

О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПИТАНИЯ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ ИСХОДНОЙ СМЕСЬЮ В ВИДЕ ПАРА

М.К. Захаров, профессор, Ю.А. Старостина, студент,

Д.Г. Назаров, студент

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

МИТХТ им. М.В. Ломоносова

e-mail: jas-star@km.ru

Проведен анализ затрат теплоты на процесс ректификации с учетом фазового состояния исходной смеси. Найдены условия, при которых экономически целесообразна предварительная конденсация пара перед подачей ее в колонну.

Analysis of heat cost for rectification was performed taking into account the phase state of the original mixture. The conditions, under which pre-condensation of vapour before its inlet into the column is economically expedient, were found.

Ключевые слова: ректификация, затраты теплоты, флегмовое число, кипящая жидкость, исходная смесь в виде пара.

Key words: rectification, energy cost, reflux ratio, boiling liquid, saturated vapour.

Разделение жидких бинарных смесей методом ректификации возможно, как известно [1–4], лишь при затратах теплоты в кипятильнике ректификационной колонны с целью создания парового потока и затратах холода при конденсации выходящих из колонны паров для образования потока флегмы. В большинстве случаев (кроме ректификации при отрицательных температурах) стоимость подводимой для ректификации теплоты на порядок (и более) превышает стоимость организации теплоотвода с помощью охлаждающего агента. Поэтому при оценке энергоемкости процесса будем учитывать лишь затраты теплоты на процесс ректификации, пренебрегая энергозатратами на охлаждение.

Затраты теплоты на процесс ректификации зависят от потока L_1 и состава исходной смеси x_1 (мольная доля низкокипящего компонента (НKK) в смеси), трудности (легкости) ее разделения и требуемой степени разделения, то есть от качества получаемых продуктов: x_2 – концентрация НKK в верхнем продукте и x_0 – концентрация НKK в нижнем продукте. Заметим, что количества получаемых продуктов P и L_0 соответствуют материальным балансам [3, 5]:

по общим потокам:

$$L_1 = L_0 + P \quad (1)$$

по потокам НKK

$$L_1 x_1 = L_0 x_0 + P x_2 \quad (2)$$

Требуемая степень разделения смеси может быть задана также любым из перечисленных ниже наборов величин: L_1, x_1, P, x_2 ; L_1, x_1, L_0, x_0 ; L_1, x_1, P, x_0 ; L_1, x_1, L_0, x_2 . Остальные две величины находятся с помощью системы уравнений (1) – (2).

При подаче исходной смеси в виде кипящей жидкости и не слишком малых флегмовых числах численные значения тепловых потоков в

кипятильнике Q_k и конденсаторе $Q_{\text{конд}}$ примерно одинаковы [1–3].

При подаче исходной смеси в колонну в виде пара ($y_1 = x_1$ кмоль НKK/кмоль см.) может показаться очевидным уменьшение подводимой в кубе колонны теплоты, необходимой для ее разделения с получением тех же верхнего продукта (x_2) и нижнего с концентрацией x_0 . Однако, это не так. Дело в том, что при переходе на питание насыщенным паром (вместо кипящей жидкости) надо учитывать следующее: минимальное, а следовательно, и рабочее флегмовое число возрастает. А это приводит к увеличению затрат теплоты на процесс ректификации. Реальная экономия затрат за счет питания колонны паром может оказаться существенно меньше дополнительных затрат за счет увеличения флегмового числа. Экономически выгодным может оказаться предварительная конденсация пара и подача исходной смеси в виде кипящей жидкости.

О целесообразности в некоторых случаях сначала сконденсировать насыщенный пар и затем подавать конденсат в колонну на разделение впервые указано в [1] и подтверждено на конкретном примере разделения водно-этанольной смеси при малых содержаниях этанола в исходной смеси ($y_1 = 0.05$) и, соответственно, малой доле верхнего продукта от потока исходной смеси. Там же [1] рассмотрен случай с большим содержанием этанола в исходной паровой смеси ($y_1 = 0.371$), когда выгоднее подача насыщенного пара в колонну без предварительной конденсации. Найдено граничное значение разности минимальных флегмовых чисел при питании насыщенным паром и кипящей жидкостью, при котором энергозатраты для обоих рассмотренных случаев одинаковы. Однако в цитируемой работе [1] под легкостью разделения

смеси понимается и величина относительной летучести компонентов и высокое содержание НКК в исходной смеси. На наш взгляд, следует различать легкость (трудность) разделения смеси, связанную с природой взаимодействия молекул компонентов смеси, и требуемую степень разделения смеси. Очевидно, что задача получения высококонцентрированного верхнего продукта облегчается при увеличении содержания НКК в исходной смеси.

