

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАЗДЕЛЕНИЯ И ЗАТРАТ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ПРОЦЕССАХ РЕКТИФИКАЦИИ

М.К. Захаров, профессор, Моханд Аббаси, аспирант, Е.Н. Зверева, магистр

кафедра Процессы и аппараты химической технологии им. Н.И. Гельперина

МИТХТ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119571 Россия

e-mail: lenazvereva724@gmail.com

Проведено сравнение различных критериев количественной оценки качества разделения бинарных смесей при ректификации. Выбран наилучший критерий для бинарных смесей. Найдены удельные затраты теплоты в случае ректификации бинарных смесей при различных разделяемостях и составах исходной смеси.

Ключевые слова: ректификация, затраты теплоты, флегмовое число, качество разделения, критерий разделения.

Процессы перегонки при разделении жидких смесей являются одними из самых энергоемких разделительных процессов, поэтому предлагают [1–3] различные способы энергосбережения при организации таких процессов. Среди процессов перегонки наибольшей эффективностью использования энергии отличается процесс ректификации. Очевидно, что энергозатраты на разделение смеси зависят и от качества получаемых продуктов. Поэтому при разработке приемов, направленных на энергосбережение в процессе ректификации, необходимо владеть количественными способами оценки качества разделения бинарной смеси. В качестве количественной оценки можно использовать разные критерии, характеризующие качество разделения. В научной литературе [4, 5] предлагают два технологических критерия: E_T (иногда его обозначают E_N – в честь Ньютона) и E_R (критерий Ричардса). Сравнительный анализ критериев, характеризующих качество разделения жидких бинарных смесей, дает возможность выбрать наилучший для дальнейшей оценки энергозатрат при ректификации.

Рассмотрим более подробно каждый из названных критериев при разделении исходной бинарной смеси с концентрацией в ней низкокипящего компонента (НKK) x_1 в ректификационной колонне на два продукта: дистиллат, содержащий преимущественно НKK (его концентрация – x_2) и кубовый остаток, содержащий, преимущественно, высококипящий компонент (ВKK) (при этом концентрация НKK маленькая – x_0).

Технологический критерий разделения Ньютона E_T

Технологический критерий разделения E_T [4] связан с чистотой и выходом продуктовых потоков и представляет собой разность выходов целевого компонента и примеси в продуктах

разделения. Выведем формулу для его расчета на примере верхнего продукта.

При разделении бинарной смеси получают верхний продукт в количестве Π с содержанием в нем НKK – x_2 и нижний продукт в количестве L_0 , который содержит незначительное количество НKK – x_0 . Из материальных балансов установки разделения

$$L_1 - \Pi - L_0 = 0$$

$$L_1 x_1 - \Pi x_2 - L_0 x_0 = 0$$

получаем:

$$L_1 x_1 - L_1 x_0 = \Pi x_2 + \Pi x_0$$

$$\Pi = L_1 \frac{x_1 - x_0}{x_2 - x_0}.$$

В верхнем продукте количество НKK составляет Πx_2 , а его выход по отношению к исходному составу $L_1 x_1$ равен:

$$\frac{\Pi x_2}{L_1 x_1} = \frac{x_2 (x_1 - x_0)}{x_1 (x_2 - x_0)}. \quad (1)$$

А выход примеси в верхнем продукте составляет:

$$\frac{\Pi (1 - x_2)}{L (1 - x_1)} = \frac{(1 - x_2) (x_1 - x_0)}{(1 - x_1) (x_2 - x_0)}.$$

Исходя из определения технологического критерия разделения E_T получаем:

$$\begin{aligned} E_T &= \frac{x_2 (x_1 - x_0)}{x_1 (x_2 - x_0)} - \frac{(1 - x_2) (x_1 - x_0)}{(1 - x_1) (x_2 - x_0)} = \\ &= \frac{(x_1 - x_0)}{(x_2 - x_0)} \left(\frac{x_2}{x_1} - \frac{1 - x_2}{1 - x_1} \right) = \frac{(x_1 - x_0) (x_2 - x_1)}{x_1 (1 - x_1) (x_2 - x_0)}. \end{aligned}$$

Таким образом, формула для расчета технологического критерия разделения имеет вид

$$E_T = \frac{(x_1 - x_0) (x_2 - x_1)}{x_1 (1 - x_1) (x_2 - x_0)}. \quad (2)$$

Технологический критерий разделения E_T зависит только от концентрации низкокипящего компонента (НKK) в исходной смеси и продуктах разделения. Возрастанию критерия E_T соответствует повышение качества разделения.

