

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Е.И. Борзенко, Е.В. Логвиненко

**РАСЧЕТ КОЛОННЫ ДВУКРАТНОЙ
РЕКТИФИКАЦИИ ВОЗДУХА С ПОМОЩЬЮ
 i - x ДИАГРАММЫ**

Учебно-методическое пособие

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2016

УДК 621.593

Борзенко Е.И., Логвиненко Е.В. Расчет колонны двукратной ректификации воздуха с помощью i - x диаграммы: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 36 с.

Пособие предназначено для студентов бакалавриата направлений 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика и 16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы всех форм обучения по дисциплине «Теоретические основы разделения газовых смесей». Изложен графо-аналитический метод определения числа тарелок для колонны двукратной ректификации с помощью диаграммы i - x .

Рецензент: кандидат техн. наук А.А. Малышев

Рекомендовано к печати Советом факультета холодильной, криогенной техники и кондиционирования, протокол № 4 от 23 декабря 2015 г.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 – 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2016

© Борзенко Е.И., Логвиненко Е.В. 2016

ВВЕДЕНИЕ

В рамках изучения дисциплины «Теоретические основы разделения газовых смесей» студенты изучают вопросы, связанные с разделением воздуха. Одно из заданий, выполняемых на практических занятиях – это графо-аналитический расчет колонны двукратной ректификации. Этот расчет может быть выполнен двумя методами:

1. графический расчет колонны в y - x диаграмме (метод Мак-Кэба и Тиле);
2. графический расчет колонны при помощи i - x диаграммы.

Второй метод имеет ряд преимуществ. Помимо наглядного изображения термодинамического процесса, он позволяет проследить влияние отдельных факторов на процесс ректификации, а именно: изменение отношений количества флегмы и количества пара, количества передаваемого тепла при испарении вышекипящего и конденсации нижекипящего компонентов и изменение их концентраций.

Поэтому расчетное задание выполняется вторым методом с помощью i - x диаграммы. Последовательность расчета, а также некоторые теоретически вопросы, связанные с данным вопросом, приведены в данном учебно-методическом пособии.

Для выполнения расчета колонны двукратной ректификации воздуха с помощью i - x диаграммы необходимо изучить вопросы разделения воздуха и других газовых смесей [1, 2, 3].

РЕКТИФИКАЦИЯ ВОЗДУХА

Процесс испарения смеси двух взаимно-растворимых жидкостей или процесс конденсации их паров ведет к выделению фракций различного состава, но ни при каких условиях не дает ещё полного разделения участвующих в процессе компонентов.

Для полного разделения смеси на составные части необходимо многократное чередование процессов испарения и конденсации. Этот метод называется ректификацией и является основным для получения чистого азота и кислорода.

Сущность процесса ректификации заключается в следующем: если при некотором давлении привести в соприкосновение паровую и жидкую фазу бинарной смеси, не находящиеся между собой в равновесии, то концентрации пара и жидкости будут изменяться до тех пор, пока они не придут в состояние равновесия. Если при некоторой концентрации пара жидкость будет взята более богатой нижекипящим компонентом, т.е. с более низкой температурой, то между жидкостью и паром произойдет теплообмен и массообмен, причем часть жидкости испарится за счет тепла частично сконденсировавшихся паров.

Когда наступит равновесие между жидкой и газовой фазами, увеличится концентрация нижекипящего компонента в парах и понизится его концентрация в жидкости.

Подобный процесс, повторяемый многократно, и составляет сущность ректификации.

КОЛОННЫ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА

Для осуществления процесса необходимы аппараты с развитой поверхностью контакта между фазами, такие аппараты называют ректификационными колонными.

Конструкция колонн может быть различной. В криогенной технике используют главным образом колонны тарельчатые и насадочные. Насадочные заполняют насадкой разного вида, обеспечивающей непрерывное изменение состава потоков по высоте колонны. В тарельчатой используют колпачковые, ситчатые, решетчатые и другие тарелки, обеспечивающие ступенчатое изменение состава потоков.

Воздухоразделительные колонны также различают по кратности ректификации, так в установках малой производительности (от 5 до 15 м³/час кислорода) применяются колонны однократной ректификации, а в установках средней и большой производительности широкое распространение получила колонна двукратной ректификации.

Колонна однократной ректификации

Рассмотрим колонны однократной ректификации для получения кислорода (рис. 1) и для получения азота (рис. 2).

Колонна, изображенная на рис. 1, представляет собой вертикальную башню 1 с кубом 2. Охлажденный сжатый воздух *M* подается в змеевик 3, дополнительно охлаждается и затем дросселируется в вентиле 4.

После дросселирования жидкий воздух (с небольшой долей пара, которая неизбежно образовывается во время дросселирования) поступает в верхнее сечение колонны; давление в ней составляет 0,13–0,14 МПа. Жидкость, стекая по колонне, обогащается кислородом при взаимодействии с потоком пара, который поднимается вверх по колонне. В кубе колонны часть жидкости испаряется за счет теплоты воздуха, проходящего внутри змеевика, а образовавшийся пар поднимается и постепенно обогащается азотом. В уходящем из колонны паре *A* содержится значительное количество кислорода, так как в верхнее сечение колонны подается жидкий воздух.

В такой колонне можно получить достаточно чистым только высококипящий продукт (кислород К) как в жидком, так и в газообразном виде.

Существенный недостаток данной колонны – это малый коэффициент извлечения компонента O_2 , так как более $1/3$ его теряется с потоком азота А.