В настоящей работе определены условия, при которых выгодна подача исходной бинарной смеси в виде пара или после его конденсации. При этом найдена аналитическая зависимость минимального флегмового числа при питании паром $R_{\min}^{\pi}$ от минимального флегмового числа $R_{\min}^{\kappa}$ – при питании кипящей жидкостью при различной разделяемости смеси P и требуемой степени разделения, определяемой концентрациями x_1 , x_2 и x_0 .

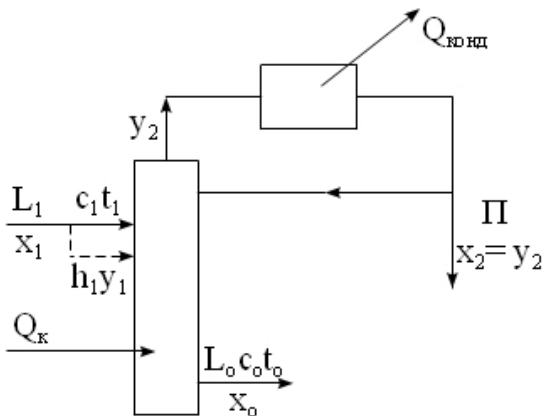


Рис. 1. К тепловому балансу ректификационной колонны.

Тепловой баланс для ректификационной колонны непрерывного действия записывается (рис.1):

при подаче исходной смеси в виде кипящей жидкости

$$Q_{\kappa} + L_1 c_1 t_1 - Q_{\text{конд}} - L_0 c_0 t_0 - P c_2 t_2 = 0 \quad (3)$$

и при подаче пара

$$Q_{\pi} + L_1 h_1 - Q_{\text{конд}} - L_0 c_0 t_0 - P c_2 t_2 = 0. \quad (4)$$

Достаточно часто можно считать [3]

$$L_1 c_1 t_1 = L_0 c_0 t_0 + P c_2 t_2.$$

Тогда из (3) следует

$$Q_{\kappa} = Q_{\text{конд}}. \quad (5)$$

Удельная энтальпия пара h_1 больше удельной энтальпии кипящей жидкости исходной смеси ($c_1 t_1$) на величину скрытой теплоты парообразования r_1 :

$$h_1 = c_1 t_1 + r_1. \quad (6)$$

Тепловой поток в кипятильнике при подаче исходной смеси в виде пара находим из (4) с учетом (6)

$$Q_{\kappa}^{\pi} = Q_{\text{конд}} - L_1 r_1. \quad (7)$$

Тепловой поток в конденсаторе $Q_{\text{конд}}$ зависит [1-5] от флегмового числа R и верхнего продуктового потока Π :

$$Q_{\text{конд}} = \Pi(R+1)\gamma_2. \quad (8)$$

При заданной степени разделения (x_1 , x_2 , x_0) продуктовый поток Π связан с потоком исходной смеси L_1 соотношением, получаемым из материального баланса

$$\Pi = L_1 \frac{x_1 - x_0}{x_2 - x_0}. \quad (9)$$

Рабочее флегмовое число $R = \sigma R_{\min}$, где σ – коэффициент избытка флегмы, $R_{\min}$ – минимальное флегмовое число.

Минимальное флегмовое число зависит от агрегатного состояния исходной смеси (рис.2)

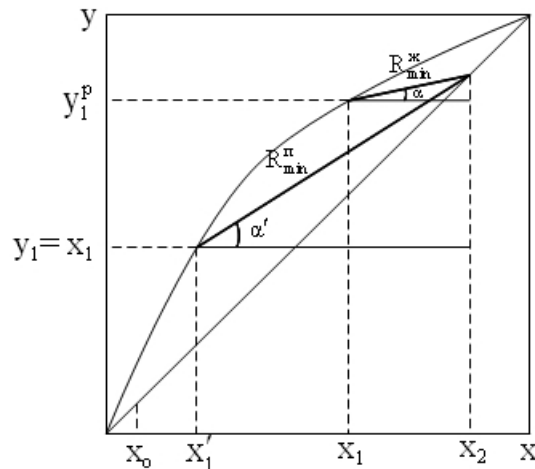


Рис. 2. К расчету минимальных флегмовых чисел.