Технологический критерий Ричардса E_R

Критерий Ричардса E_R [5] представляет собой произведение выхода целевого компонента в верхнем продукте на выход целевого компонента в нижнем продукте. Это определение основано на предположении, что суммарная скорость выделения обоих компонентов должна иметь большее значение при лучшем разделении.

Выход НКК по отношению к исходному составу L_1x_1 в верхнем продукте характеризуется выражением (1).

Найдем выражение для выхода ВКК в нижнем продукте (также по отношению к исходному составу):

$$\frac{L_0(1-x_0)}{L_1(1-x_1)} = \frac{(x_2-x_1)(1-x_0)}{(x_2-x_0)(1-x_1)}.$$

Исходя из определения технологического критерия разделения E_R получаем:

$$E_R = \frac{x_2(x_1-x_0)(x_2-x_1)(1-x_0)}{x_1(x_2-x_0)(x_2-x_0)(1-x_1)} = \frac{(1-x_0)(x_2-x_1)x_2(x_1-x_0)}{(1-x_1)(x_2-x_0)^2x_1}.$$

Таким образом, формула для расчета технологического критерия разделения имеет вид:

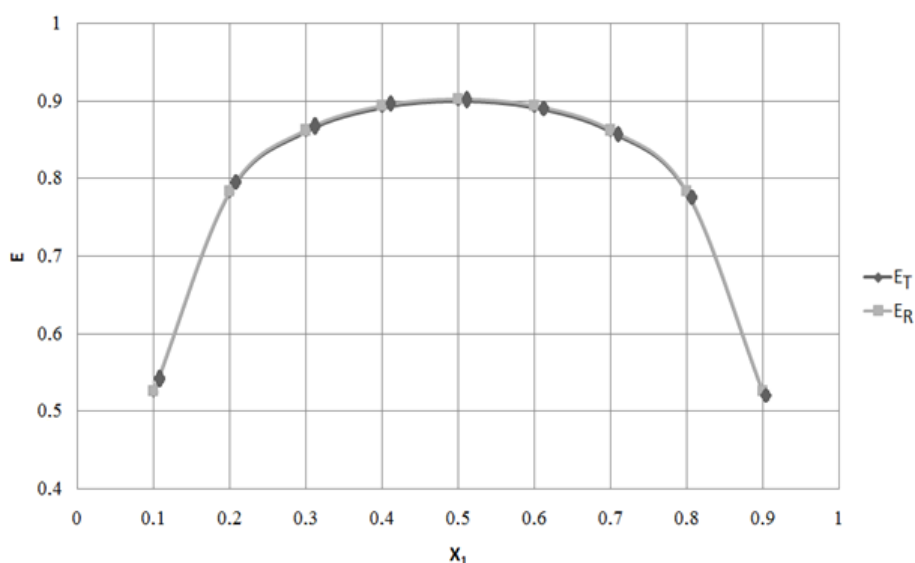
$$E_R = \frac{(1-x_0)(x_2-x_1)x_2(x_1-x_0)}{(1-x_1)(x_2-x_0)^2x_1} \quad (3)$$

Сравнение технологических критериев разделения жидких бинарных смесей

По формулам (2), (3), были рассчитаны критерии разделения при различных составах исходной смеси x_1 и фиксированных концентрациях НКК в дистиллате x_2 и в кубе x_0 ($x_2 = 0.95$; $x_0 = 0.05$). Результаты расчетов приведены в табл. 1. Видно, что значения критериев разделения E_T и E_R практически совпадают во всем диапазоне концентраций x_1 . Кривые зависимостей критериев разделения E_T и E_R представлены на рис. 1.

