

РАСЧЕТ МИНИМАЛЬНОГО ФЛЕГМОВОГО ЧИСЛА ПРИ РЕКТИФИКАЦИИ НЕКОТОРЫХ РЕАЛЬНЫХ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ

М.К. Захаров[@], профессор, А.А. Швец, студент, А.А. Бойчук, студент

Московский технологический университет (Институт тонких химических технологий),
Кафедра процессов и аппаратов химической технологии им. Н.И. Гельперина,
Москва, 119571 Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: mkzakharov@gmail.com

Рассмотрены методы расчета минимального флегмового числа для реальных бинарных смесей с возможностью образования пинч-режимов. Доказано, что при наличии пинч-режима в укрепляющей колонне величина минимального флегмового числа не зависит от агрегатного состояния исходной смеси. В случае пинч-режима в отгонной колонне получена формула для расчета минимального флегмового числа, учитывающая энергетический уровень исходной смеси.

Ключевые слова: ректификация, реальные бинарные смеси, минимальное флегмовое число, пинч-режим.

CALCULATION OF THE MINIMUM REFLUX RATIO FOR VARIOUS CASES OF RECTIFICATION OF BINARY MIXTURES

M.K. Zakharov[@], A.A. Shvets, A.A. Boichuk

Moscow Technological University (Institute of Fine Chemical Technologies),
Moscow, 119571 Russia

[@]Corresponding author e-mail: mkzakharov@gmail.com

The methods of calculation of the minimum reflux ratio for actual binary mixtures with the possibility of formation of the pinch modes was considered. It is proved that in the presence of the pinch mode in the product-concentrating column the value of the minimum reflux ratio doesn't depend on the aggregate state of the initial mixture. In the case of pinch mode in the stripping column a formula for calculating the minimum reflux ratio taking into account the energy level of the initial mixture is obtained.

Keywords: rectification, actual binary mixtures, minimum reflux ratio, pinch mode.

Затраты теплоты в кипятильнике Q_k ректификационной колонны при разделении жидких смесей определяются из теплового баланса установки и рассчитываются по формуле [1]:

$$Q_k = \Pi(R+1)r_2 + \Pi c_2 t_2 + L_0 c_0 t_0 - L_1 c_1 t_1. \quad (1)$$

Первое слагаемое в правой части представляет собой отвод теплоты в конденсаторе и, как правило, является определяющим затраты теплоты в кипятильнике [1]. Для расчета затрат теплоты в кипятильнике необходимо знать материальные и тепловые потоки как вне, так и внутри колонны. При заданных параметрах исходной смеси и требуемой чистоте продуктов разделения величины продуктовых потоков Π и L_0 определяются материальными балансами, а внутренние (в колонне) потоки жидкости $L = \Pi R$ и пара $D = \Pi(R+1)$, а, следовательно, и затраты теплоты в

кипятильнике, зависят от флегмового числа $R = \sigma R_{\min}$. Важнейшей задачей при расчете ректификационных колонн является выбор оптимального значения R , а для этого необходимо уметь правильно рассчитывать его минимальное значение $R_{\min}$. Коэффициент избытка флегмы σ определяется из технико-экономического расчета.

В научной литературе вопросу расчета минимальной флегмы уделено большое внимание [2–10]. Эта задача существенно усложняется при разделении многокомпонентных смесей. Наиболее полный обзор методов расчета минимального флегмового числа при ректификации многокомпонентных смесей приведен в [2]. Там же предложен новый алгоритм расчета минимальной флегмы в ректификационных колоннах при разделении многокомпонентных как идеальных, так и неидеальных гомогенных смесей с особым фазовым равновесием: наличие азеотропов,

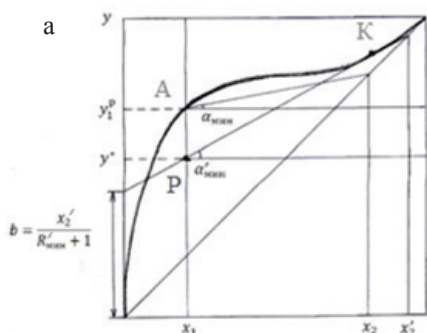
тангенциального пинча, а также при использовании неадиабатических колонн.

Задача расчета минимального флегмового числа при ректификации бинарных смесей существенно проще.