При подаче в колонну кипящей смеси

$$\text{tg} \alpha = \frac{R_{\min}^{\kappa}}{R_{\min}^{\kappa} + 1} = \frac{x_2 - y_1^p}{x_2 - x_1}. \quad (10)$$

В случае питания колонны насыщенным паром ($y_1 = x_1$)

$$\text{tg} \alpha' = \frac{R_{\min}^{\pi}}{R_{\min}^{\pi} + 1} = \frac{x_2 - x_1}{x_2 - x_1'}. \quad (11)$$

Для идеальной бинарной смеси состава x_1 при разделяемости P (аналог относительной летучести компонентов α : $P = \frac{\alpha-1}{\alpha+1}$) равновесная концентрация НКК в паре определяется выражением [5-7]

$$y_1^p = \frac{(1+P)x_1}{1+P+2Px_1}. \quad (12)$$

Соответствующая составу пара (y_1) равновесная концентрация НКК в жидкости (x_1') находится по формуле

$$x_1' = \frac{(1-P)y_1}{1+P-2Py_1} = \frac{(1-P)x_1}{1+P-2Px_1}. \quad (13)$$

При разделении бинарной смеси минимальное флегмовое число в случае питания

колонны кипящей жидкостью может быть рассчитано из уравнения (10):

$$R_{\min}^{\text{ж}} = \frac{x_2 - y_1^{\text{п}}}{y_1^{\text{п}} - x_1}. \quad (14)$$

Используя равновесную зависимость (12), получаем:

$$R_{\min}^{\text{ж}} = \frac{x_2 - \frac{(1+P)x_1}{1-P+2Px_1}}{\frac{(1+P)x_1}{1-P+2Px_1} - x_1} = \frac{x_2 - Px_2 + 2Px_1x_2 - x_1 - Px_1}{x_1 + Px_1 - x_1 + Px_1 - 2Px_1^2}. \quad (14)$$

После сокращений и преобразований имеем

$$R_{\min}^{\text{ж}} = \frac{x_2(1-P) - x_1(1+P) + 2Px_1x_2}{2Px_1(1-x_1)}. \quad (15)$$

Из (11) следует выражение для минимального флегмового числа при питании колонны насыщенным паром:

$$R_{\min}^{\text{п}} = \frac{x_2 - x_1}{x_1 - x'_1}. \quad (16)$$

Подставляя в (16) выражение (13) для x'_1 , получаем

$$R_{\min}^{\text{п}} = \frac{x_2 - x_1}{x_1 - \frac{(1-P)x_1}{1+P-2Px_1}} = \frac{(x_2 - x_1)(1+P-2Px_1)}{2Px_1(1-x_1)}. \quad (17)$$

Из сопоставления (15) и (17) находим связь между минимальными флегмовыми числами при питании колонны паром ($R_{\min}^{\text{п}}$) и кипящей жидкостью ($R_{\min}^{\text{ж}}$):

$$R_{\min}^{\text{п}} = R_{\min}^{\text{ж}} \frac{(x_2 - x_1)(1+P-2Px_1)}{x_2(1-P) - x_1(1+P) + 2Px_1x_2}. \quad (18)$$

Тепловые потоки в кубе ректификационной колонны составляют:

- при питании колонны паром в соответствии с формулой (7)

$$Q_{\text{к}}^{\text{п}} = \Pi(\sigma_{\min}^{\text{п}} + 1)r_2 - L_1r_1. \quad (19)$$

- при питании нагретой до кипения жидкостью

$$Q_{\text{к}}^{\text{ж}} = \Pi(\sigma_{\min}^{\text{ж}} + 1)r_2. \quad (20)$$

С целью упрощения анализа:

- примем близкими мольные теплоты парообразования компонентов, так что можно считать $r_1 = r_2 = r$;

- будем оперировать удельными расходами теплоты (отнесенными к 1 кмолью исходной смеси).