Таблица 1. Значения критериев разделения при различных составах исходной смеси x_1

x_1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
E_T	0.5247	0.7813	0.8598	0.8912	0.9	0.8912	0.8598	0.7813	0.5247
E_R	0.5261	0.7834	0.8622	0.8937	0.9025	0.8937	0.8622	0.7834	0.5261

Рис. 1. Зависимости технологических критериев Ньютона E_T и Ричардса E_R от состава исходной смеси x_1 .

Представленные на рис. 1 кривые зависимостей E_T и E_R от концентрации НКК x_1 практически совпадают и на рисунке представлены одной линией.

Сравнение технологических критериев качества разделения жидких бинарных смесей показывает преимущества технологического критерия E_T по сравнению с E_R , а именно: значение технологического критерия E_T при $x_1=0.5$ и симметричном разделении (когда $(x_2-x_1) = (x_1-x_0)$)

точно совпадает с разностью (x_2-x_0) , в то время, как значения критерия Ричардса E_R всегда немного отличаются от значения этой разности (x_2-x_0) .

Из всего выше сказанного можно сделать вывод, что для количественной оценки качества разделения двухкомпонентных смесей лучше других подходит технологический критерий разделения E_T . Поэтому в дальнейшем при анализе затрат теплоты в процессах ректификации

будем использовать технологический критерий разделения E_T .

Затраты теплоты при ректификации бинарной смеси

Затраты теплоты в кипяtilьнике ректификационной колонны Q_k связаны с отводом теплоты в конденсаторе $Q_{конд}$ уравнением теплового баланса [4]:

$$Q_e = Q_{e\dot{r}\dot{a}} + \dot{I} c_2 t_2 + L_0 c_0 t_0 - L_1 c_1 t_1. \quad (4)$$

$$Q_{конд} = D r_2 = \Pi(R+1)r_2. \quad (5)$$

Так как тепловые потоки, входящие с исходной смесью ($L_1 c_1 t_1$) и выходящие с продуктами ($\Pi c_2 t_2 + L_0 c_0 t_0$), примерно одинаковы (при условии подачи исходной смеси при температуре кипения, что и реализуется в большинстве случаев), то можно принять тепловую нагрузку в кипяtilьнике Q_k равной тепловой нагрузке в конденсаторе $Q_{конд}$. Фактически это означает, что поток флегмы, возвращаемый в колонну, целиком испаряется в кипяtilьнике. Благодаря этому допущению можно считать, что затраты теплоты в режиме работы колонны с минимальным флегмовым числом R_{min} равны:

$$Q_k = \Pi(R_{min} + 1)r_2. \quad (6)$$

Наиболее экономичные режимы ректификации по своим параметрам близки к режиму минимальной флегмы [6]. Для теоретической оценки затрат теплоты на ректификацию прием, что смесь является идеальной и подчиняется закону Рауля [4].

Как известно, коэффициент относительной летучести компонентов разделяемой смеси α изменяется от 1 (разделение невозможно) до ∞ (когда тяжелокипящий компонент является практически нелетучим). Но, на наш взгляд, более удобной является другая характеристика, называемая разделяемостью смеси методом испарения:

$$P = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1}. \quad (7)$$

Она изменяется в пределах от 0 (при $\alpha = 1$) до 1 (при $\alpha = \infty$).

При минимальном флегмовом числе

$$R_{min} = \frac{x_2 - y_1^p}{y_1^p - x_1}. \quad (8)$$

и с учетом (4) и (8) получаем [7] выражение следующего вида для минимальных удельных затрат теплоты в кипяtilьнике (в расчете на 1 кмоль исходной смеси):

$$q_k^{min} = \frac{q_k^{min}}{L_1} = E r_2 \left(x_1 + \frac{(1-P)}{2P} \right). \quad (9)$$

Из выражения (9) отчетливо видна прямо-пропорциональная зависимость удельных затрат теплоты q_k^{min} от критерия разделения E и теплоты парообразования r_2 верхнего продукта. На величину q_k^{min} также влияет состав x_1 и разделяемость P исходной смеси. Приведем выражение (9) к виду

$$\frac{q_k^{min}}{E} = r_2 \left(x_1 + \frac{(1-P)}{2P} \right), \quad (10)$$

характеризующему минимальные удельные (на 1 кмоль исходной смеси) затраты теплоты, необходимые для полного разделения смеси.

