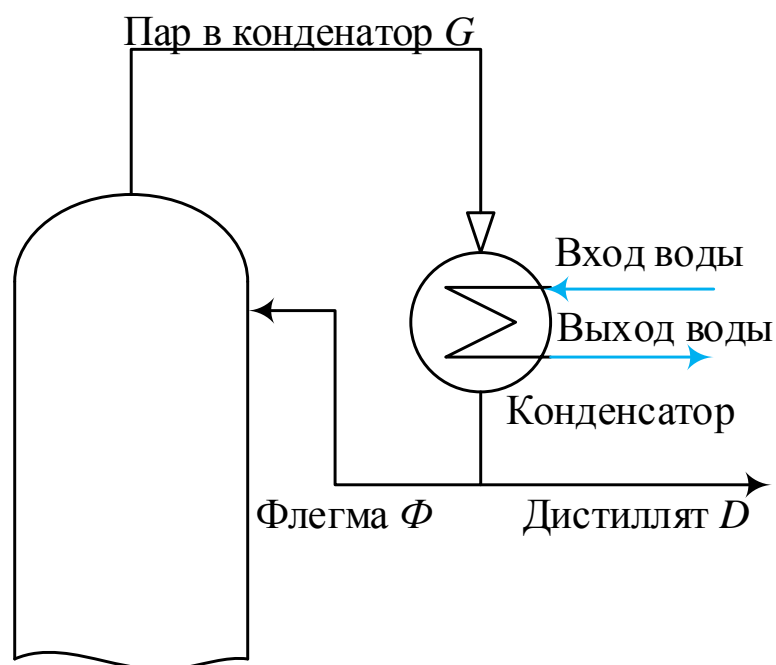
В ректификационную колонну подаётся 40 т/час смеси метанол-этанол с концентрацией нкк 40% масс. Концентрация метанола в кубовом остатке 2% масс. Уравнение рабочей линии верхней части колонны $y=0,8x+0.19$. Процесс проводится при атмосферном давлении.

Определить:

- расход пара, уходящего с верха колонны;
- расход охлаждающей воды, требуемой для конденсации этого пара, при условии, что она нагревается в конденсаторе с 20 до 45°C.

Решение

Схема верха колонны выглядит так



1. Как и в предыдущей задаче, из уравнения рабочей линии верхней части колонны найдём флегмовое число

$$y = \frac{R}{R+1}x + \frac{x_D}{R+1}.$$

$$\frac{R}{R+1} = 0,8.$$

$$R = \frac{0,8}{0,2} = 4.$$

2. Состав дистиллята (**в мольных долях!**)

$$x_D = 0,19 \cdot (R+1) = 0,19 \cdot (4+1) = 0,95$$

А теперь внимание! Нам нужно сменить единицы измерения – перейти из молярных концентраций в массовые.

Состав дистиллята в массовых долях (молярная масса метанола 32 кг/кмоль, этанола 46 кг/кмоль)

$$\bar{x}_D = \frac{0,95 \times 32}{0,95 \times 32 + 0,05 \times 46} = 0,93.$$

3. Из уравнения материального баланса по НКК найдём расход дистиллята

$$D = F \frac{x_F - x_W}{x_D - x_W} = 40 \frac{0,4 - 0,02}{0,93 - 0,02} = 16,7 \frac{\text{Т}}{\text{час}}.$$

4. Находим массовый расход пара G , поступающего в конденсатор

$$G = D(R + 1) = 16,7(4 + 1) = 83,4 \frac{\text{Т}}{\text{час}}.$$

5. Уравнение теплового баланса конденсатора (вспоминаем теплопередачу!)

$$Q = G_1 r_1 = G_2 c_2 (t_{2к} - t_{2н}).$$

В нашем случае $G = G_1$.