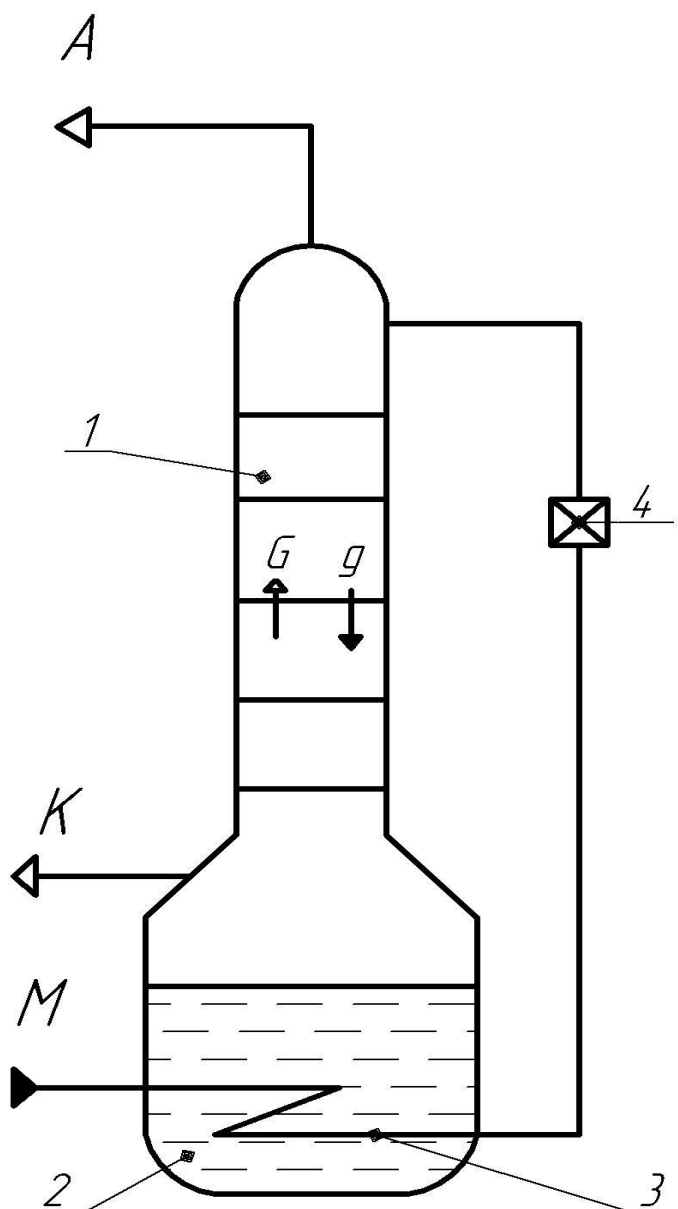


Рис. 1. Схема колонны однократной ректификации для получения кислорода

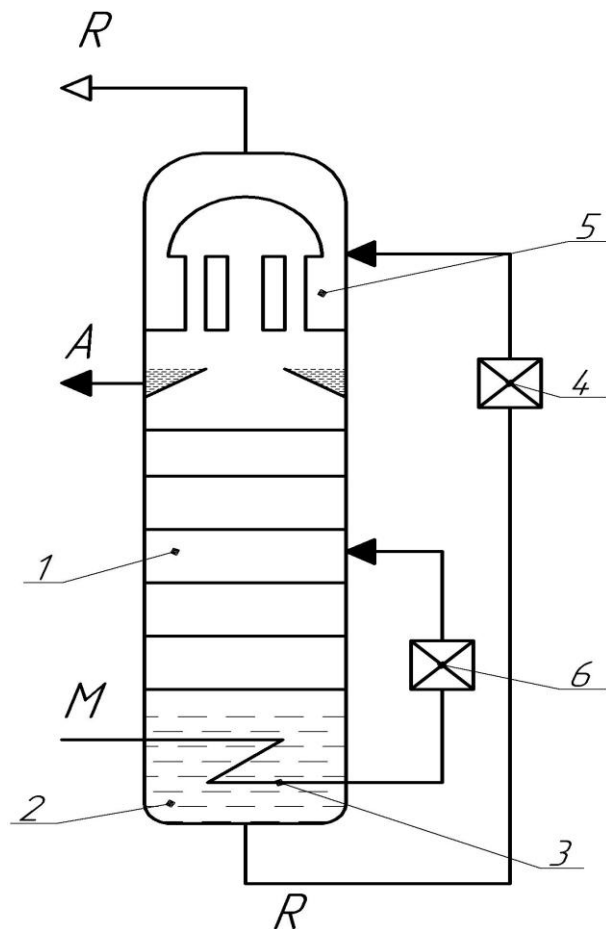


Рис. 2. Схема колонны однократной ректификации для получения азота

В колонне, представленной на рис. 2, кроме куба 2 со змеевиком 3, имеется конденсатор – испаритель 5. Сжатый и охлажденный воздух M после дросселирования в вентиле 6 подается на разделение. В верхней части колонны 1 получается практически чистый азот A . Часть азотного пара, сконденсировавшегося в трубах, стекает в качестве флегмы для обеспечения процесса ректификации. Для конденсации паров азота из куба 2 через дроссельный вентиль 4 жидкость R , обогащенная кислородом, подается в межтрубное пространство конденсатора – испарителя 5 (в испаритель), где жидкость кипит при более низком давлении (около 0,13 МПа), чем давление в колонне. Образовавшийся пар в количестве R отводится из испарителя колонны. Вследствие разности давлений в конденсаторе – испарителе создается достаточный температурный напор, и азот в трубках конденсируется; теплота конденсации передается жидкости, кипящей в трубном пространстве конденсатора-испарителя.

