

Лекция 11 «Ректификация. Расчет числа тарелок ректификационной колонны. Ректификация при разных давлениях»

Цель: Дайте определение процессу ректификации. Приведите расчётные уравнения для числа тарелок ректификационной колонны. Охарактеризуйте ректификацию при разных давлениях.

Краткий конспект лекции: Ректификацией называется процесс разделения жидких однородных смесей на составляющие вещества в результате противоточного взаимодействия смеси паров и жидкости, получающейся при конденсации паров. При соприкосновении поднимающихся в колонне паров со стекающей вниз жидкостью происходит частичная конденсация паров и частичное испарение жидкости.

При этом из паровой фазы конденсируется преимущественно высококипящий компонент (ВКК), а из жидкости испаряется преимущественно низкокипящий компонент (НКК). Таким образом, стекающая жидкость обогащается высококипящим компонентом, а пары обогащаются НКК. Вверху колонны (рис. 1) выходят пары, состоящие из одного НКК, и при их конденсации образуется ректификат.

Часть ректификата поступает в верхнюю часть колонны на орошение и называется *флегмой*. Из нижней части колонны вытекает жидкость, состоящая в основном из ВКК, её называют *кубовым остатком*. Взаимодействие пара и жидкости на тарелке ректификационной колонны можно проследить на $t-x$ -у диаграмме для бинарной смеси (рис. 2).

Пары A с нижней тарелки $n-1$ смешиваются на вышележащей тарелке n жидкостью (флегмой) B . Пар A и флегма B не являются равновесными, а поэтому фигуративные их точки не лежат на изотерме.

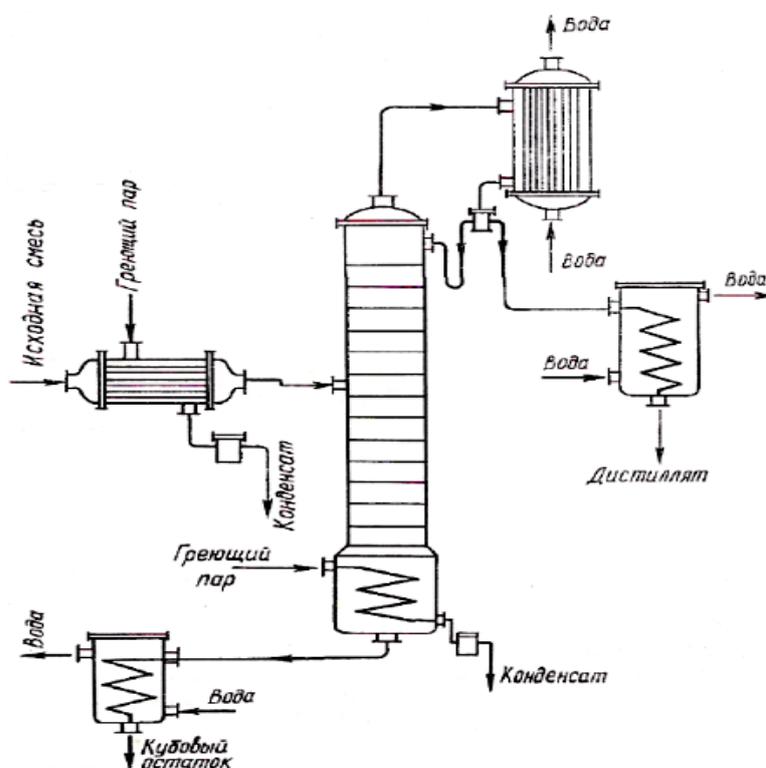


Рис. 2. Схема ректификационной колонны

Температура пара t_A выше температуры флегмы t_B , поэтому пар при смешивании с флегмой частично конденсируется, а за счёт теплоты конденсации часть жидкости при этом испаряется. Испаряется из жидкости преимущественно НКК, а конденсируется из пара преимущественно ВКК. Пар обогащается НКК, и фигуративная точка A сдвигается по линии конденсации и в момент равновесия займёт положение D .

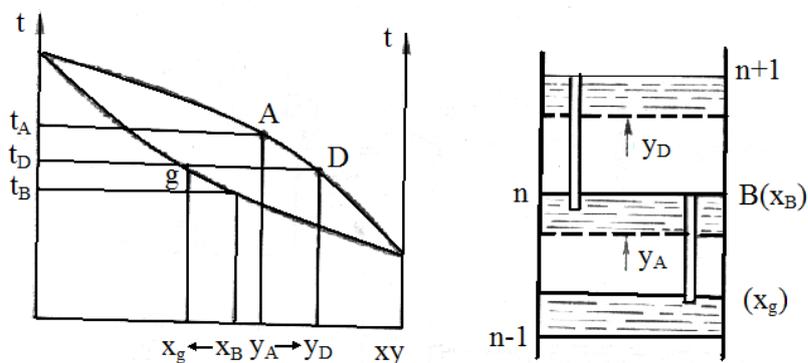


Рис. 2. К анализу процесса ректификации на тарелке: диаграмма $t-x-y$ для бинарной смеси

В момент равновесия температура пара и жидкости одинаковая, то фигуративная точка флегмы, равновесная пару состава D , расположится на изотерме t_D , которая обозначена через g . На рассматриваемой тарелке n пары обогатятся летучим компонентом, изменив свой состав с y_A на y_D , а флегма обогатится более высококипящим компонентом, по которому состав её изменится с x_B на x_g .

Расчёт числа тарелок ректификационной колонны непрерывного действия для разделения бинарных жидких смесей

Степень разделения жидкой смеси на составляющие компоненты и чистота получаемого дистиллята и кубового остатка зависят от поверхности фазового контакта. Поверхность же фазового контакта определяется количеством орошаемой флегмы и конструктивным оформлением аппарата. Количеством подаваемой флегмы на орошение определяется число теоретических тарелок в колонне.