В частном случае, принимая концентрацию НКК в исходной смеси x_1 равной 0.5, получаем:

$$\frac{q_k^{min}}{E} = r_2 \left(\frac{1}{2} + \frac{(1-P)}{2P} \right) = \frac{r_2}{2P}, \quad (11)$$

то есть величина удельных затрат в этом случае обратно пропорциональна разделяемости смеси P .

Результаты расчета относительных удельных затрат теплоты, считая на полное разделение смеси, приведены в табл. 2. Относительные удельные затраты теплоты на разделение бинарной смеси – это безразмерные числа, показывающие относительное увеличение (уменьшение) затрат теплоты по сравнению с теплотой испарения исходной смеси.

Таблица 2. Значения относительных удельных затрат теплоты $\frac{q_k^{min}}{E r_2}$ при различных значениях разделяемости P и концентрации x_1

x_1	P											
	0	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0.1	∞	9.6	4.6	2.1	1.267	0.85	0.6	0.433	0.314	0.225	0.156	0.1
0.2	∞	9.7	4.7	2.2	1.367	0.95	0.7	0.533	0.414	0.325	0.256	0.2
0.3	∞	9.8	4.8	2.3	1.467	1.05	0.8	0.6333	0.514	0.425	0.356	0.3
0.4	∞	9.9	4.9	2.4	1.567	1.15	0.9	0.733	0.614	0.525	0.456	0.4
0.5	∞	10	5	2.5	1.667	1.25	1	0.833	0.714	0.625	0.556	0.5
0.6	∞	10.1	5.1	2.6	1.767	1.35	1.1	0.933	0.814	0.725	0.656	0.6
0.7	∞	10.2	5.2	2.7	1.867	1.45	1.2	1.033	0.914	0.825	0.756	0.7
0.8	∞	10.3	5.3	2.8	1.967	1.55	1.3	1.133	1.014	0.925	0.856	0.8
0.9	∞	10.4	5.4	2.9	2.067	1.65	1.4	1.233	1.114	1.025	0.956	0.9