6. Для нахождения тепловой нагрузки Q нам нужно найти удельную теплоту конденсации r_1 . Для упрощения расчётов будем считать, что конденсируется чистый метанол, т.е. присутствием 7% этанола пренебрегаем. Тогда, считая температуру пара равной 70°C (кстати, а почему именно 70°C? Помните теплопередачу?), из справочника берём теплоту конденсации пара

$$r_1 = 1085 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

7. Теплота, которую нужно снять в конденсаторе, равна

$$Q = \frac{83,4 \cdot 1000}{3600} \cdot 1085 = 25136 \text{ кВт}.$$

8. Массовый расход воды

$$G_2 = \frac{Q}{c_2 (t_{2к} - t_{2н})} = \frac{25136}{4,18(45 - 20)} = 241 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

9. Объёмный часовой расход воды составит

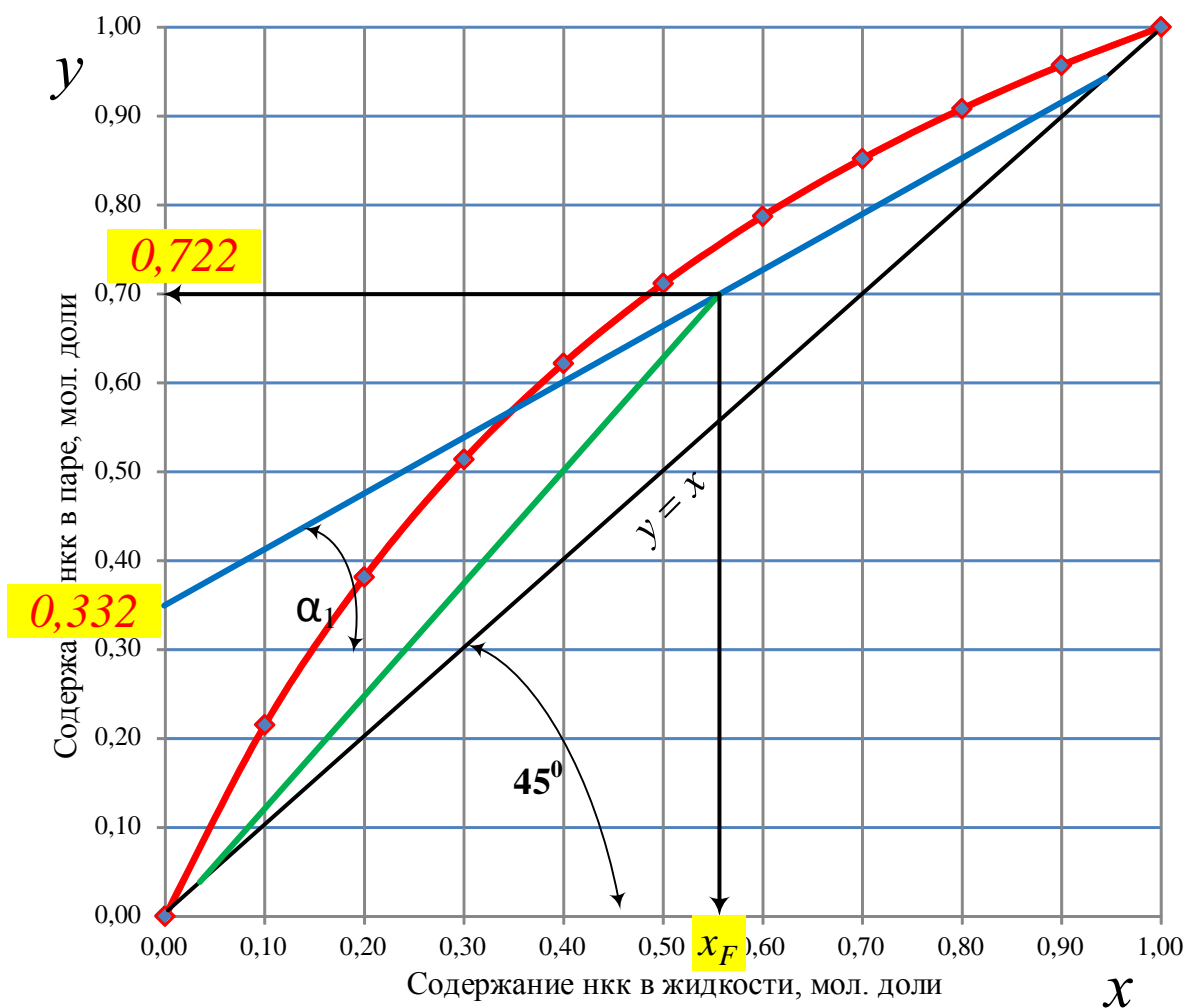
$$V_2 = \frac{G_2}{\rho_2} = \frac{241}{996} \cdot 3600 = 871 \frac{\text{м}^3}{\text{час}}.$$

Задача 3

В ректификационную колонну подаётся 52 т/час смеси пентана и гексана. С верха в дефлегматор уходит 85,8 т/час пара. Ордината точки пересечения рабочих линий верха и низа колонны равна 0,722. Определить состав кубовой жидкости, если тангенс угла наклона рабочей линии верха колонны равен 0,65, а отрезок, отсекаемый ею на оси ординат, равен 0,332.