Колонна двукратной ректификации (рис. 3)

В колоннах такого типа возможно практически полное разделение бинарной смеси. Аппарат состоит из двух колонн 1 и 2 и конденсатора-испарителя 3. Процесс ректификации в нижней колонне (или колонне высокого давления) происходит при давлении 0,55–0,58 МПа, в верхней колонне 2 (или колонне низкого давления) при давлении 0,13–0,14 МПа. При этом в конденсаторе-испарителе создается достаточный температурный напор (обычно 2–3 К).

Рассмотрим подробнее схему колонны, представленной на рис. 3. Воздух M входит в колонну через дроссельный вентиль 8; в нижней части колонны 1 получается жидкость (кубовая), обогащенная кислородом. Эта жидкость кипит за счет теплоты воздуха, проходящего по змеевику. Образовавшийся пар поднимается навстречу стекающей по тарелкам жидкости и обогащается нижекипящим компонентом. Вверху колонны находится практически чистый азот, который конденсируется в аппарате 3 (в трубках). Часть образовавшейся жидкости стекает навстречу поднимающемуся пару и обогащается кислородом, другая часть D_a из азотных карманов 5 через дроссельный вентиль 7 подается в верхнюю колонну. Кубовая жидкость R подается также в колонну 2 после дроссельного вентиля 6. Для охлаждения потоков R и D_a установлен аппарат 4 (переохладитель флегмы). Из верхней колонны отводятся продукты разделения – азот А и кислород К.

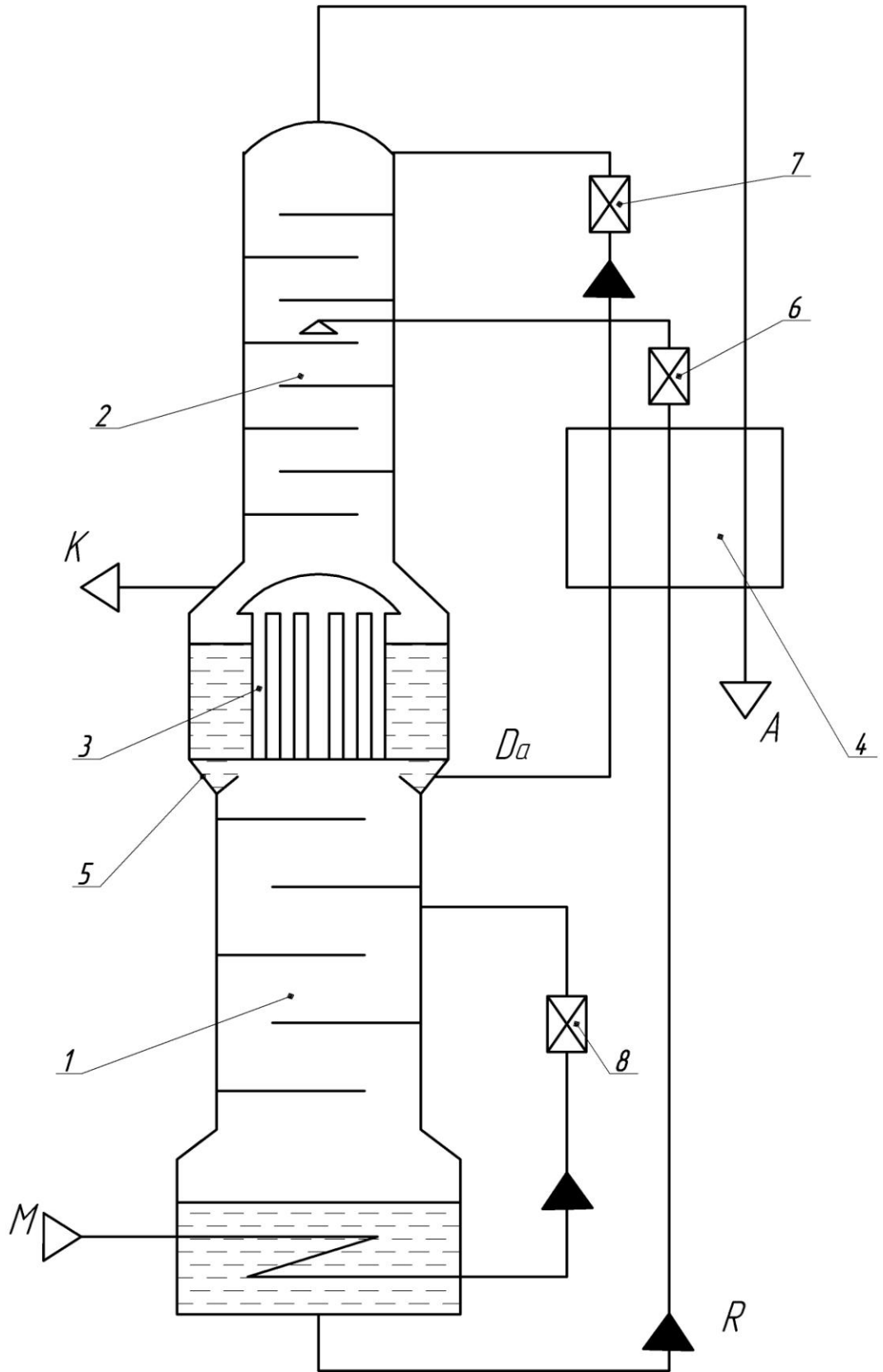


Рис. 3. Схема колонны двукратной ректификации

ГРАФИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПРИ ПОМОЩИ i - x ДИАГРАММЫ

Данный графический метод расчета ректификационный колонн, помимо наглядного изображения термодинамического процесса, позволяет проследить влияние отдельных факторов на процесс ректификации, а именно: изменения отношений количеств флегмы и пара, количество передаваемого тепла при испарении вышекипящего и конденсации нижекипящего компонентов и изменение их концентраций.