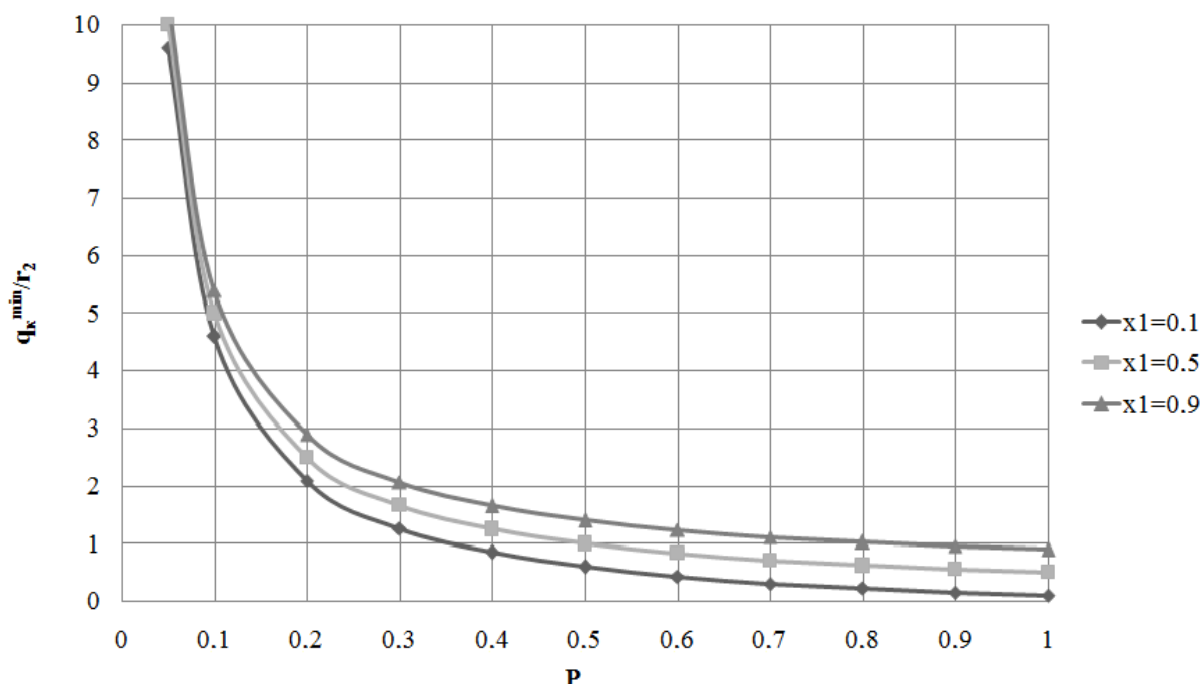


Рис. 2. Зависимость относительных удельных затрат теплоты $\frac{q_k^{\min}}{Er_2}$ от разделяемости P смеси

при $x_1=0.1$, $x_1=0.5$, $x_1=0.9$.

Зависимости относительных удельных затрат теплоты $\frac{q_k^{\min}}{Er_2}$ от разделяемости P при некоторых составах исходной смеси представлены на рис. 2.

Для легкоразделяемых смесей ($P \rightarrow 1$) удельный расход теплоты можно определить как:

$$\frac{q_k^{\min}}{E} = r_2 x_1. \quad (12)$$

Данное выражение удобно использовать для расчета удельных расходов теплоты при выпаривании растворов солей. Разделяемость подобных бинарных смесей равна единице, что соответствует коэффициенту относительной летучести растворителя к соли $\alpha = \infty$.

В этом случае относительные затраты теплоты $\frac{q_k^{\min}}{Er_2}$ численно точно совпадают со значением концентрации НКК в исходной смеси x_1 и увеличиваются в 9 раз при изменении x_1 от 0.1 до 0.9 кмоль НКК/кмоль смеси.

При малых значениях P уменьшается вклад x_1 в конечный результат расчета по (10) минимальных удельных затрат теплоты. При $P < 0.1$ (коэффициент относительной летучести $\alpha < 1.2$) величиной x_1 можно пренебречь с несущественной погрешностью. Тогда выражение для минимальных удельных затрат теплоты примет такой же вид, как и в случае $x_1 = 0.5$:

$$\frac{q_k^{\min}}{E} = \frac{r_2}{2P}. \quad (13)$$

При маленьких разделяемостях смеси P (0.05 – 0.1) затраты теплоты на разделение увеличиваются в несколько раз. Чем меньше разделяемость смеси P , тем больше удельный расход теплоты $\frac{q_k^{\min}}{Er_2}$ на единицу разделения

при ректификации. Так, в случае $x_1 = 0.5$ при разделяемости $P = 0.1$ минимальные затраты на ректификацию увеличиваются ровно в 10 раз по сравнению с затратами на разделение смеси с разделяемостью $P = 1$ (относительная летучесть компонентов $\alpha = \infty$). Увеличение затрат теплоты на ректификацию при уменьшении разделяемости смеси связано с увеличением минимального (и рабочего) флегмовых чисел и, соответственно, ростом потока флегмы, которую необходимо испарять в кубе колонны.

При небольших концентрациях x_1 влияние разделяемости смеси P на затраты теплоты усиливается. Так, при $x_1 = 0.1$ с уменьшением разделяемости P от 1 до 0.1 минимальные затраты увеличиваются в 46 раз. А при $x_1 = 0.9$ с уменьшением разделяемости смеси P от 1 до 0.1 затраты теплоты увеличиваются уже не так значительно (лишь в 6 раз).