Решение

1. Зная тангенс угла наклона рабочей линии верхней части колонны α_1 , найдём флегмовое число R (смотрим на график на следующей странице)



Уравнение верхней части колонны в общем виде имеет вид (мы его уже использовали на прошлом занятии, и вы обязаны его знать!)

$$y = \frac{R}{R+1}x + \frac{x_D}{R+1}.$$

$$\text{Тогда } \operatorname{tg}\alpha_1 = \frac{R}{R+1} = 0,65.$$

$$\text{Следовательно, } R = \frac{0,65}{1-0,65} = 1,86.$$

2. Снова используя уравнение рабочей линии верхней части колонны, вычислим состав дистиллята. Но помним, что он будет в мольных долях!

$$\frac{x_D}{R+1} = 0,332.$$

$$\text{Следовательно, } x_D = \frac{0,332}{1,86+1} = 0,95.$$

3. Состав дистиллята в массовых долях (мольная масса пентана 72, гексана 86 кг/кмоль)

$$\bar{x}_D = \frac{x_D M_1}{x_D M_1 + (1-x_D) M_2} = \frac{0,95 \times 72}{0,95 \times 72 + 0,05 \times 86} = 0,94.$$

Разница между мольным и массовым составами получилась небольшой. Но этим действием мы показываем, что следим за единицами измерения!

4. Состав сырья найдём из условия, что ордината точки пересечения рабочих линий равна 0,722. Но моём рисунке, уж простите, ордината получилась другой. Но это же просто иллюстрационный рисунок.

Тогда абсцисса точки пересечения равна

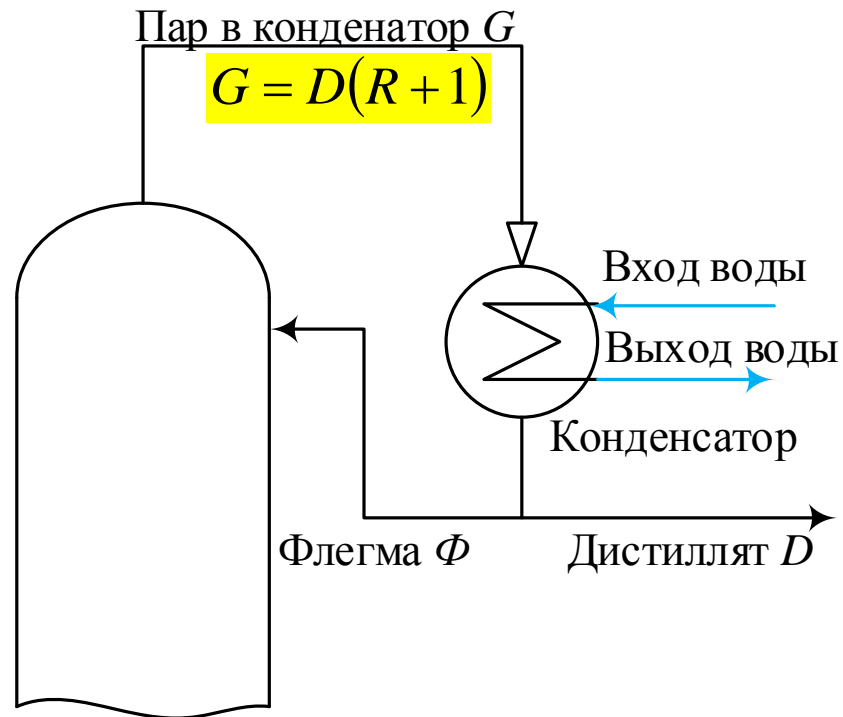
$$x_F = \frac{0,722 - 0,322}{0,65} = 0,6$$

Помним, что это снова мольная концентрация!

