

ЭНЕРГОЗАТРАТЫ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ РЕКТИФИКАЦИИ БИНАРНЫХ И ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ

*М. К. Захаров, профессор, А. А. Довбиш, студент
кафедра Процессы и аппараты химической технологии им. Н.И. Гельперина
МИТХТ им. М.В. Ломоносова
e-mail: mkzakharov@mtu-net.ru*

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
Influence of difficulty of separation for energy cost in distillation and rectification was studied. It was shown that energy saving depends on reflux ratio

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

Key words: criterion of separation, difficulty of separation, energy cost, energy saving, rectification, reflux ratio.

Среди существующих методов разделения жидких смесей (кристаллизация, дистилляция, ректификация, мембранное разделение и др.) процессы перегонки являются одними из самых энергоемких [1–3]. На этот метод разделения идут в тех случаях, когда другие методы оказываются неприемлемыми. Энергоемкость 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 чистоты 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 [3].

При разделении L_1 бинарной смеси низкокипящего компонента (НКК) и высококипящего (ВКК) (с мольной концентрацией НКК в ней x_1) на верхний продукт в количестве P с преимущественным содержанием в нем НКК – x_2 , и нижний продукт в количестве L_0 с незначительным содержанием НКК – x_0 технологический критерий разделения E по верхнему продукту может быть рассчитан по формуле [4]:

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

Критерий разделения E , согласно выражению (1) зависит лишь от концентрации НКК 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 работе [4] 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 этой бинарной 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).

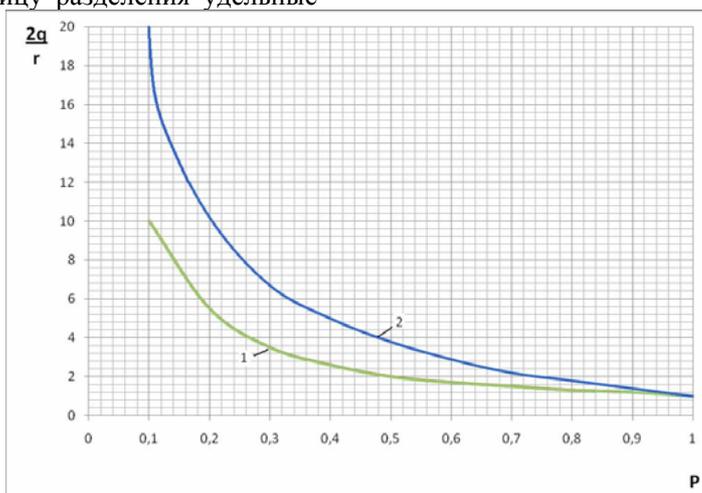


Рис. 1. Затраты теплоты на разделение методами ректификации (кривая 1) и непрерывной дистилляции (кривая 2).

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.

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]:

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

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

$$y_1^p = \frac{(1+P) \cdot 0.5}{1-P+P} = \frac{1+P}{2} \quad (8)$$

Тогда

$$R_{\min} = \frac{x_2 - (1+P)/2}{(1+P)/2 - 0.5} = \frac{2x_2 - 1 - P}{P} \quad (9)$$

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 $x_2 = 0.99$ представлена на рис. 2.

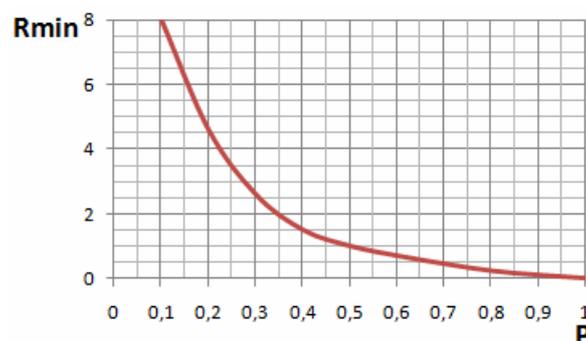


Рис. 2. Зависимость минимального флегмового числа от разделяемости смеси.