В колонне на ректификационных тарелках происходит непосредственное соприкосновение поднимающихся паров с более холодной жидкой смесью. В результате часть компонентов из паровой фазы конденсируется, переходит в жидкость, и одновременно с этим испаряется соответствующее количество жидкости, находящейся на ректификационной тарелке. Этот процесс продолжается до момента выравнивания температур и парциальных давлений в жидкости и паре.

Рассмотрим произвольный участок колонны между двумя сечениями a и b (рис.4). Обозначим:

G – количество поднимающихся паров в произвольном сечении колонны;

g – количество стекающей флегмы в произвольном сечении колонны;

G_a и G_b – количество поднимающихся паров в сечении a и b соответственно;

g_a и g_b – количество стекающей флегмы в сечении a и b соответственно;

x' – концентрация азота в жидкости;

x'' – концентрация азота в паре;

i' – энтальпия жидкости;

i'' – энтальпия пара.

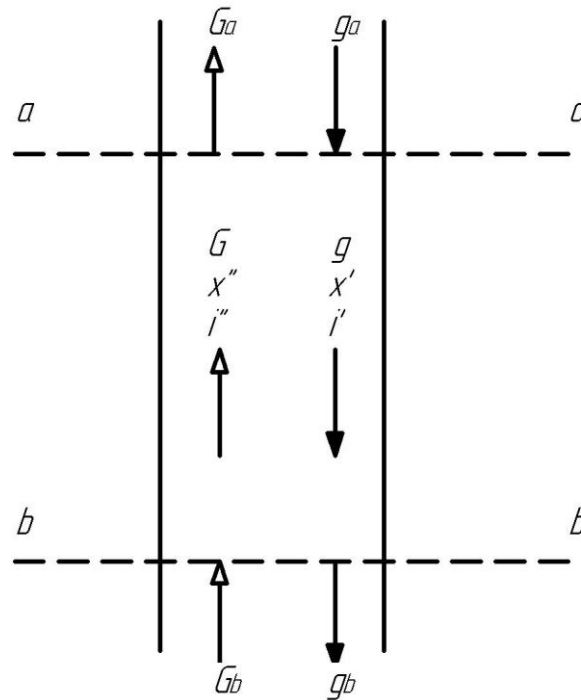


Рис. 4. Участок колонны между двумя произвольными сечениями

Для установившегося процесса можно записать материальный баланс:

$$G_a + g_b = G_b + g_a \quad (1)$$

или

$$G_a - g_a = G_b - g_b. \quad (2)$$

Таким, образом, для любого сечения будет справедливым выражение:

$$G - g = \text{const}. \quad (3)$$

Эта постоянная величина будет равна количеству полученного пара D , т.е.

$$G - g = D = \text{const}. \quad (4)$$

Материальный баланс по нижекипящему компоненту:

$$G_a \cdot x_a'' + g_b \cdot x_b' = G_b \cdot x_b'' + g_a \cdot x_a'; \quad (5)$$

$$G_a \cdot x_a'' - g_a \cdot x_a' = G_b \cdot x_b'' - g_b \cdot x_b'; \quad (6)$$

или для любого сечения

$$G \cdot x'' - g \cdot x' = \text{const}. \quad (7)$$

Тепловой баланс (при условии, что колонна тщательно изолирована):

$$G_a \cdot i_a'' + g_b \cdot i_b' = G_b \cdot i_b'' + g_a \cdot i_a'; \quad (8)$$

$$G_a \cdot i_a'' - g_a \cdot i_a' = G_b \cdot i_b'' - g_b \cdot i_b'; \quad (9)$$

или для любого сечения

$$G \cdot i'' - g \cdot i' = \text{const}. \quad (10)$$

Приведенные концентрация и энтальпия

Если разделить уравнения (7) и (10) на уравнение (3), то получим:

$$\frac{G \cdot x'' - g \cdot x'}{G - g} = x = \text{const}; \quad (11)$$

$$\frac{G \cdot i'' - g \cdot i'}{G - g} = i = \text{const}. \quad (12)$$

Полученные величины называются:

x – приведенная концентрация;

i – приведенная энтальпия.

Данные уравнения показывают, что приведенная концентрация и приведенная энтальпия остаются постоянными для всех сечений колонны. Точка, имеющая координаты приведенной концентрации и приведенной энтальпии, называется полюсом.

Полюс колонны обладает следующим свойством: если через две точки, характеризующие состояние пара и жидкости в любом сечении, провести прямую, то она пройдет через полюс колонны.