5. Состав сырья в массовых долях

$$\bar{x}_F = \frac{x_F M_1}{x_F M_1 + (1 - x_F) M_2} = \frac{0,6 \times 72}{0,6 \times 72 + 0,4 \times 86} = 0,56.$$

6. Расход дистиллята найдём из известного нам уравнения материального баланса верха колонны (смотрим рисунок)



$$D = \frac{G}{R + 1} = \frac{85,5}{1,86 + 1} = 30 \frac{\text{т}}{\text{час}}.$$

7. Расход кубового остатка находим из материального баланса установки по всему сырью

$$W = F - D = 52 - 30 = 22 \frac{\text{т}}{\text{час}}.$$

8. Состав кубового остатка вычисляем из уравнения материального баланса по низкокипящему компоненту

$$x_W = \frac{Fx_F - Dx_D}{W} = \frac{52 \times 0,56 - 30 \times 0,94}{22} = 0,03.$$

Задача 4

В колонне разделяется смесь метилового и этилового спиртов с расходом 20 т/час. Кубового остатка получается 8 т/час. Уравнение рабочей линии верхней части колонны $y=0,883x+0,163$. Определить конечную температуру воды на выходе из конденсатора, если её объёмный расход составляет $V=1000$ м³/час, а начальная температура $t_{2н}$ равна 20°С. Удельную теплоту конденсации дистиллята в целях упрощения расчёта считать равной 1110 кДж/кг.

Решение

1. Из уравнения рабочей линии верха колонны найдём флегмовое число R

$$\frac{R}{R+1} = \operatorname{tg}\alpha_1 = 0,833.$$

Отсюда

$$R = \frac{0,833}{1-0,833} = 5.$$

2. Расход дистиллята

$$D = F - W = 20 - 8 = 12 \frac{\text{т}}{\text{час}}.$$

3. Пара в конденсатор поступает

$$G = D(R+1) = 12 \cdot (5+1) = 72 \frac{\text{т}}{\text{час}}.$$

4. По условию задачи в конденсатор поступает 1000 м³/час воды. Это объёмный расход. А нам, для уравнения теплового баланса, нужен массовый. Примем среднюю температуру воды 30 °С. По справочнику находим её плотность при этой температуре 996 кг/м³. Тогда массовый расход будет равен

$$G_2 = V \cdot \rho = 1000 \cdot 996 = 996000 \frac{\text{кг}}{\text{час}} \approx 277 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Теперь запишем уравнение теплового баланса конденсатора и определим из него конечную температуру воды.

$$Q = Gr = G_2 c_2 (t_{2к} - t_{2н}),$$

Отсюда

$$t_{2к} = t_{2н} + \frac{Gr}{G_2 c_2} = 20 + \frac{72 \cdot 1000 \cdot 1110}{3600 \cdot 277 \cdot 4,18} = 39^\circ \text{C}.$$

Ответ: конечная температура воды на выходе из конденсатора будет равна 39 °С.

Задача 5

В ректификационную колонну подаётся бинарная смесь с содержанием низкокипящего компонента 40% мол. Его концентрация в дистилляте 95% мол. Считая разделяемую смесь идеальной с коэффициентом относительной летучести 2, получить уравнение рабочей линии верхней части колонны. Принять коэффициент избытка флегмы равным 1,5.