Из рис. 2 видно, что при уменьшении разделяемости смеси R_{\min} увеличивается, что сопровождается ростом затрат теплоты в кубе, т. к. $Q_k \approx \Pi(\sigma R_{\min} + 1)$.

В работах [3–7] также показано, что с увеличением флегмового числа повышается энергосбережение процесса ректификации. В табл. 1 приведены некоторые результаты расчетов разделения смеси бензол-толуол с получением в дистилляте 98% бензола и в кубовом продукте – 98% толуола. При одинаковых критериях разделения E , но различных составах исходной смеси x_1 большим значениям флегмового числа соответствуют меньшие затраты теплоты в кубе. Так, например, при $E=0.9141$ и флегмовом числе $R=4.333$ затраты теплоты составляют 351 кВт, а при $R=0.772$ затраты теплоты равны 554 кВт.

Таблица 1.

| Величина | $x_j=0.2$ | $x_j=0.8$ | $x_j=0.3$ | $x_j=0.7$ | $x_j=0.4$ | $x_j=0.6$ |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Критерий разделения E | 0.9141 | | 0.9444 | | 0.9566 | |
| Флегмовое число R | 4.333 | 0.772 | 2.890 | 1.012 | 2.143 | 1.279 |
| Поток продукта Π , кг/с | 0.165 | 0.787 | 0.260 | 0.675 | 0.359 | 0.566 |
| Поток пара из колонны $D = \Pi(R + 1)$, кг/с | 0.878 | 1.395 | 1.011 | 1.357 | 1.127 | 1.289 |
| Поток флегмы $L = \Pi R$, кг/с | 0.713 | 0.608 | 0.751 | 0.683 | 0.769 | 0.724 |
| Затраты теплоты, кВт | 351 | 554 | 406 | 545 | 453 | 516 |

Заметим также, что меньшим отношениям L/D соответствуют большие затраты теплоты в кубе. Это полностью отвечает выводам из теоретического анализа энергосбережения при ректификации [5].

Для выявления влияния флегмового числа на энергосбережение при ректификации тройных смесей были обчисланы две схемы разделе-

ния. В качестве исходной была выбрана смесь бензол-толуол-ксилол (33, 33, 34% мольные, соответственно) с расходом $L_j=1$ кмоль/с. Чистота получаемых продуктов: 98% мольн. для всех компонентов смеси (бензол, толуол, ксилол). При расчете использовали программные обеспечения HYSYS ver. 3.2 и PRO-II ver. 7.1.

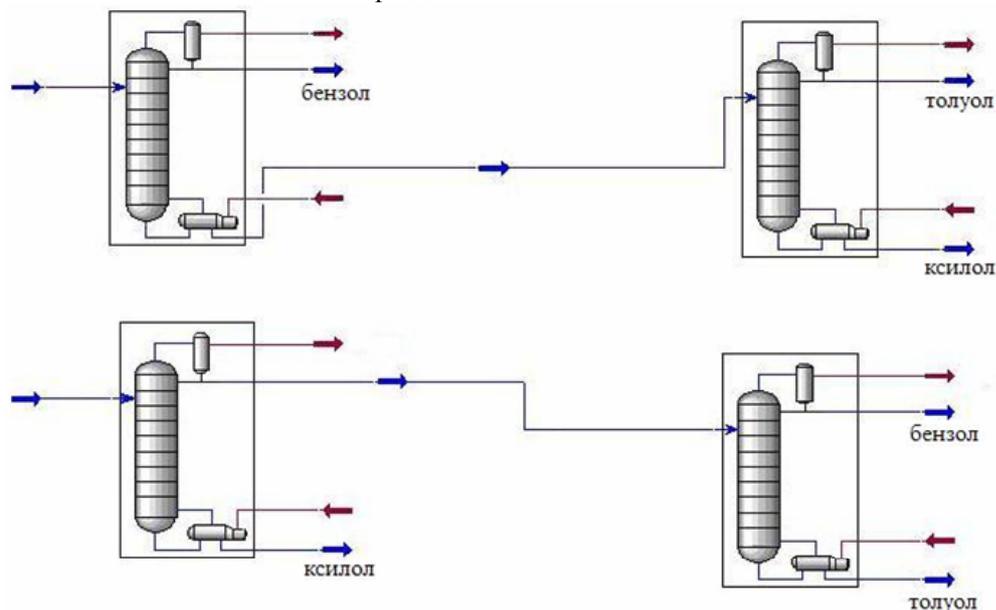


Рис. 3. Первое и второе заданные разделения.