Решая уравнение (11) и (12), получаем:

$$\frac{x - x''}{x - x'} = \frac{g}{G}; \quad (13)$$

$$\frac{i - i''}{i - i'} = \frac{g}{G}. \quad (14)$$

На рис. 5. полюс P лежит на прямой, проходящей через точки A и B . Из подобия треугольников $PA A_1$ и $P B B_1$ следует, что:

$$\frac{AA_1}{BB_1} = \frac{PA_1}{PB_1} = \frac{PA}{PB}. \quad (15)$$

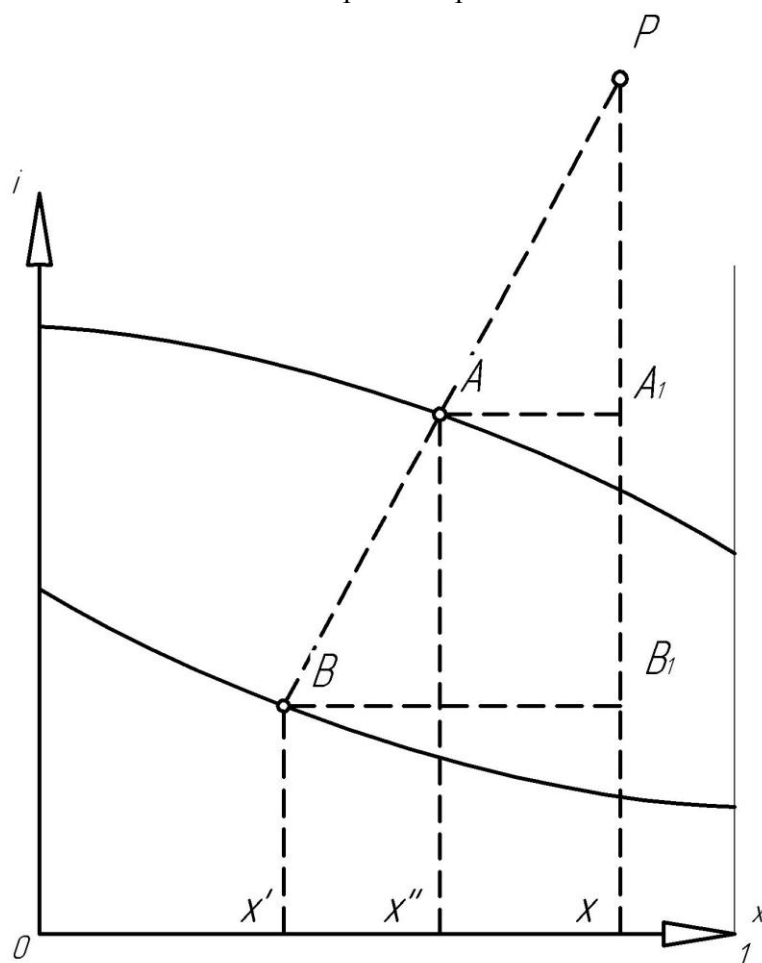


Рис. 5. Расположение полюсного луча и количественное отношение между флегмой и паром

Если учесть, что $AA_1 = x - x''$; $BB_1 = x - x'$; $PA_1 = i - i''$; $PB_1 = i - i'$, получаем:

$$\frac{x - x''}{x - x'} = \frac{i - i''}{i - i'}, \quad (16)$$

т.е. точки A и B представляют собой состояние пара и жидкости в сечении колонны.

Линия, проведенная через полюс, называется полюсным лучом; из уравнений (13)–(15) следует:

$$\frac{PA}{PB} = \frac{g}{G}. \quad (17)$$

Таким образом, отношение отрезков PA и PB представляет собой отношение количества флегмы и количества пара.

**КОЛОННА ДВУКРАТНОЙ РЕКТИФИКАЦИИ, ИМЕЮЩАЯ
ПЕРЕОХЛАДИТЕЛЬ АЗОТНОЙ ФЛЕГМЫ
И КУБОВОЙ ЖИДКОСТИ
НИЖНЯЯ КОЛОННА БЕЗ ЗМЕЕВИКА
(рис. 6)**

Исходные данные

Давление верхней колонны	$p_{в.к.}$, МПа;
Давление нижней колонны	$p_{н.к.}$, МПа;
Концентрация отбросного азота	x_A'' , мольN ₂ /моль;
Концентрация газообразного кислорода	x_K'' , мольN ₂ /моль;
Концентрация азотной флегмы	x_D' , мольN ₂ /моль;
Концентрация кубовой жидкости	x_R , мольN ₂ /моль.

Дополнительные данные

Суммарная удельная величина теплопритоков извне через изоляцию к воздухоразделительному аппарату:

$$\sum q_c^k = 5 - 6,5 \text{ кДж/м}^3 \text{ п.в.}$$

(здесь м³ п.в – м³ перерабатываемого воздуха при нормальных условиях, в дальнейшем м³),

для верхней колонны $q_c^{БК} = 2,5 - 3 \text{ кДж/м}^3$;
для нижней колонны с конденсатором $q_c^{НК} = 2,5 - 3,5 \text{ кДж/м}^3$;
величина переохлаждения азотной флегмы и кубовой жидкости составляет 6–8 К.

Расчет ведется на 1 м³ разделяемого воздуха при нормальных условиях.