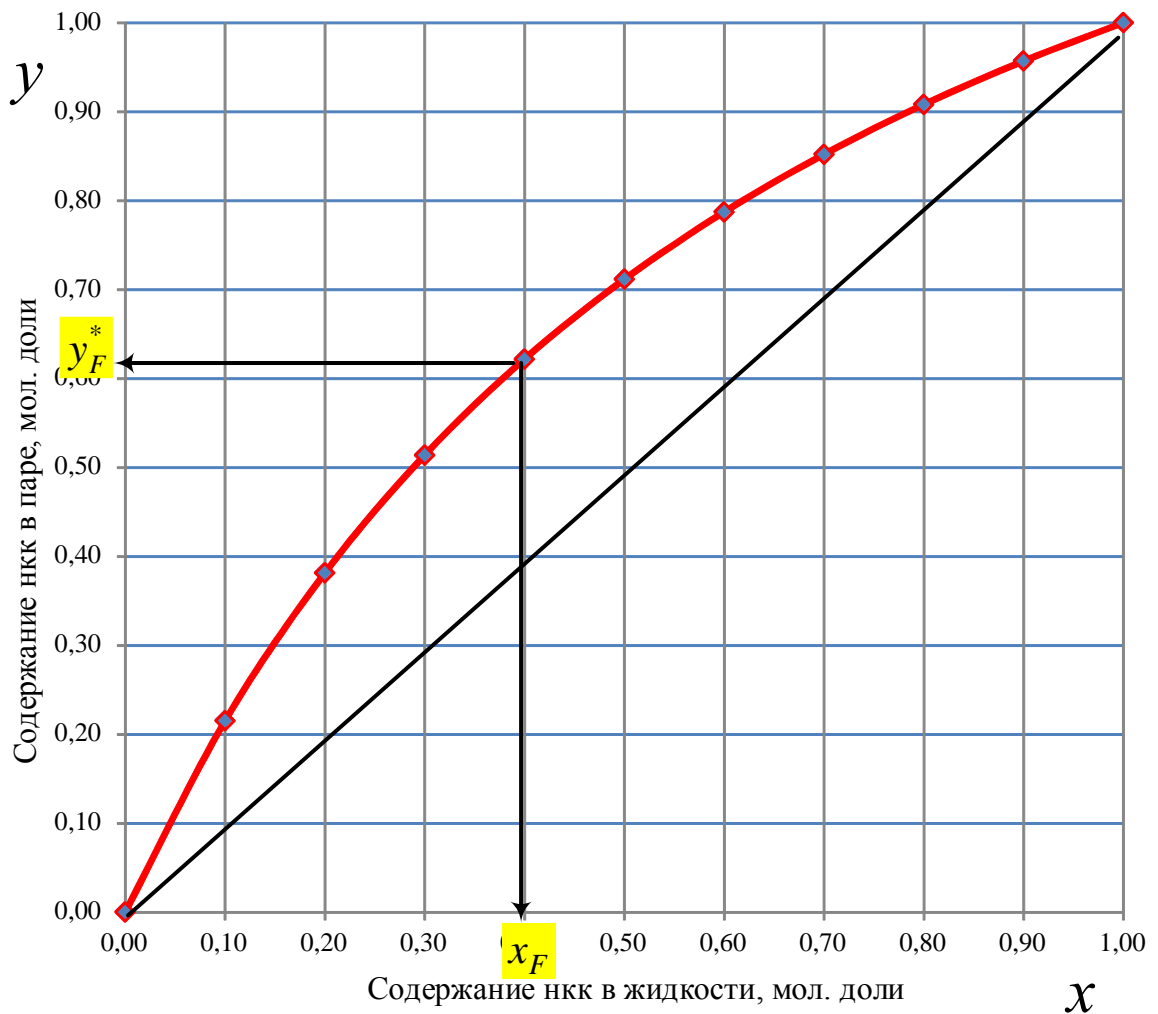
Решение

Уравнение рабочей линии верхней части колонны

$$y = \frac{R}{R+1} + \frac{x_D}{R+1}.$$

Состав дистиллята нам задан – 95% мол. Следовательно, задача сводится к расчёту флегмового числа.

1. Состав пара, равновесный с составом питания, определим из уравнения линии равновесия (см. рисунок)



$$y_F^* = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x} = \frac{2 \cdot 0,4}{1 + (2 - 1) \cdot 0,4} = 0,57.$$

2. Минимальное флегмовое число

$$R_{\min} = \frac{x_D - y_F^*}{y_F^* - x_F} = \frac{0,95 - 0,57}{0,57 - 0,4} = 2,24.$$

3. Действительное флегмовое число

$$R = \varphi R_{\min} = 1,5 \times 2,24 = 3,36.$$

4. Уравнение рабочей линии

$$y = \frac{R}{R+1} + \frac{x_D}{R+1} = \frac{3,36}{3,36+1}x + \frac{0,95}{3,36+1} = 0,77x + 0,22.$$

Задача 6

Ректификационная колонна для разделения смеси бензол-толуол работает с флегмовым числом $R=3$. Давление в колонне атмосферное. (Кстати, как вы думаете, зачем указано давление?). Количество отбираемого дистиллята 5 т/час. В конденсатор подаётся 117 м³/час воды с начальной температурой 20⁰. Коэффициент теплопередачи конденсатора 900 Вт/(м²*К). Удельная теплота конденсации верхнего продукта 490 кДж/кг. Определить требуемую поверхность конденсатора и температуру воды на выходе из него.

Решение

Величину поверхности теплопередачи F можно найти только из основного уравнения теплопередачи

$$F = \frac{Q}{K\Delta t_{cp}}$$

Для этого надо сначала найти тепловую нагрузку на конденсатор Q и среднюю разность температур.