Тогда, очевидно

$$q_{\text{к}}^{\text{п}} = \frac{Q_{\text{к}}^{\text{п}}}{L_1} = \frac{\Pi}{L_1} [\sigma R_{\min}^{\text{п}} + 1] r - r, \quad (21)$$

$$q_{\text{к}}^{\text{ж}} = \frac{Q_{\text{к}}^{\text{ж}}}{L_1} = \frac{\Pi}{L_1} [\sigma R_{\min}^{\text{ж}} + 1] r. \quad (22)$$

Из материального баланса колонны следует $\frac{\Pi}{L_1} = \frac{x_1 - x_0}{x_2 - x_0}$, так что деля (21) на (22) получаем после сокращения на r :

$$\frac{q_{\text{к}}^{\text{п}}}{q_{\text{к}}^{\text{ж}}} = \frac{\frac{x_1 - x_0}{x_2 - x_0} (\sigma R_{\min}^{\text{п}} + 1) - 1}{\frac{x_1 - x_0}{x_2 - x_0} (\sigma R_{\min}^{\text{ж}} + 1)} = \frac{\sigma R_{\min}^{\text{п}} + 1 - \frac{x_2 - x_0}{x_1 - x_0}}{\sigma R_{\min}^{\text{ж}} + 1} = \frac{\sigma R_{\min}^{\text{п}} - \frac{x_2 - x_1}{x_1 - x_0}}{\sigma R_{\min}^{\text{ж}} + 1}. \quad (23)$$

В зависимости от разделяемой смеси P , требуемой чистоты продуктов разделения (x_2 , x_0) и коэффициента избытка флегмы σ отношение $q_{\text{к}}^{\text{п}}/q_{\text{к}}^{\text{ж}}$ может быть больше, меньше или равно 1. Это наглядно продемонстрировано на рис. 3.

Из рисунка видно, что отношение $q_{\text{к}}^{\text{п}}/q_{\text{к}}^{\text{ж}}$ может быть больше 1 (значительнее – при больших значениях коэффициента избытка флегмы σ).

В этих случаях целесообразна предварительная конденсация паровой смеси перед подачей её в колонну. В частном случае при $\sigma=1$ сравним минимальные затраты теплот в кубе колонны.

$$\frac{q_{\text{к},\min}^{\text{п}}}{q_{\text{к},\min}^{\text{ж}}} = \frac{R_{\min}^{\text{п}} + 1 - \frac{x_2 - x_0}{x_1 - x_0}}{R_{\min}^{\text{ж}} + 1} = \frac{R_{\min}^{\text{п}} - \frac{x_2 - x_1}{x_1 - x_0}}{R_{\min}^{\text{ж}} + 1}. \quad (24)$$

Из (24) следует, что $q_{\text{к},\min}^{\text{п}}/q_{\text{к},\min}^{\text{ж}} > 1$ при

$$R_{\min}^{\text{п}} - R_{\min}^{\text{ж}} > \frac{x_2 - x_0}{x_1 - x_0}.$$

Используя найденные выражения для $R_{\min}^{\text{п}}$ (формула 17) и $R_{\min}^{\text{ж}}$ (формула 15), получаем:

$$\frac{(x_2 - x_1)(1+P-2Px_1) - x_2(1-P) + x_1(1+P) - 2Px_1x_2}{2Px_1(1-x_1)} > \frac{x_2 - x_0}{x_1 - x_0}$$

Упрощаем, раскрывая скобки в числителе левой дроби:

$$\frac{2Px_2 + 2Px_1^2 - 4Px_1x_2}{2Px_1(1-x_1)} > \frac{x_2 - x_0}{x_1 - x_0}$$

Делим числитель и знаменатель левой части на $2P$:

$$\frac{x_2 + x_1^2 - 2x_1x_2}{x_1(1-x_1)} > \frac{x_2 - x_0}{x_1 - x_0}. \quad (25)$$