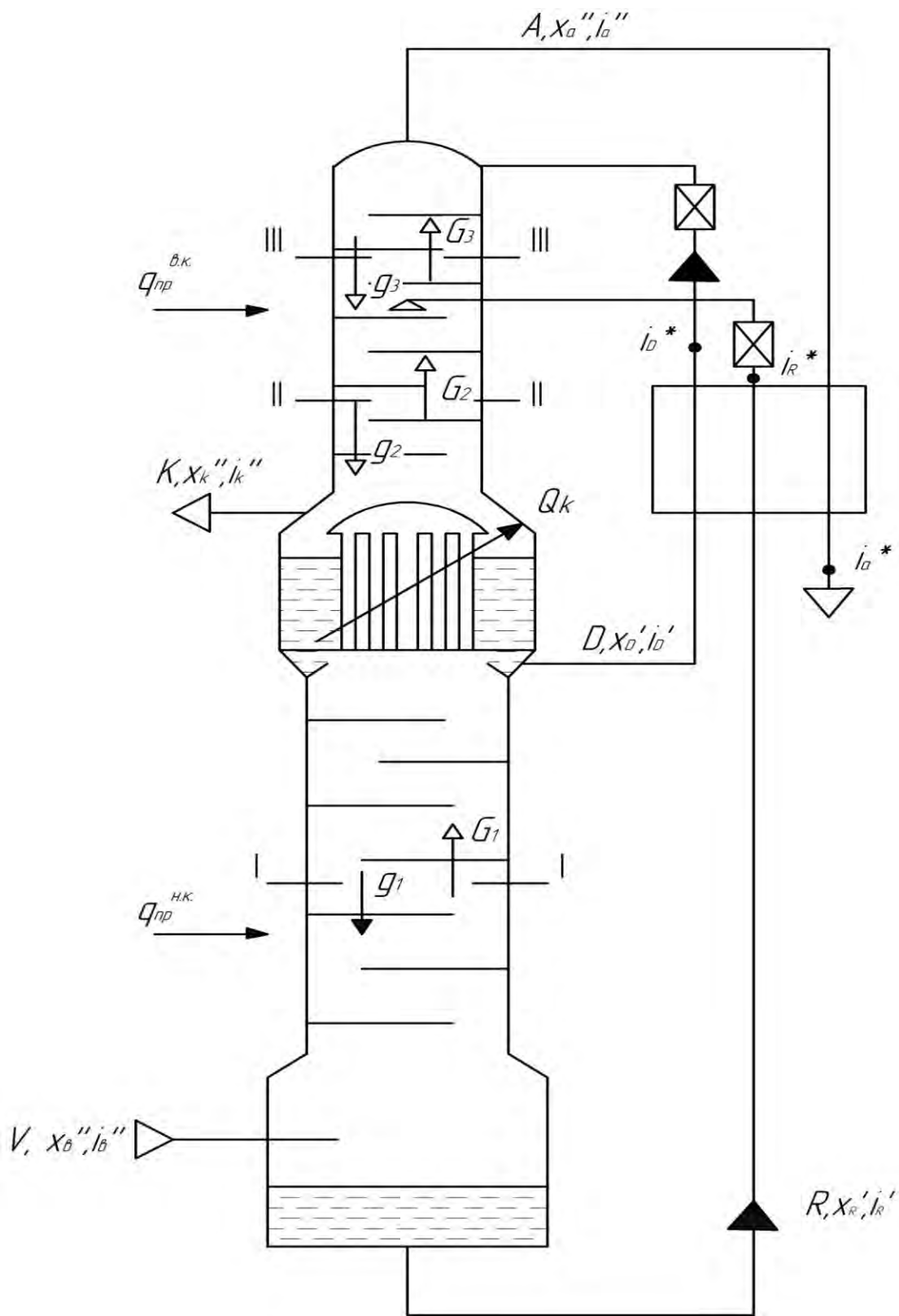


Рис. 6. Колонна двукратной ректификации воздуха, имеющая переохладитель азотной флегмы и кубовой жидкости, нижняя колонна без змеевика

I. Нижняя колонна

1. Проверяем температурный напор в конденсаторе, т.е. разность температур между кислородом, кипящим в межтрубном пространстве, и газообразным азотом, конденсирующимся в трубках (в настоящем расчете давление в нижней колонне входит в исходные данные; на практике в большинстве случаев за исходную величину принимают температурный напор в конденсаторе ΔT_k в пределах $3 \div 4$ К, а затем в зависимости от принятого ΔT_k определяют давление в нижней колонне):

а) среднее давление кипящего кислорода в межтрубном пространстве конденсатора, МПа:

$$p_{ср.к} = p_{в.к} + \frac{H\rho_{O_2}}{2 \cdot 9.8 \cdot 10^4}, \quad (18)$$

где H – высота гидростатического столба жидкого кислорода в межтрубном пространстве конденсатора, $H=0,4-0,8$ м; ρ_{O_2} – плотность жидкого кислорода при давлении в верхней колонне, $кг/м^3$;

б) по номограмме $T-i-p-x-y$ для смеси азот – кислород (см. сборник диаграмм-приложений к [4] или [5]), по давлению $p_{ср.к}$ и концентрации x_k'' определяем температуру кипения кислорода $T_{ср.O_2}$;

в) по той же номограмме, используя значение давления в нижней колонне $p_{н.к}$ и концентрации x_D' , определяем температуру конденсации газообразного азота в трубном пространстве T_{N_2} :

$$\Delta T_k = T_{N_2} - T_{ср.O_2}.$$

Эта величина должна находиться в пределах $3 \div 4$ град.