1. Тепловую нагрузку конденсатора и температуру воды на выходе найдём их теплового баланса конденсатора

$$Q = Gr = D(R+1)r = G_2c_2(t_{2к} - t_{2н}).$$

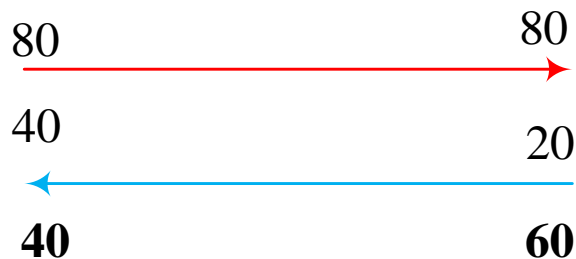
$$Q = \frac{5000}{3600}(3+1) \times 490 = 2722 \text{ кВт.}$$

2. Конечная температура воды на выходе из конденсатора

$$t_{2к} = t_{2н} + \frac{Q}{V_2 \rho_2 c_2} = 20 + \frac{2722 \times 3600}{117 \times 1000 \times 4.19} = 40^{\circ}C.$$

3. Будем считать, что верхом уходит чистый бензол. На самом деле там обязательно присутствует толуол, но его концентрация в дистилляте очень мала. Поэтому влиянием толуола на температуру кипения и теплоту конденсации мы просто пренебрегаем. При атмосферном давлении (вот зачем было указано давление!) температура его конденсации $80^{\circ}C$.

Средняя разность температур находится по значению 4-х температур



$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{m}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{m}}} = \frac{60 - 40}{\ln \frac{60}{40}} = 49^{\circ}$$

4. Требуемая поверхность теплопередачи конденсатора

$$F = \frac{2722 \times 10^3}{900 \times 49} = 61,7 м^2.$$

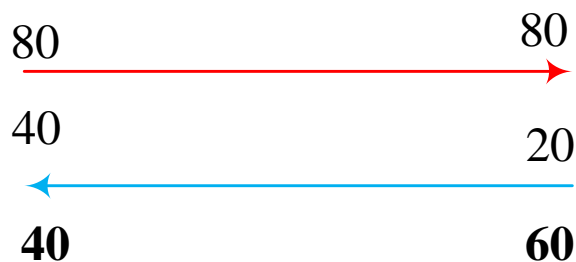
Задача 7

В ректификационной колонне разделяется смесь бензола и толуола. Дистиллята получается 5 т/час. Поверхность теплопередачи конденсатора 120 м², коэффициент теплопередачи в нём 850 Вт/(м×К). На конденсацию подаётся вода с начальной температурой 20⁰, конечной 40⁰. Определить флегмовое число и объёмный расход охлаждающей воды. Удельную теплоту конденсации считать равной 490 кДж/кг.

Решение

Эта задача, по сути, аналогична предыдущей. Там была неизвестна поверхность теплопередачи, но известно флегмовое число, а тут известна поверхность, но надо найти флегмовое число.

1. Средняя разность температур при условии, что конденсируется чистый бензол при атмосферном давлении (80⁰)



$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\bar{\sigma}} - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_{\bar{\sigma}}}{\Delta t_m}} = \frac{60 - 40}{\ln \frac{60}{40}} = 49^0.$$

2. Тепловая нагрузка на конденсатор – находим косвенным способом, не из уравнения теплового баланса!

$$Q = KF\Delta t_{cp} = 850 \times 120 \times 49 = 4998000 \text{ Вт} = 4998 \text{ кВт}.$$

3. Расход пара, поступающего в конденсатор, тоже найдём нетрадиционным способом. Не из материального баланса верха колонны, а по снимаемой в конденсаторе теплоте Q .

$$G = \frac{Q}{r} = \frac{4998}{490} = 10,2 \frac{\text{кг}}{\text{с}} = 36,72 \frac{\text{т}}{\text{час}}.$$

4. Расход флегмы, возвращаемой в колонну

$$\Phi = G - D = 36,72 - 5 = 31,72 \frac{\text{т}}{\text{час}}.$$

5. Флегмовое число

$$R = \frac{\Phi}{D} = \frac{31,72}{5} = 6,34.$$

6. Расход охлаждающей воды из уравнения теплового баланса

$$G_2 = \frac{Q}{c_2(t_{2к} - t_{2н})} = \frac{4998}{4,18 \times (40 - 20)} = 59,8 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

7. Объёмный расход охлаждающей воды

$$V = \frac{G}{\rho} = \frac{59,8}{996} \cdot 3600 = 216,1 \frac{\text{м}^3}{\text{час}}.$$