Известно [1], что минимальное флегмовое число $R_{\min}$ для большинства реальных смесей при их подаче в колонну при температуре кипения зависит лишь от состава исходной смеси и получаемого дистиллята x_2 и рассчитывается по формуле:

$$R_{\min} = \frac{x_2 - y_1^p}{y_1^p - x_1}, \quad (2)$$

где y_1^p – состав пара, равновесный жидкости состава x_1 (рис. 1а). При других энергетических уровнях исходной смеси точка А, определяющая тангенс угла наклона рабочей линии укрепляющей колонны, смещается по линии равновесия вправо – при подаче в колонну недогретой до кипения исходной смеси и влево – в случаях парожидкостной смеси, насыщенного пара и перегретого пара. Это приводит к снижению $R_{\min}$ при питании колонны недогретой до насыщения исходной смесью и, наоборот, к увеличению $R_{\min}$ – при увеличении доли пара $\Psi = 1 - E$ в исходной смеси. Координаты точек А для идеальных смесей найдены аналитически [10] путем совместного решения уравнений фазового равновесия и тарелки питания. Уравнение тарелки питания – это прямая линия, на которой лежат сопряженные (рабочие) составы фаз на тарелке питания. Она проходит через точку на диагонали, имеющую абсциссу x_1 , и пересекает ось абсцисс в точке x_1/E .



Однако для некоторых бинарных смесей известные методы расчета минимальной флегмы не подходят.

В работе [9] подробно рассмотрены особые случаи расчета минимального флегмового числа при ректификации бинарных смесей с возможностью возникновения пинч-режимов, когда рабочие линии укрепляющей или отгонной колонн касаются линии фазового равновесия (рис. 1). Для расчета минимального флегмового числа в этих случаях предложены два выражения, которые базируются на координатах точек К и Р [9].

Следует отметить, что возможен и третий вариант расчета $R_{\min}$, а именно – по отрезку b , отсекаемому рабочей линией укрепляющей колонны на оси ординат: $b = x_2 / (R_{\min} + 1)$, откуда следует:

$$R_{\min} = x_2 / b - 1. \quad (3)$$

Вопрос о влиянии энергетического уровня исходной смеси на величину минимального флегмового числа для реальных бинарных смесей с возможным возникновением пинч-режимов не рассматривался. Поэтому целью настоящей работы является разработка метода расчета минимального флегмового числа для реальных бинарных смесей с возможным возникновением пинч-режимов при различном агрегатном состоянии исходной смеси.

При заданных составах исходной смеси x_1 и верхнего продукта x_2 тангенс угла $\alpha_{\min}$ рабочей линии (рис. 1а) определяется выражением:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\min} = \frac{R_{\min}}{R_{\min} + 1} = \frac{x_2 - y_1^p}{x_2 - x_1}. \quad (4)$$

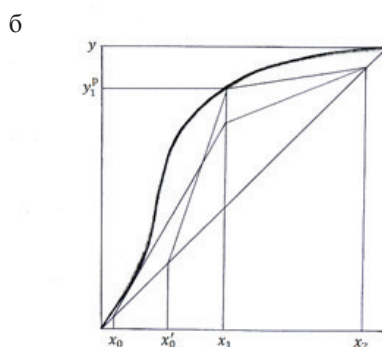


Рис. 1. Кривые равновесия реальных бинарных смесей с возможными пинч-режимам: а – в укрепляющей колонне, б – в отгонной колонне.

Однако для этой же реальной бинарной смеси при составе дистиллята x_2' возникает так называемый пинч-режим, когда минимальное флегмовое число должно быть существенно большим для получения заданного состава верхнего продукта. В этом случае значение $R'_{\min}$ можно найти по значению y^* (рис. 1а). Аналогично выражению (4) можно записать:

$$\operatorname{tg} \alpha'_{\min} = \frac{x_2' - y^*}{x_2' - x_1} = \frac{R'_{\min}}{R'_{\min} + 1}. \quad (5)$$

Откуда следует

$$R'_{\min} = \frac{x_2' - y^*}{y^* - x_1}. \quad (6)$$

Формула (6) идентична приведенной в [9] и используется нами для дальнейшего анализа влияния агрегатного состояния исходной смеси на величину минимального флегмового числа.