Разработано несколько методов расчёта числа теоретических тарелок, из которых для бинарных смесей широко применяется графический метод Мак Кэба и Тиле (с 1925 г.).

Метод основывается на следующих допущениях:

1. Молярная теплота испарения обоих компонентов одинакова. 1 кмоль сконденсировавшегося пара испаряет 1 кмоль жидкости. Поэтому количество пара и жидкости по высоте колонны не изменяется, а изменяется лишь их состав.
2. Исходная смесь и флегма имеют температуру, равную их температуре кипения.
3. Состав флегмы равен составу пара, поднимающегося с верхней части колонны, т.е. в дефлегматоре не происходит изменения состава пара.
4. Состав жидкости, стекающей с последней тарелки и нижней колонны, равен составу пара, поднимающегося из кипятильника, т.е. куб не производит разделяющего действия.

Уравнения рабочих линий процесса ректификации, необходимые для расчёта числа теоретических тарелок, выводятся, как и для процесса массообмена, из уравнения материального баланса.

В общем виде уравнение имеет вид:

$$Gdy = -Ldx \quad (1)$$

Применительно к рассматриваемому случаю выразим величины G и L .

Количество пара, поднимающегося по колонне V после дефлегматора, даёт жидкость на орошение верхней части колонны (флегмы) Φ и дистиллята G_p

$$V = \Phi + G_p \quad (2)$$

Вводя безразмерные отношения, получим

$$\frac{V}{G_p} = \frac{\Phi}{G_p} + \frac{G_p}{G_p} = R + 1 = G \quad (3)$$

Безразмерное отношение $\frac{\Phi}{G_p} = R$ – называется флегмовым числом.

Таким образом, уравнение (1) принимает вид:

$$(R + 1)dy = -Rdx \quad (4)$$

В колонне непрерывного действия количество пара и количество жидкости остаются неизменными, поэтому величины $R + 1$ и R выносим за знак интеграла и для любой тарелки верхней части колонны, с которой уходит пар с составом y и на которой жидкость имеет состав x , учитывая наличие противотока, получим

$$(R + 1) \int_y^{y_p} dy = -R \int_{x_p}^x dx, \quad (5)$$

откуда

$$(R + 1)(y_p - y) = R(x_p - x) \quad (6)$$

и после преобразования, учитывая по условию $y_p = x_p$,

$$y = \frac{R}{R+1}x + \frac{x_p}{R+1} \quad (7)$$

Полученное уравнение устанавливает связь между составом пара и составом жидкости в любом сечении верхней части колонны при заданных значениях орошения (флегмового числа R) и состава ректификата x_p . Зависимость (7) является уравнением рабочей линии верхней (укрепляющей) части ректификационной колонны.

Аналогично получим уравнение рабочей линии нижней части колонны, учитывая, что количество стекающей жидкости в этой части колонны возрастает на величину питания F .

Напишем уравнение материального баланса для нижней части колонны:

$$(R + 1)dy = -(R + F)dx \quad (8)$$

Проинтегрируем его в пределах изменения состава пара от y_w до y и жидкости от x до x_w :

$$(R + 1) \int_{y_w}^y dy = -(R + F) \int_x^{x_w} dx, \quad (9)$$

откуда

$$(R + 1)(y - y_w) = (R + F)(x - x_w), \quad (10)$$

где y_w – состав пара, поднимающегося из кипятильника, x_w – состав в мольных долях кубовой жидкости.

После преобразования, учитывая из условия, что $x_w = y_w$, получим

$$y = \frac{R+F}{R+1}x - \frac{F-1}{R+1}x_w \quad (11)$$

Зависимость (11) представляет собой уравнение рабочей линии нижней (исчерпывающей) части ректификационной колонны.

Для колонны непрерывного действия остаются постоянными величины:

$$\frac{R}{R+1} = A, \quad \frac{x_p}{R+1} = B, \quad \frac{R+F}{R+1} = A_1, \quad \frac{F-1}{R+1} = B_1, \quad (12)$$

тогда уравнения рабочих линий процесса есть уравнения прямых линий [2-3]:

$$y = Ax + B, \quad (13)$$

$$y = A_1x - B_1 \quad (14)$$

Ректификация при разных давлениях

В зависимости от температуры кипения разделяемых жидкостей ректификацию проводят под различным давлением. При $t_{кип} = 30-150$ °С ректификация осуществляется обычно под атмосферным давлением.

При разделении высококипящих жидкостей для снижения температур их кипения ректификацию проводят под вакуумом.

Ректификацию под давлением проводят при разделении жидкостей с низкой температурой кипения, когда разделяемая смесь при атмосферном давлении находится в газообразном состоянии (примером служит разделение сжиженных газов).

Давление в кубе всегда больше давления на верху колонны на величину её гидравлического сопротивления. Поэтому гидравлическое сопротивление колонн, работающих при разрежении, должно быть как можно меньшим [3].

Вопросы для самоконтроля:

1. Дайте определение процессу ректификации.
2. Приведите расчётные уравнения для числа тарелок ректификационной колонны.
3. Раскройте принцип ректификации. Нарисуйте схему дистилляционной колонны и обозначьте потоки жидкости и пара по ней.
4. Охарактеризуйте ректификацию при разных давлениях.
5. В каких случаях проводится ректификация под давлением?

Литература

1. Лекции по курсу «Основные процессы и аппараты химической технологии»: учебно-методическое пособие / составители: Ж.Т. Ешова, Д.Н. Акбаева. – Алматы: Қазак университеті, 2017. – 392 с. – 40 экз.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973. – 752 с.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчёта процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи). – Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ, 2009. – 544 с.