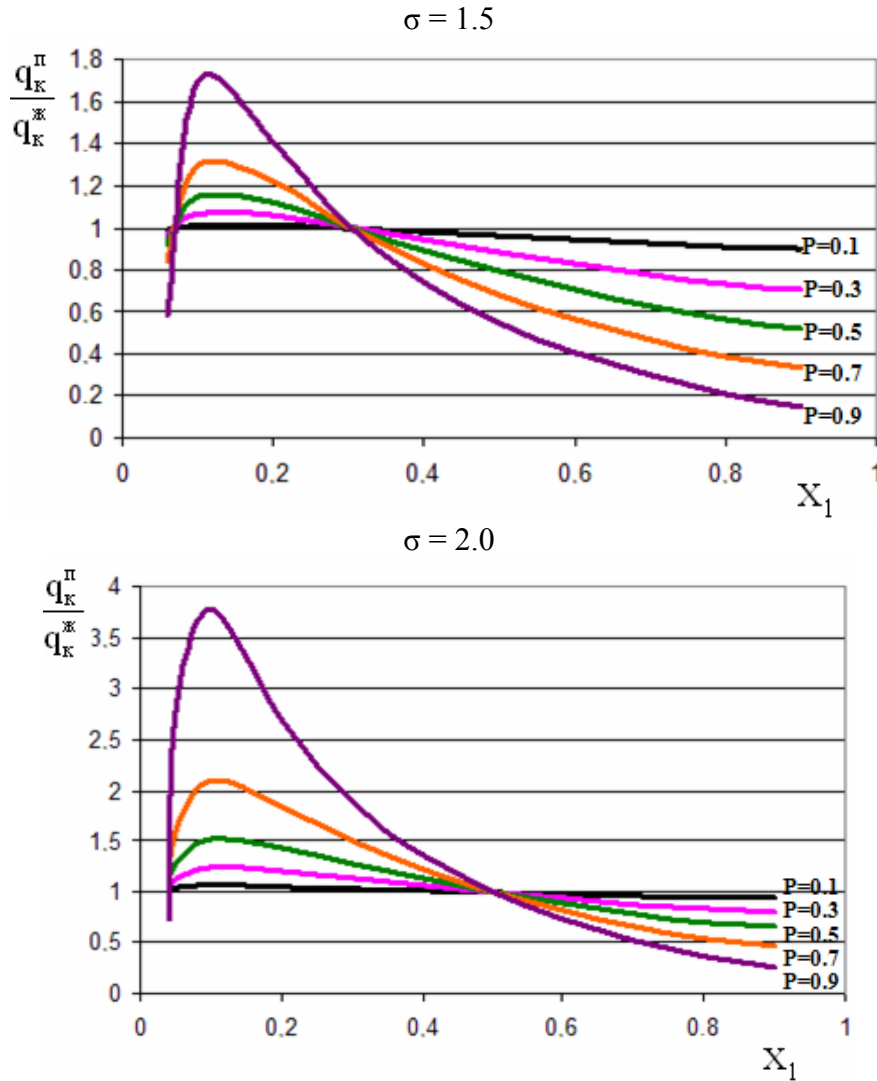


Рис. 3. Отношение $q_k^{\pi}/q_k^{\text{ж}}$ в зависимости от состава x_1 при различных σ и P .
Здесь принято: $x_2=0.98$, $x_0=0.02$

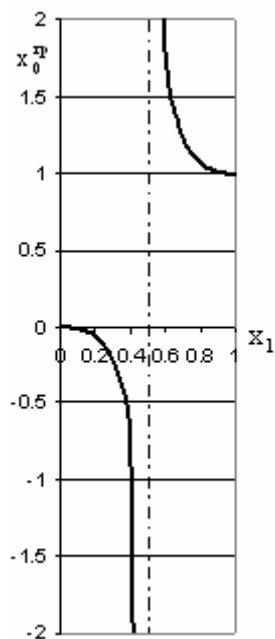
Из (25) видно, что это искомое условие не зависит от разделяемости смеси P , зависит лишь от x_0 (при заданных x_1 и x_2). Найдем граничное значение $x_0^{\text{гр}}$, приравняв правую и левую части неравенства (25):

$$\begin{aligned}
 (x_2 - 2x_1x_2 + x_1^2)x_1 - (x_2 - 2x_1x_2 + x_1^2)x_0^{\text{гр}} &= \\
 = x_2x_1(1 - x_1) - x_0^{\text{гр}}x_1(1 - x_1), &\text{ откуда} \\
 x_0^{\text{гр}} = \frac{x_1x_2 - x_1^2x_2 - x_1x_2 + 2x_1^2x_2 - x_1^3}{x_1(1 - x_1) - x_2 + 2x_1x_2 - x_1^2} = \\
 = \frac{x_1^2x_2 - x_1^3}{x_1 - x_1^2 - x_2 + 2x_1x_2 - x_1^2} = \\
 = \frac{x_1^2(x_2 - x_1)}{x_1 - x_2 - 2x_1^2 + 2x_1x_2} = \\
 = \frac{x_1^2(x_2 - x_1)}{x_1 - x_2 + 2x_1(x_2 - x_1)} = \\
 = \frac{x_1^2(x_2 - x_1)}{(x_2 - x_1)(2x_1 - 1)} = \frac{x_1^2}{2x_1 - 1}.
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

Зависимость $x_0^{\text{гр}}$ от x_1 представлена на рис. 4. Видно, что в области реальных концентраций $0 < x_1 < 1$ для идеальных смесей не существует ни одного значения $x_0^{\text{гр}}$, удовлетворяющего условию $q_k^{\pi}/q_k^{\text{ж}} > 1$. Это значит, что дополнительный подвод теплоты при питании колонны паром превышает увеличение расхода теплоты в кубе за счет большего флегмового числа $R_{\min}^{\pi}$ по сравнению с $R_{\min}^{\text{ж}}$.