Практически одинаковые затраты на разделение смеси с изменением x_1 от 0.1 до 0.9 кмоль НКК/кмоль смеси при малых разделяемостях смесей P объясняются большим внутренним энергосбережением процесса ректификации [6].

При средней разделяемости смеси ($0.4 \leq P \leq 0.6$), что соответствует смеси бензол-толуол при атмосферном давлении, и концентрациях НКК в

исходной смеси, близких к 0.5 кмоль НКК/кмоль смеси, относительные удельные затраты соизмеримы со скрытой теплотой парообразования смеси. Важно отметить, что этих затрат теплоты в кипятильнике достаточно для разделения исходной смеси на практически чистые компоненты. Для получения чистых компонентов требуется, естественно, большее число тарелок в колонне. Чем больше число тарелок в колонне и флегмовое число, с которым работает колонна, тем больше внутреннее энергосбережение в процессе ректификации [7]. Этим и объясняется тот факт, что для практически полного разделения смеси часто достаточно затрачивать в кипятильнике

колонны лишь одну теплоту парообразования исходной смеси [7].

В заключение отметим, что расчетный эксперимент, выполненный с помощью программных обеспечений PRO-II ver. 7.1 и HYSYS ver. 3.2, показал [8], что суммарные затраты теплоты при разделении трехкомпонентной исходной смеси бензол-толуол-ксилол в равных долях (0.333; 0.333 и 0.334) на практически чистые компоненты (содержание целевого компонента в продуктах разделения равно 98%) составляют около двух теплот испарения исходной смеси, то есть по одной теплоте испарения в каждой колонне.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Halvorsen I.J., Skogestad S. Energy efficient distillation // J. Nat. Gas Sci. & Eng. 2011. V. 3(4). P. 571–580.
2. Lucia A., McCallum B.R. Energy targeting and minimum energy distillation column sequences // Comp. & Chem. Eng. 2010. V. 34. P. 931–942.
3. Серафимов Л.А., Хахин Л.А., Мавлеткулова П.О. Сравнительный анализ универсальных критериев оптимизации процесса ректификации // Теор. основы хим. технологии. 2011. Т. 45. № 6. С. 634–640.
4. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А., Захаренко В.В., Зиновкина Т.В., Таран А.Л., Костянян А.Е. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: в 2-х кн. / Под ред. В.Г. Айнштейна. М.: Университетская книга, Логос, Физматкнига, 2006. Кн. 1. 912 с. Кн. 2. 872 с.
5. Kohei Ogawa. Chemical Engineering: A New Perspective. – Netherlands: Elsevier, 2007. P. 81–94.
6. Петлюк Ф.Б., Серафимов Л.А. Многокомпонентная ректификация. Теория и расчет. М.: Химия, 1983. 304 с.
7. Захаров М.К. Энергозатраты и энергосбережение при разделении жидких смесей методом перегонки // Вестник МИТХТ. 2009. Т. 4. № 1. С. 60–63.
8. Захаров М.К., Довбиш А.А. Энергозатраты и энергосбережение при ректификации бинарных и трехкомпонентных смесей // Вестник МИТХТ. 2010. Т. 5. № 6. С. 9–12.

ESTIMATION OF SEPARATION QUALITY AND COSTS OF HEAT IN RECTIFICATION PROCESSES

M.K. Zakharov, Mohand Abbasy, E.N. Zvereva[@]

M.V. Lomonosov Moscow State University of Fine Chemical Technology, Moscow, 119571 Russia

[@]*Corresponding authore-mail: lenazvereva724@gmail.com*

Different criteria for the quantification of the quality of binary mixtures separation by rectification were compared. The best criterion for the binary mixtures was selected. The unit energy costs in the case of rectification of binary mixtures with different separabilities and the compositions of the initial mixture were found. It is shown that due to the internal energy saving in the processes of rectification the average separability of mixtures (40 to 60%) the unit cost of heat in the reboiler is close to the latent heat of vaporization of the mixtures. In this case the purity of shared components is 98%.

Key words: *rectification, energy consumption, reflux ratio, separation quality, criterion of separation.*