Результаты расчетов представлены в табл. 2 и 3. Отметим, прежде всего, далеко не идеальное совпадение результатов расчета по использованным программам.

Важно сравнить суммарные затраты теплоты на разделение по обоим вариантам. Более показательными являются результаты, полученные с использованием программы PRO-II ver. 7.1.

При практически одинаковых флегмовых числах во второй колонне (2.47 ÷ 2.78 в первом заданном разделение и 2.63 ÷ 2.87 – во втором)

существенно большие флегмовые числа в первой колонне (от 2.08 до 3.05 в первом заданном разделение) в сравнении со значениями от 0.798 до 1.24 – при втором, обеспечивают большее энергосбережение и, следовательно, меньшие суммарные затраты. Например, при давлении в первой колонне 0.1 МПа, одинаковом числе тарелок в каждой из двух колонн суммарные затраты теплоты по первому заданному разделение равны 71700 кВт при $R_1=2.08$, а по второму – 77840 кВт при $R_1=0.798$.

Таблица 2. Расчет с помощью PRO – II ver. 7.1.

Первое заданное разделение

| № п/п | Первая колонна | | | Вторая колонна | | Суммарный расход тепла на процесс $Q_{\Sigma} \cdot 10^{-4}$, кВт |
|-------|----------------|--|-----------------|--|-----------------|--|
| | Давление, МПа | Теплота куба 1-й колонны $Q_1 \cdot 10^{-4}$, кВт | Флегмовое число | Число тарелок – 20 Давление = 0.1 МПа Теплота куба 2-й колонны $Q_2 \cdot 10^{-4}$, кВт | Флегмовое число | |
| 1. | 0.1 | 3.261 | 2.08 | 3.909 | 2.47 | 7.170 |
| 2. | 0.15 | 3.714 | 2.33 | 3.794 | 2.56 | 7.508 |
| 3. | 0.2 | 4.109 | 2.57 | 3.715 | 2.64 | 7.824 |
| 4. | 0.25 | 4.467 | 2.81 | 3.649 | 2.71 | 8.116 |
| 5. | 0.3 | 4.806 | 3.05 | 3.598 | 2.78 | 8.404 |

Второе заданное разделение

| № п/п | Первая колонна Число тарелок – 20 | | | Вторая колонна Число тарелок – 20 Давление = 0.1 МПа | | Суммарный расход тепла на процесс $Q_{\Sigma} \cdot 10^{-4}$, кВт |
|----------|--------------------------------------|---|--------------------|--|--------------------|---|
| | Давление, МПа | Теплота куба 1-й колонны $Q_1 \cdot 10^{-4}$, кВт | Флегмовое число | Теплота куба 2-й колонны $Q_2 \cdot 10^{-4}$, кВт | Флегмовое число | |
| 1. | 0.1 | 4.080 | 0.798 | 3.704 | 2.63 | 7.784 |
| 2. | 0.15 | 4.517 | 0.913 | 3.626 | 2.71 | 8.143 |
| 3. | 0.2 | 4.886 | 1.02 | 3.570 | 2.77 | 8.456 |
| 4. | 0.25 | 5.224 | 1.13 | 3.524 | 2.83 | 8.748 |
| 5. | 0.3 | 5.542 | 1.24 | 3.484 | 2.87 | 9.026 |

Таблица 3. Расчёт с помощью HYSYS ver. 3.2.

