

ЭНЕРГОЗАТРАТЫ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ ЖИДКИХ СМЕСЕЙ МЕТОДАМИ ПЕРЕГОНКИ

М.К. Захаров, профессор

кафедра Процессов и аппаратов химической технологии им. Н.И. Гельперина

МИТХТ им. М.В. Ломоносова

e-mail: mkzakharov@mtu-net.ru

Предложен новый метод расчета затрат теплоты при разделении бинарных смесей методами перегонки. Изучено влияние трудности разделения бинарных смесей на необходимые затраты теплоты при их разделении методами перегонки. Показано, что энергосбережение в процессах ректификации увеличивается при увеличении флегмового числа.

Presented the new method of calculation of heat consumption while separation binary mixtures by distillation methods. Studied the effect of complexity of separation of binary mixtures on necessary heat consumption while separating them by distillation. It is shown that energy-saving in rectification is increased when increasing the reflux ratio.

Ключевые слова: затраты теплоты, энергосбережение, дистилляция, ректификация, флегма.

Key words: heat consumption, energy-saving, distillation, rectification, reflux

Среди существующих методов разделения жидких бинарных смесей (кристаллизация, дистилляция, ректификация, мембранное разделение и др.) процессы перегонки являются одними из самых **энергоёмких**. На этот метод разделения идут в тех случаях, когда другие методы оказываются неприемлемыми. Энергоёмкость процессов перегонки связана, прежде всего, с большой теплотой парообразования (по сравнению, например, с теплотой плавления) компонентов разделяемой смеси. При этом энергозатраты на разделение смеси зависят от качества получаемых продуктов. Поэтому при разработке энергосберегающих процессов разделения необходимо уметь количественно характеризовать качество разделения смеси на индивидуальные компоненты.

Оценить качество разделения смеси на индивидуальные компоненты можно различными способами: по выходам каждого компонента и чистоте каждого продукта разделения, на базе энтропийного критерия разделения и т.п. Для бинарных смесей наиболее удобен, по нашему мнению, технологический критерий разделения E , характеризующий одновременно чистоту и выход. Он представляет собой разность выходов в данный продукт целевого компонента и примеси [1].

При разделении L_1 бинарной смеси низкокипящего компонента (НKK) и высококипящего (ВKK) (с мольной концентрацией НKK в ней x_1) на верхний продукт в количестве Π с преимущественным содержанием в нем НKK - x_2 , и нижний продукт в количестве L_0 с незначительным содержанием НKK - x_0 технологический критерий

разделения E по верхнему продукту может быть рассчитан по формуле [2]:

$$E = \frac{(x_1 - x_0)(x_2 - x_1)}{x_1(1 - x_1)(x_2 - x_0)} \quad (1)$$

Критерий разделения E , соответственно выражению (1), зависит лишь от концентрации НKK в исходной смеси и в получаемых продуктах (поскольку их количества также определяются концентрациями).

В частном случае симметричного разделения, когда $x_2 - x_1 = x_1 - x_0 = \frac{x_2 - x_0}{2}$ получено

$$E = \frac{(x_2 - x_0)(x_2 - x_0)}{2 \cdot 2 \cdot x_1(1 - x_1)(x_2 - x_0)} = \frac{x_2 - x_0}{4 \cdot x_1(1 - x_1)} \quad (2)$$

и при значении $x_1 = 0.5$ величина $E = x_2 - x_0$, т.е. в этом случае критерий разделения E численно совпадает с разностью конечных концентраций.

В работах [2, 3] получена формула для расчета минимальных (при работе с минимальным флегмовым числом) затрат теплоты на разделение 1 кмоль исходной бинарной смеси, подчиняющейся закону Рауля:

$$q = Er \left(x_1 + \frac{1 - P}{2P} \right), \quad (3)$$

где r – удельная теплота парообразования, кДж/кмоль; $P = (\alpha - 1)/(\alpha + 1)$ – разделяемость смеси, в отличие от относительной летучести компонентов α ($1 \leq \alpha < \infty$), разделяемость смеси характеризуется величинами от 0 до 1.