При подаче в ректификационную колонну исходной смеси с долей пара Ψ ($0 < \Psi < 1$), в виде перегретого пара ($\Psi > 1$) или недогретой до температуры кипения («холодной») смеси ($\Psi < 0$) точки пересечения рабочих линий укрепляющей и отгонной частей колонны определяются с учетом теплового баланса тарелки питания и величины $E = 1 - \Psi$ [1, 11].

На рис. 2 показана точка М ($x_{пж}^*$, $y_{пж}^*$) пересечения рабочих линий укрепляющей и отгонной части колонны для случая $0 < E < 1$ (парожидкостная смесь) при возникновении пинч-режима.

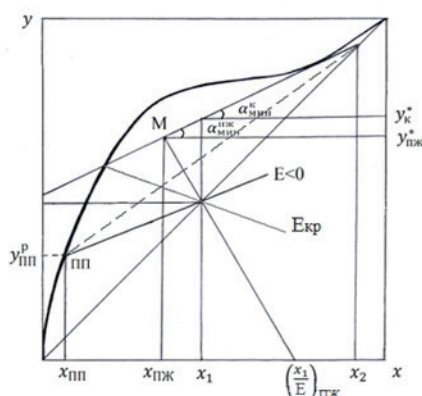


Рис. 2. К расчету минимального флегмового числа при наличии пинч-режима в укрепляющей колонне.

Видно, что тангенс угла наклона $\alpha_{мин}^{пж}$ в этом случае такой же, как и при подаче кипящей жидкости ($\alpha_{мин}^к$). А это значит, что и минимальные флегмовые числа одинаковые:

$$R_{мин}^{пж} = R_{мин}^к = R_{мин}^x = R_{мин}^{пж} \quad (7)$$

Равенства (7) показывают, что минимальное флегмовое число не зависит от агрегатного состояния исходной смеси до тех пор, пока точка пересечения линии тарелки питания с касательной лежит ниже линии равновесия. Но при подаче в колонну парожидкостной смеси с таким большим паросодержанием Ψ , что $E < E_{кр}$, пинч-режим исчезает. Так, например, при подаче перегретого пара ($E < 0$) пинч-режим отсутствует (рабочая линия укрепляющей колонны показана штриховой линией) и минимальное флегмовое число $R_{мин}^{пж}$ будет определяться по точке ПП ($x_{пп}$, $y_{пп}^p$) на рис. 2 с помощью формулы (2).

Пинч-режим может возникнуть и в отгонной части колонны (рис. 1б). Это имеет место, например, при составах исходной смеси x_1 , дистиллята x_2 и кубового продукта x_0 . При x'_0 пинч-режим пропадает, и расчет $R_{мин}$ выполняется по формуле (2).

Следует отметить возможность получения

пинч-режимов в обеих частях колонны. Такого вида равновесные зависимости приведены в [9].

Теперь подробно рассмотрим случай с возможностью возникновения пинч-режима в отгонной части колонны. Точка пересечения рабочих линий укрепляющей и отгонной частей колонны при минимальном флегмовом числе для различных агрегатных состояний исходной смеси находится как точка пересечения касательной из точки с абсциссой x_0 к кривой равновесия и линии тарелки питания, характеризуемой величиной E .

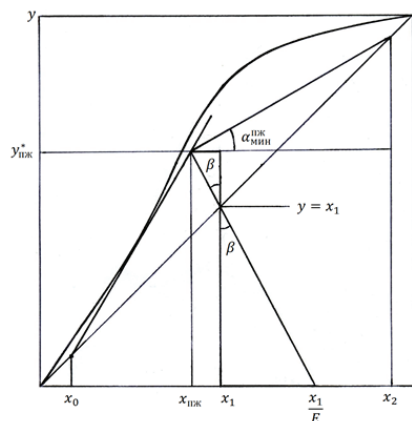


Рис. 3. К выводу формулы (10).