Отдельной задачей является нахождение коэффициента избытка флегмы, при котором возможно выполнение условия $q_k^{\pi}/q_k^{\text{ж}} > 1$. Граничное значение коэффициента избытка флегмы $\sigma_{\text{гр}}$ можно найти из (23), принимая его одинаковым для различных состояний исходной смеси:

$$\sigma_{\text{гр}}(R_{\min}^{\pi} - R_{\min}^{\text{ж}}) = \frac{x_2 - x_0}{x_1 - x_0}.$$

Рис. 4. Зависимость X_0^{TP} от x_1 по уравнению (26).

Используя найденную ранее (при выводе неравенства (25)) разность

$$R_{\min}^n - R_{\min}^j = \frac{x_2 + x_1^2 - 2x_1x_2}{x_1(1-x_1)}.$$

Получаем:

$$\sigma_{\text{гр}} = \frac{x_2 - x_0}{x_1 - x_0} \cdot \frac{x_1(1-x_1)}{x_2 + x_1^2 - 2x_1x_2}. \quad (27)$$

Рассчитанные по формуле (27) значения $\sigma_{\text{гр}}$ при различных значениях x_1 , x_2 и x_0 представлены в табл. 1 и на рисунке 5 (при $x_1 = 0.5$).

При учете **дополнительных** затрат теплоты **на испарение** исходной смеси (для одного кмолья это удельная теплота парообразования r) получим:

$$\frac{\sum q_k^n}{q_k^j} = \frac{q_k^n + r}{q_k^j} = \frac{\sigma R_{\min}^n + 1}{\sigma R_{\min}^j + 1}. \quad (28)$$

Из (31) следует, что при одинаковом значении σ суммарный расход теплоты при питании паром всегда больше, чем питании жидкостью, так как всегда $R_{\min}^n > R_{\min}^j$.

Дальнейший анализ формулы (28) проведем при $\sigma = 1$:

$$\frac{\sum q_{k,\min}^n}{q_{k,\min}^j} = \frac{R_{\min}^n + 1}{R_{\min}^j + 1}.$$

Таблица 1. Значение $\sigma_{\text{гр}}$ при различных значениях x_0 и x_2 .

$x_1 = 0.3$								
x_0	x_2							
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	0.98
0.02	1.142	1.247	1.323	1.386	1.432	1.474	1.487	1.494
0.05	1.185	1.306	1.402	1.472	1.545	1.585	1.604	1.625
0.1	1.264	1.454	1.605	1.705	1.807	1.872	1.905	1.922
0.2	1.683	2.17	2.54	2.84	3.07	3.27	3.35	3.44
$x_1 = 0.5$								
x_0	x_2							
	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	0.98		
0.02	1.212	1.423	1.625	1.834	1.937	2.00		
0.05	1.225	1.444	1.672	1.892	2.00	2.06		
0.10	1.254	1.512	1.754	2.00	2.12	2.23		
0.20	1.332	1.672	2.00	2.33	2.53	2.62		
0.30	1.534	2.00	2.56	3.00	3.25	3.45		
0.40	2.00	3.00	4.00	5.00	5.51	5.82		
$x_1 = 0.7$								
x_0	x_2							
	0.8	0.9	0.95	0.98				
0.02	1.423	2.09	2.61	3.03				
0.05	1.432	2.11	2.64	3.07				
0.1	1.443	2.15	2.70	3.14				
0.2	1.481	2.26	2.86	3.34				
0.3	1.546	2.42	3.10	3.64				
0.4	1.653	2.69	3.50	4.29				
0.5	1.854	3.23	4.30	5.14				
0.6	2.47	4.85	6.26	8.14				