Сначала найдем затраты теплоты на процесс выпаривания растворов солей, когда разделяемость смеси $P = 1$ (что соответствует коэффициенту относительной летучести

растворителя к соли $\alpha = \infty$). В случае выпаривания нелетучих солей ($x_2 = 1$) и полном удалении растворителя ($x_0 = 0$) Критерий разделения $E = x_2 - x_0 = 1$ (при симметричном разделении, т.е. при $x_1 = 0.5$). В соответствии с формулой (3) получим удельные затраты теплоты при выпаривании:

$$q_B = \frac{r}{2} \quad (4)$$

Дальнейший анализ энергозатрат на разделение бинарных смесей методами перегонки проведен при начальной концентрации НКК в исходной смеси $x_1 = 0.5$. В этом случае формула (3) упрощается:

$$q = \frac{Er}{2P} \quad (5)$$

Видно, что удельные минимальные затраты теплоты на процесс ректификации

прямо пропорциональны критерию разделения E и обратно пропорциональны разделяемости смеси P . В расчете на единицу разделения удельные минимальные затраты теплоты на ректификацию

$$q_P = \frac{q}{E} = \frac{r}{2P} \quad (6)$$

Из (6) следует, что, чем меньше разделяемость смеси P , тем больше удельные затраты теплоты на единицу разделения при ректификации. На рис. 1 представлена зависимость относительных (по сравнению с выпариванием) затрат теплоты на ректификацию от разделяемости смеси P (кривая 1).

Увеличение затрат теплоты на ректификацию при уменьшении разделяемости смеси связано, естественно, с увеличением минимального (и рабочего) флегмового числа и соответствующим ростом потока флегмы, которую необходимо испарять в кубе колонны.

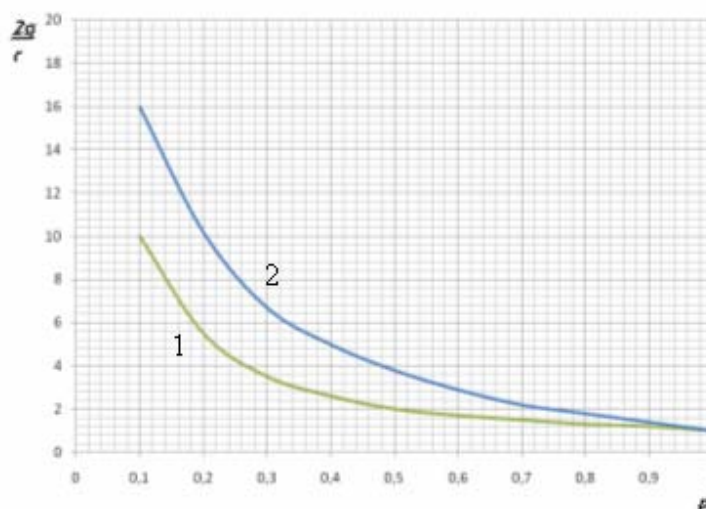


Рис. 1. Затраты теплоты на разделение методами ректификации (кривая 1) и непрерывной дистилляции (кривая 2).

Зависимость минимального флегмового числа от разделяемости смеси P можно установить для идеальных бинарных смесей с помощью уравнения равновесия [1]:

$$y^p = \frac{\alpha x}{\alpha x + 1 - x} \quad \text{или} \quad y^p = \frac{(1+P)x}{1 - P + 2Px} \quad (7)$$

и выражения для минимального флегмового числа [1]:

$$R_{\min} = \frac{x_2 - y_1^p}{y_1^p - x_1}$$

При $x_1 = 0.5$ уравнение (7) упрощается:

$$y_1^p = \frac{(1+P) \cdot 0.5}{1 - P + P} = \frac{1+P}{2}$$

Тогда

$$R_{\min} = \frac{x_2 - (1+P)/2}{(1+P)/2 - 0.5} = \frac{2x_2 - 1 - P}{P} \quad (8)$$

Величина $R_{\min}$ зависит и от концентрации x_2 . Кроме того, область работы формулы (8) ограничена, естественно, положительными значениями минимального флегмового числа. При этом должно соблюдаться неравенство $x_2 > (P+1)/2$. Зависимость $R_{\min}$ от разделяемости смеси при $x_2 = 0.98$ представлена на рис. 2.