На рис. 3 показано нахождение точки пересечения для случая $0 < E < 1$. Координаты этой точки $x_{пж}^*$, $y_{пж}^*$. Как и ранее, согласно (4):

$$\operatorname{tg} \alpha_{мин}^{пж} = \frac{R_{мин}^{пж}}{R_{мин}^{пж} + 1} = \frac{x_2 - y_{пж}^*}{x_2 - x_{пж}^*} \quad (8)$$

Для нахождения связи $y_{пж}^*$ с $x_{пж}^*$ при различных значениях E запишем выражение для тангенса угла β в нижнем и верхнем прямоугольных треугольниках:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{x_1 - x_1}{x_1} = \frac{1}{E} - 1 = \frac{1 - E}{E};$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{x_1 - x_{пж}^*}{y_{пж}^* - x_1}.$$

Следовательно

$$\frac{1 - E}{E} = \frac{x_1 - x_{пж}^*}{y_{пж}^* - x_1}.$$

После преобразований

$$(1 - E)(y_{пж}^* - x_1) = E(x_1 - x_{пж}^*)$$

$$y_{пж}^* - E y_{пж}^* - x_1 + E x_1 = E x_1 - E x_{пж}^*$$

получаем

$$x_{пж}^* = \frac{x_1 + y_{пж}^*(E - 1)}{E} \quad (9)$$

Согласно формуле (2) имеем:

$$R_{\min}^{\text{пж}} = \frac{x_2 - y_{\text{пж}}^*}{y_{\text{пж}}^* - x_{\text{пж}}^*} = \frac{x_2 - y_{\text{пж}}^*}{y_{\text{пж}}^* - \frac{y_{\text{пж}}^* (E-1) + x_1}{E}} = E \frac{x_2 - y_{\text{пж}}^*}{y_{\text{пж}}^* - x_1} \quad (10)$$

Для любого энергетического уровня исходной смеси формула (10) запишется в виде:

$$R_{\min}^i = E \frac{x_2 - y_i^*}{y_i^* - x_1} \quad (11)$$

где под индексом i : x , k , пж , n , пп подразумеваются, соответственно, холодная смесь, кипящая жидкость, парожидкостная смесь, пар, перегретый пар.

Таким образом, для расчета минимального флегмового числа $R_{\min}^i$ необходимо:

- провести касательную к линии равновесия из точки на диагонали с абсциссой x_0 ;
- при известном составе исходной смеси x_i и значении E , характеризующем её энергетический уровень, провести линию тарелки питания;
- найти ординату y_i^* точки пересечения этих линий;
- рассчитать $R_{\min}^i$ по формуле (11).

С целью выявления зависимости $R_{\min}^i$ от энергетического уровня исходной смеси E и проверки корректности формулы (11) были проведены проверочные расчеты $R_{\min}^i$ через отрезок $b = \frac{x_2}{R_{\min}^i + 1}$, отсекаемый на оси ординат (рис. 4).

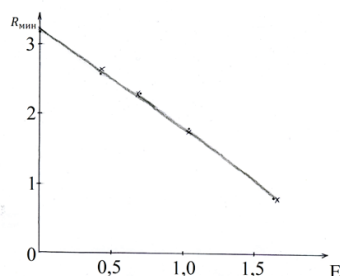


Рис. 4. Зависимость минимального флегмового числа $R_{\min}$ от энергетического уровня исходной смеси при возможности пинч-режима в отгонной части колонны: $\times$ – расчет по формуле (11); $\bullet$ – расчет по отрезку b .

На рис. 4 видно практически полное совпадение значений минимального флегмового числа по двум способам расчета, что доказывает корректность введенной формулы.

Для бинарных смесей с возможностью пинч-режимов в обеих частях колонны (рис. 5) необходимо ориентироваться на ту касательную, точка пересечения с которой дает большее значение минимального флегмового числа. Так, на рис. 5 видно, что при подаче в колонну кипящей жидкости ($E=1$) большее значение $R_{\min}$ определяется верхней касательной.

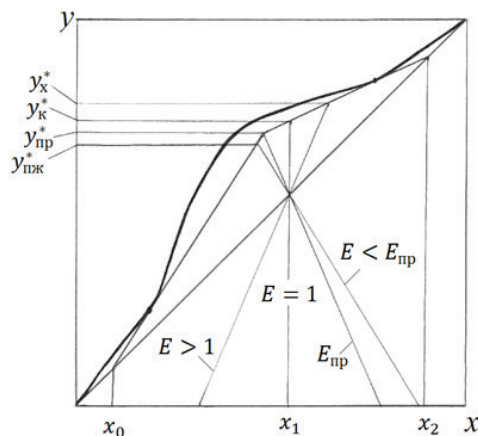


Рис. 5. К расчету минимального флегмового числа при наличии двух пинч-режимов.