2. Определяем координаты полюса в нижней колонне – приведенную концентрацию $x_{нpl}$ и приведенную энтальпию $i_{нpl}$. Для этого выбираем между тарелками произвольное сечение I–I. Обозначаем количество жидкости, проходящее через его сечение, через g_1 , а количество поднимающегося пара – через G_1 (рис. 6). Составляем материальный баланс и баланс по нижекипящему компоненту для части колонны выше сечения I–I:

$$G_1 = g_1 + D;$$

$$G_1 x_1'' = g_1 x_1' + D x_D';$$

$$G_1 - g_1 = D; \quad (19)$$

$$G_1 x_1'' - g_1 x_1' = D x_D'. \quad (20)$$

Здесь x_1'' – концентрация нижекипящего компонента для сечения I–I в паре, а x_1' – в жидкости

$$\text{Так как } x_{npI} = \frac{G_1 x_1'' - g_1 x_1'}{G_1 - g_1}, \quad i_{npI} = \frac{G_1 i_1'' - g_1 i_1'}{G_1 - g_1},$$

то, пользуясь зависимостями (1) и (2), можем получить $x_{npI} = x_D'$.

Аналогично, составляя тепловой баланс нижней колонны выше сечения I–I, получим (без учета теплопритоков):

$$G_1 i_1'' = g_1 i_1' + D i_D' + Q_k; \quad G_1 i_1'' - g_1 i_1' = D i_D' + Q_k. \quad (21)$$

Здесь Q_k – удельное количество тепла, отданное азотом при конденсации, кДж/кмоль. Пользуясь зависимостями (19) и (21), можем получить:

$$i_{npI} = i_D' + \frac{Q_k}{D} = i_D' + q_D.$$

Для определения потоков R и D , м³/м³, составляем балансы материальный и по нижекипящему компоненту для всей нижней колонны:

$$\begin{cases} B = R + D; \\ B x_B'' = R x_R' + D x_D'. \end{cases} \quad B = 1.$$

$$\text{Отсюда } R = \frac{x_B'' - x_D'}{x_R' - x_D'},$$

$$D = \frac{x_B'' - x_R'}{x_D' - x_R'}, \quad \text{или } D = 1 - R.$$

Для определения потоков A и K , $\text{м}^3/\text{м}^3$, составляем балансы материальный и по нижекипящему компоненту для всего воздухоразделительного аппарата:

$$\begin{cases} B = A + K; \\ Bx_B'' = Ax_A'' + Kx_K'' \end{cases} \quad \begin{cases} A = 1 - K; \\ K = \frac{x_B'' - x_A''}{x_K'' - x_A''} \end{cases}$$

$$A = \frac{x_B'' - x_K''}{x_A'' - x_K''}$$

Для определения тепловой нагрузки конденсатора Q_k составляем баланс энергии нижней колонны:

$$Bi_B'' + Bq_c^{h.k} \cdot 22,4 = Ri_R' + Di_D' + Q_k.$$

В этом тепловом балансе, кроме Q_k , неизвестной является также энтальпия i_B'' . Эта энтальпия находится из баланса энергии всего воздухоразделительного аппарата:

$$Bi_B'' + B \sum q_c^k \cdot 22,4 = Ki_K'' + Ai_A^*.$$

Предварительно определяется энтальпия i_A^* из баланса переохладителя:

$$D\rho_D c_{P_D} \cdot \Delta T_D + R\rho_R c_{P_R} \cdot \Delta T_R = A\rho_A c_{P_A} \cdot \Delta T_A.$$

Здесь ρ_A – плотность азота при нормальных условиях; ρ_R – плотность кубовой жидкости при нормальных условиях;

$$\rho_R = x_R' \rho_A + (1 - x_R') \rho_K,$$

где ρ_K – плотность кислорода при нормальных условиях;

c_{P_D} – теплоемкость жидкой азотной флегмы, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

c_{P_A} – теплоемкость отбросного газообразного азота, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

c_{P_R} – теплоемкость кубовой жидкости, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

$$c_{P_R} = x'_R \cdot c_{P_D} + (1 - x'_R) c_{P_K},$$

где c_{P_K} – теплоемкость жидкого кислорода, кДж/кг·К.

Из баланса переохладителя первоначально находится величина ΔT_A , а затем энтальпия i_A^* :

$$A \rho_A c_{P_A} \Delta T_A \cdot 22,4 = A \cdot (i_A^* - i_A'').$$

Остальные энтальпии (i_A'', i_K'', i_R', i_D') находятся по номограмме $T-i-p-x-y$ для смеси азот-кислород по концентрации и давлению.

Величина Q_k , определенная из баланса энергий нижней колонны, затем проверяется по балансу энергий верхней колонны (т.е. колонны низкого давления):

$$Q_K + R i_R^* + D i_D^* + B q_c^{g.k} \cdot 22,4 = A i_A'' + K i_K''.$$

Здесь

$$i_R^* = i_R' - c_{P_R} \cdot \Delta T_R \cdot \rho_R \cdot 22,4;$$

$$i_D^* = i_D' - c_{P_D} \cdot \Delta T_D \cdot \rho_A \cdot 22,4.$$

Расхождение в величине Q_k , полученной из баланса энергий верхней и нижней колонн, не должно превышать $\pm 2 \div 3$ %.

3. После определения координат полюса x_{npI} и i_{npI} для нахождения числа теоретических тарелок в нижней колонне строим $i-x$ диаграмму, совмещенную с диаграммой $T-x$ (рис. 7), для давления $p_{н.к.}$. Для этого используют табличные данные по фазовому равновесию [6], а также номограмму $T-i-p-x-y$ (для построения $i-x$ диаграммы). При $x_A'' = x_D'$, $x_{np} = x_D'$.