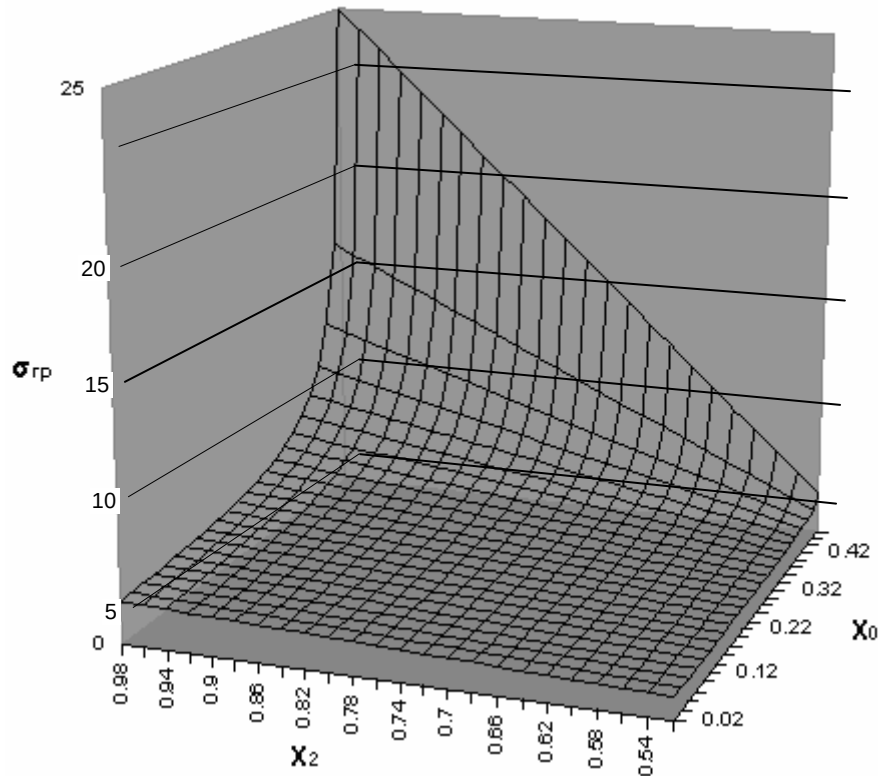


Рис 5. Диаграмма зависимости $\sigma_{гр}$ (при $X_1 = 0,5$) от различных значений x_0 и x_2 .

С учетом (17) находим

$$R_{\min}^n + 1 = \frac{(x_2 - x_1)(1 + P - 2Px_1)}{2Px_1(1 - x_1)} + 1 =$$

$$= \frac{x_2 - Px_2 + 2Px_1x_2 - x_1 - Px_1 + 2Px_1^2 + 2Px_1 - 2Px_1^2}{2Px_1(1 - x_1)} = (29)$$

$$= \frac{x_2(1 + P) - x_1(1 - P) - 2Px_1x_2}{2Px_1(1 - x_1)}$$

Аналогично, с учетом (15) находим

$$R_{\min}^ж + 1 = \frac{x_2(1 - P) - x_1(1 + P) + 2Px_1x_2}{2Px_1(1 - x_1)} + 1 =$$

$$= \frac{x_2 - Px_2 + 2Px_1x_2 - x_1 - Px_1 + 2Px_1 - 2Px_1^2}{2Px_1(1 - x_1)} =$$

$$= \frac{x_2(1 - P) - x_1 + Px_1 + 2Px_1x_2 - 2Px_1^2}{2Px_1(1 - x_1)} =$$

$$= \frac{x_2(1 - P) - x_1(1 - P) + 2Px_1(x_2 - x_1)}{2Px_1(1 - x_1)} =$$

$$= \frac{(x_2 - x_1)(1 - P) + (x_2 - x_1)2Px_1}{2Px_1(1 - x_1)} =$$

$$= \frac{(x_2 - x_1)(1 - P + 2Px_1)}{2Px_1(1 - x_1)} \quad (30)$$

Таким образом при $\sigma = 1$ имеем:

$$\frac{\Sigma q_{k,\min}^n}{q_{k,\min}^ж} = \frac{R_{\min}^n + 1}{R_{\min}^ж + 1} = \frac{x_2(1 + P) - x_1(1 - P) - 2Px_1x_2}{(x_2 - x_1)(1 - P + 2Px_1)}$$

Относительное увеличение затрат на разделение при питании колонны паром в сравнении с кипящей исходной смесью в зависимости от состава x_1 и разделяемой смеси P представлено на рис. 6. Концентрация НКК в дистилляте x_2 принята равной 0.98.

Из рис. 6. видно, что **суммарные** минимальные затраты теплоты в кубе колонны и на испарение исходной смеси при питании колонны паровой бинарной смесью **всегда** больше затрат теплоты при питании колонны жидкой исходной смесью при температуре кипения. Это объясняется уменьшением внутреннего энергосбережения [5–8] в отгонной колонне из-за увеличения отношения потоков жидкости и пара при питании колонны исходной смесью в виде пара.