Первое заданное разделение.

| № п/п | Первая колонна Число тарелок – 20 | | | Вторая колонна Число тарелок – 20 Давление = 0.1 МПа | | Суммарный расход тепла на процесс $Q_{\Sigma} \cdot 10^{-4}$, кВт |
|----------|--------------------------------------|---|--------------------|--|--------------------|---|
| | Давление, МПа | Теплота куба 1-й колонны $Q_1 \cdot 10^{-4}$, кВт | Флегмовое число | Теплота куба 2-й колонны $Q_2 \cdot 10^{-4}$, кВт | Флегмовое число | |
| 1. | 0.1 | 3.619 | 2.42 | 4.443 | 3.00 | 8.062 |
| 2. | 0.15 | 3.962 | 2.85 | 4.341 | 3.11 | 8.303 |
| 3. | 0.2 | 4.274 | 3.25 | 4.264 | 3.19 | 8.538 |
| 4. | 0.25 | 4.572 | 3.65 | 4.202 | 3.26 | 8.774 |
| 5. | 0.3 | 4.867 | 4.04 | 4.150 | 3.33 | 9.017 |

Второе заданное разделение

| № п/п | Первая колонна Число тарелок – 20 | | | Вторая колонна Число тарелок – 20 Давление = 0.1 МПа | | Суммарный расход тепла на процесс $Q_{\Sigma} \cdot 10^{-4}$, кВт |
|----------|--------------------------------------|---|--------------------|--|--------------------|---|
| | Давление, МПа | Теплота куба 1-й колонны $Q_1 \cdot 10^{-4}$, кВт | Флегмовое число | Теплота куба 2-й колонны $Q_2 \cdot 10^{-4}$, кВт | Флегмовое число | |
| 1. | 0.1 | 5.043 | 1.25 | 3.130 | 2.04 | 8.173 |
| 2. | 0.15 | 5.501 | 1.52 | 3.033 | 2.10 | 8.534 |
| 3. | 0.2 | 5.954 | 1.80 | 2.959 | 2.15 | 8.913 |
| 4. | 0.25 | 6.421 | 2.08 | 2.899 | 2.20 | 9.320 |
| 5. | 0.3 | 6.917 | 2.38 | 2.849 | 2.24 | 9.766 |

ЛИТЕРАТУРА:

1. Комиссаров, Ю. А., Гордеев Л. С., Вент Д. П. Научные основы процессов ректификации : учеб. пособие для вузов : в 2 т. / Ю. А. Комиссаров, Л. С. Гордеев, Д. П. Вент ; под ред. Л. А. Серафимова. – М. : Химия, 2004. – Т. 2. – 416 с.
2. Фролкова, А. К. Энтропийная оценка ректификации бинарных смесей при различных вариантах расчета процесса / А. К. Фролкова, Л. А. Хахин // Вестник МИТХТ. – 2008. – Т 3, № 2. – С. 53–61.
3. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии : в 2 кн. / В. Г. Айнштейн, М. К. Захаров, Г. А. Носов, В. В. Захаренко, Т. В. Зиновкина, А. Л. Таран, А. Е. Костанян ; под ред. В. Г. Айнштейна. – М. : Университетская книга, Логос, Физматкнига, 2006. – Кн. 1. – 912 с. Кн. 2. – 872 с.
4. Захаров, М. К. О затратах теплоты при разделении бинарных смесей методами перегонки / М. К. Захаров, Н. В. Ряднинская // Вестник МИТХТ. – 2006. – Т. 1, № 2. – С. 62–66.
5. Захаров, М. К. Энергосбережение при ректификации идеальных бинарных смесей / М. К. Захаров, А. С. Козлова // Вестник МИТХТ. – 2007. – Т. 2, № 6. – С. 56–62.
6. Захаров, М. К. Энергозатраты и энергосбережение при разделении жидких смесей методами перегонки / М. К. Захаров // Вестник МИТХТ – 2009. – Т. 4, № 1. – С. 60–63.
7. Захаров М. К. Возможности энергосбережения в массообменных процессах с испарением жидкости / М. К. Захаров // Энциклопедия инженера-химика. – 2009. – № 5. – С. 23–27.