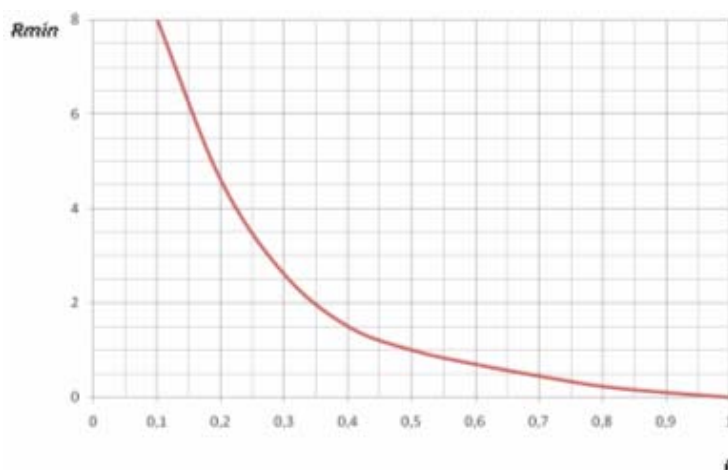


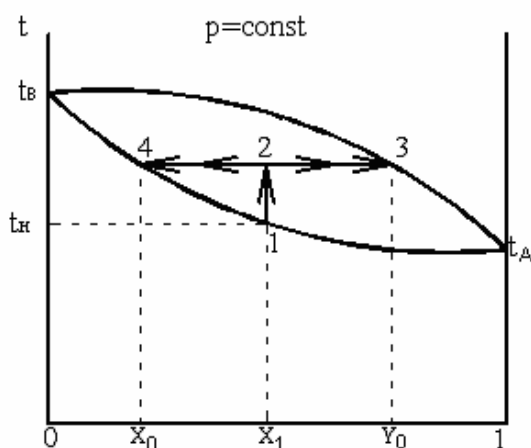
Рис. 2. Зависимость минимального флегмового числа от разделяемости смеси.

При непрерывной **дистилляции** бинарной смеси состав получаемого пара (y_0) равновесен составу отделяемой жидкости (x_0). В случае идеальной смеси справедливы выражения (7):

$$y_0 = \frac{\alpha x_0}{\alpha x_0 + 1 - x_0} \quad \text{или} \quad (9)$$

$$y_0 = \frac{(1+P)x_0}{1-P+2Px_0}$$

Наибольший критерий разделения достигается при симметричном разделении ($x_1 - x_0 = y_0 - x_1$) исходной смеси с концентрацией $x_1 = 0.5$ кмоль НКК/кмоль смеси (рис. 3).

Рис. 3. Изображение процесса непрерывной дистилляции в диаграмме $t-x, y$.

1-2 – испарение исходной смеси; 2-3, 4 – сепарация пара от жидкости.

Тогда из условия симметричного разделения $2x_1 = y_0 + x_0$ и при $x_1 = 0.5$ имеем $x_0 = 1 - y_0$. С учетом этого равенства уравнение (9) приобретает вид:

$$y_0 = \frac{(1+P)(1-y_0)}{1-P+2P(1-y_0)} \quad (10)$$

Решение уравнения (10) имеет вид:

$$y_0 = \frac{P+1-\sqrt{1-P^2}}{2P} \quad (11)$$

Критерий разделения E в этом случае:

$$E = y_0 - x_0 = y_x - (1 - y_0) = 2y_0 - 1.$$

С учетом полученного выражения (11) для y_0 :

$$E = \frac{P+1-\sqrt{1-P^2}}{P} - 1 = \frac{1-\sqrt{1-P^2}}{P} \quad (12)$$

При симметричном разделении условию $x_1 - x_0 = y_0 - x_1$ в соответствии с материальным балансом следует равенство количеств получаемого пара и оставшейся жидкости. То есть необходимо испарить 0.5 кмоль исходной смеси и, соответственно, затратить теплоту, равную половине скрытой теплоты парообразования.

При этом значение критерия разделения определяется по формуле (12), причем при дистилляции величина E существенно меньше единицы. Затраты теплоты на полное разделение (на единицу разделения) методом непрерывной дистилляции составят:

$$q_d = \frac{r}{2E} = \frac{r}{2} \frac{P}{1-\sqrt{1-P^2}} \quad (13)$$

Зависимость относительных (по сравнению с выпариванием) затрат теплоты на дистилляцию от разделяемости P представлена кривой 2 на рис. 1. Видно, что затраты на разделение методом ректификации всегда меньше, нежели при дистилляции.