В заключении следует отметить, что проведенный анализ внес определенную ясность в вопрос о целесообразности предварительной конденсации паровой смеси перед подочей в колонну. По этому вопросу в научной литературе [9, 10] была довольно жаркая дискуссия.

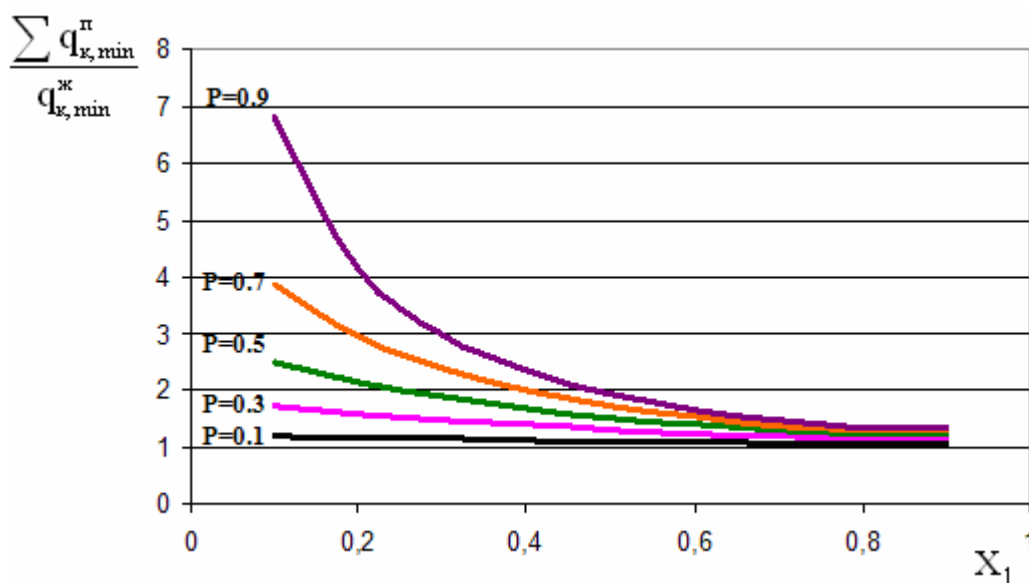


Рис. 6. Отношение минимальных суммарных затрат теплоты при питании колонны паром и в виде кипящей жидкости в зависимости от состава смеси x_1 и ее разделяемости P .

ЛИТЕРАТУРА:

1. Львов С.В. Некоторые вопросы ректификации бинарных и многокомпонентных смесей. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. 163 с.
2. Комиссаров Ю.А., Гордеев Л.С., Вент Д.П. Научные основы процессов ректификации: в 2 т. / Под ред. Л.А. Серафимова. – М.: Химия, 2004. Т. 1. 270 с. Т. 2. 416 с.
3. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А., Захаренко В.В., Зиновкина Т.В., Таран А.Л., Костанян А.Е. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: в 2 кн. / Под общ. ред. В.Г. Айнштейна. – М.: Университетская книга, Логос, Физматкнига, 2006. Кн. 1. 872 с. Кн. 2. 912 с.
4. Хахин Л.А. Разработка энтропийной оценки работы ректификационных колонн и функциональных комплексов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: МИТХТ, 2009. 28 с.
5. Захаров М.К. Анализ энергосбережения в процессах ректификации // Хим. технология. 2008. Т. 9. № 4. С. 177–182
6. Захаров М.К. Энергоемкость и энергосбережение процессов ректификации // Энциклопедия инженера-химика. 2009. № 1. С. 19–24.
7. Захаров М.К. Энергоемкость и энергосбережение процессов ректификации // Энциклопедия инженера-химика. 2009. № 3. С. 18–21.
8. Захаров М.К. Энергозатраты и энергосбережение при разделении жидких смесей методами перегонки // Вестник МИТХТ. 2009. Т. 4. № 1. С. 15–17.
9. Платонов В.М., Берго Б.Г. Разделение многокомпонентных смесей. – М.: Химия, 1965. 231 с.
10. Львов С.В. К вопросу о зависимости расхода энергии на ректификацию от физического состояния (энергетического уровня) исходной смеси / В кн.: Физико-химические основы ректификации / Под ред. С.В. Львова. – М.: МИТХТ, 1970. С. 292–300.