Это справедливо для случаев недогретой до кипения исходной смеси и при небольшой доле пара Ψ . При некотором предельном значении $\Psi_{\text{пр}}$ и соответствующем $E_{\text{пр}} = 1 - \Psi_{\text{пр}}$ (при прохождении линии тарелки питания через точку пересечения касательных) правомерны оба расчета. При $E < E_{\text{пр}}$ для расчета $R_{\min}$ необходимо использовать формулу (11).

Список литературы:

1. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. [и др.] Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс: Учебник в 2-х книгах. Под ред. В.Г. Айнштейна, 6-е изд. М.: Теревинф, 2015. С. 1760.
2. Данилов Р.Ю., Петлюк Ф.Б., Серафимов Л.А. // ТОХТ. 2007. Т. 41. № 4. С. 394–406.
3. Серафимов Л.А., Челюскина Т.В., Мавлеткулова П.О. // ТОХТ. 2013. Т. 47. № 4. С. 370–378.
4. Koehler J., Poellmann P., Blass E. // Ind. Eng. Chem. Res. 1995. V. 14. P. 1003–1020.
5. Петлюк Ф.Б., Данилов Р.Ю. // ТОХТ. 1998. Т. 32. № 6. С. 604–616.
6. Fidkowski Z.T., Malone M.F. & Doherty M.F. // AIChE J. 1991. V. 37. № 2. P. 1761–1779.
7. Stichlmair J.G., Offers H. // Ind. Eng. Chem. Res. 1993. V. 32. P. 2438–2445.
8. Petlyuk F.B. Distillation Theory and Its Application to Optimal Design of Separation Units. New York: CUP, 2004. 329 p.
9. Серафимов Л.А., Челюскина Т.В., Мавлеткулова П.О. // ТОХТ. 2013. Т. 47. № 3. С. 286–293.
10. Захаров М.К., Аббаси М. // Вестник МИТХТ. 2012. Т. 7. № 1. С. 41–45.
11. Скобло А.Н., Молоканов Ю.К., Владимиров А.Н., Щелкунов В.А. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии: учебник. М.: Изд. Центр РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2012. 726 с.

References:

1. Ajnshtejn V.G., Zaharov M.K., Nosov G.A., Zaharenko V.V., Taran A.L., Zinovkina T.V., Kostanyan A.E. *Processy i apparaty himicheskoy tekhnologii. Obshchij kurs: v 2-h kn. (The processes and apparatuses of chemical technology. General course: in 2 books)* / Red. by V.G. Ajnshtejna. Ed. 6-e. M.: Terevinf, 2015. 1784 p.
2. Danilov R.Yu., Petlyuk F.B., Serafimov L.A. // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2007. V. 41. № 4. P. 394–406.
3. Serafimov L.A., Chelyuskina T.V., Mavletkulova P.O. // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2013. V. 47. № 4. P. 370–378.
4. Koehler J., Poellmann P., Blass E. // *Ind. Eng. Chem. Res.* 1995. V. 34. P. 1003–1020.
5. Petlyuk F.B., Danilov R.Yu. // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 1998. V. 32. № 6. P. 604–616.
6. Fidkowski Z.T., Malone M.F. & Doherty M.F. // *AIChE J.* 1991. V. 37. P. 1761.
7. Stichlmair J.G., Offers H. & Potthoff R.W. // *Ind. Eng. Chem. Res.* 1993. V. 32. P. 2438–2445.
8. Petlyuk F.B. *Distillation Theory and its Application to Optimal Design of Separation Units*. New York: CUP. 2004. 329 p.
9. Serafimov L.A., Chelyuskina T.V., Mavletkulova P.O. // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2013. V. 47. № 3. P. 286–293.
10. Zaharov M.K., Abbasi M. // *Fine Chem. Tech. (Vestnik MITHT)*. 2012. V. 7. № 1. P. 41–45.
11. Skoblo A.N., Molokanov Yu.K., Vladimirov A.N., Shchelkunov V.A. *Processy i apparaty neftegazopererabotki i neftekhimii (Processes and devices of oil & gas and petrochemistry)*. Textbook. M.: Izd. Centr RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina. 2012. 726 p.