Следует отметить, что определяемые по (13) затраты теплоты на разделение методом

дистилляции являются минимальными, так как в выбранном варианте (при $x_1=0.5$) критерий разделения близок к максимальному.

Энергосбережение при ректификации по сравнению с дистилляцией найдено как разность в затратах, определяемых выражениями (13) и (6):

$$\Delta q_{\Sigma} = q_D - q_P = \frac{r}{2} \frac{P}{1 - \sqrt{1 - P^2}} - \frac{r}{2P} = \frac{r}{2} \left(\frac{P}{1 - \sqrt{1 - P^2}} - \frac{1}{P} \right) = \frac{r}{2} \frac{P^2 - 1 + \sqrt{1 - P^2}}{P(1 - \sqrt{1 - P^2})}.$$

Окончательно:

$$\Delta q_{\Sigma} = \frac{r}{2} \frac{\sqrt{1 - P^2} - (1 - P^2)}{P(1 - \sqrt{1 - P^2})} \quad (14)$$

Относительное энергосбережение при ректификации ($2\Delta q_{\Sigma}/r$) увеличивается с уменьшением разделяемости смеси P (рис. 4).

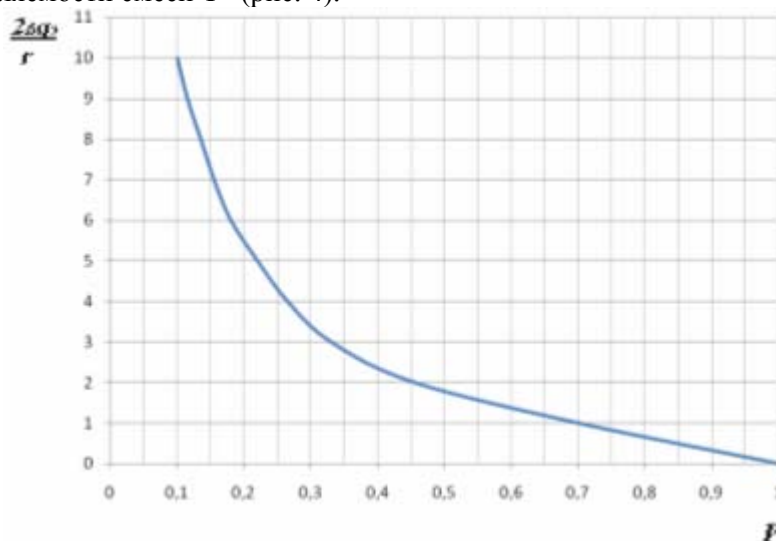


Рис. 4. Зависимость энергосбережения при ректификации от разделяемости смеси.

Сопоставление кривых на рис. 2 и 4 показывает, что большее энергосбережение имеет место при больших флегмовых числах (минимальном и рабочем – тоже).

В заключение еще раз подчеркнем, что затраты теплоты на разделение методом ректификации пропорциональны флегмовому числу. Последнее при заданном критерии разделения E зависит от трудности разделения смеси, обусловленной природой взаимодействия ее компонентов. Вместе с тем при повышении флегмового числа

увеличивается энергосбережение, связанное с многократной «работой» пара на тарелках (он конденсируется и производит пар нового состава). Большому флегмовому числу соответствует большой поток жидкости по колонне. Поднимающийся пар испаряет больше жидкости – этим и объясняется большее энергосбережение. Этот вывод согласуется с теоретическим анализом энергосбережения при рассмотрении тепло - массообмена на тарелках с различным соотношением потоков жидкости и пара [3].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: Учебник: В 2 кн. Кн. 2 / В. Г. Айнштейн, М. К. Захаров, Г. А. Носов и др.; Под ред. В. Г. Айнштейна. – М. : Университетская книга, Логос, Физматкнига, 2006. – 872 с. ISBN 5-98704-090-6.
2. Захаров, М. К. О затратах теплоты при разделении бинарных смесей методами перегонки / М. К. Захаров, Н. В. Ряднинская // Вестник МИТХТ. – 2006. – Т. I, № 2. – С. 62–66.
3. Захаров, М. К. Энергосбережение при ректификации идеальных бинарных смесей / М. К. Захаров, А. С. Козлова // Вестник МИТХТ. – 2007. – Т. II, № 6. – С. 56– 62.