На построенной диаграмме отмечается полюс P_1 с координатами x_{npI} и i_{npI} и проводится крайний полюсной луч, ограничивающий построение тарелок. Он проходит через полюс и состояние кубовой жидкости (точка A). За исходную точку при построении тарелок берется состояние пара, поднимающегося с самой верхней тарелки нижней колонны (точка I на $i-x$ диаграмме).

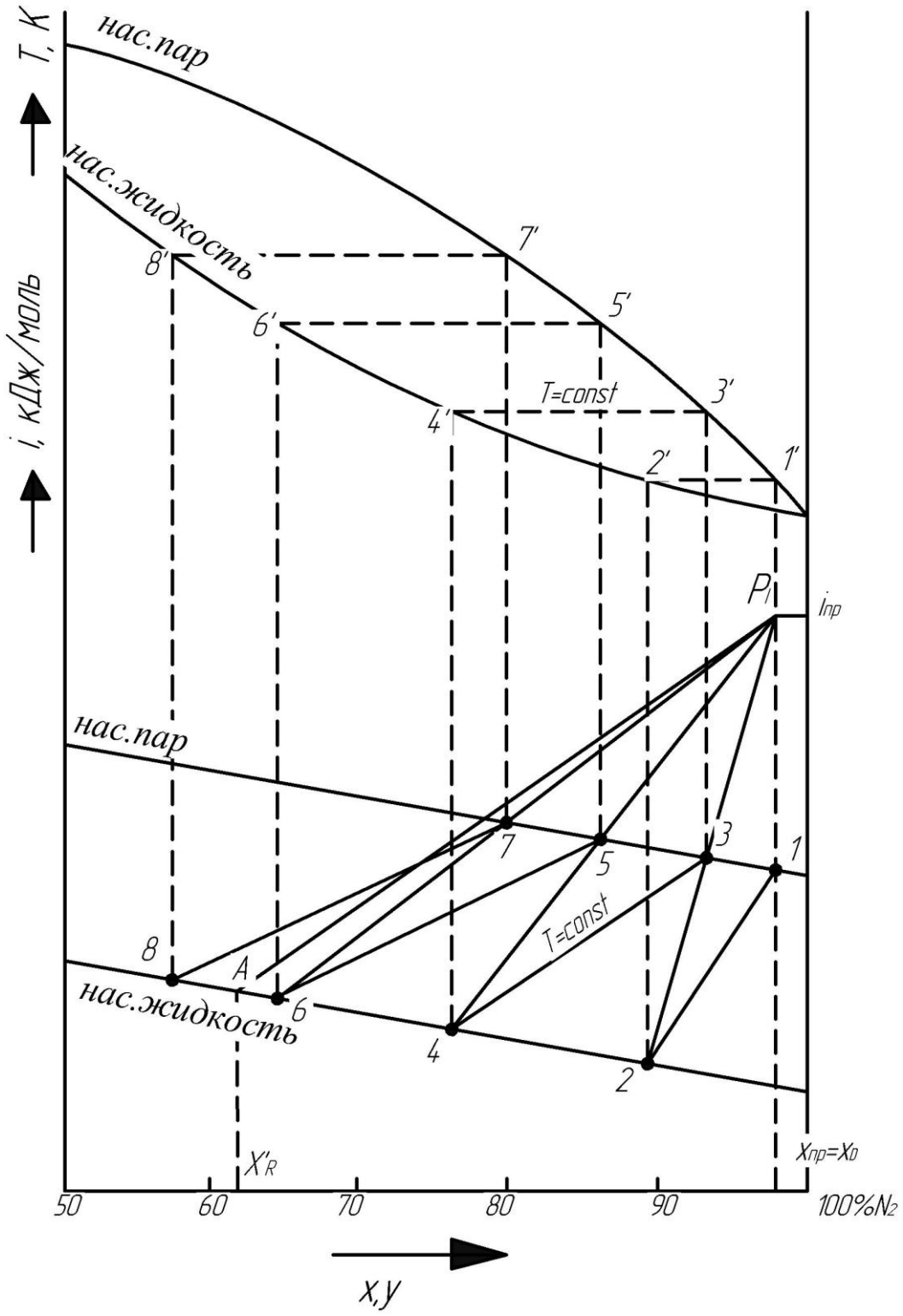


Рис. 7. Диаграмма $i-x$, совмещенная с диаграммой $T-x$, для нахождения числа теоретических тарелок в нижней колонне

Этой точке в $T-x$ диаграмме соответствует точка $1'$. Жидкость, стекающая с самой верхней тарелки, в идеальном случае должна быть равновесна поднимающемуся пару. Равновесное состояние предполагает равенство температуры пара и жидкости. Поэтому состоянию такой жидкости соответствуют точка $2'$ в $T-x$ диаграмме и точка 2 в $i-x$ диаграмме. Изотерма $1-2$ связывает состояния пара и жидкости, покидающих тарелку, поэтому число построенных таким образом изотерм характеризует число теоретических тарелок. Для перехода к следующей тарелке определяется состояние пара, поднимающегося с нижележащей тарелки. Это состояние, точка 3 , лежит на полюсном луче P_{1-2} в месте его пересечения с пограничной кривой сухого насыщенного пара (исходя из свойства полюсного луча, связывающего между собой состояния пара и жидкости в любом сечении колонны).

Для нахождения точки 4 , соответствующей состоянию жидкости, стекающей со второй (считая сверху) тарелки, через точку 3 с использованием $T-x$ диаграммы проводится изотерма $3-4$. Затем точка 4 объединяется с полюсом и т.п. Построение тарелок заканчивается, когда одна из изотерм пересекает крайний полюсной луч P_{1-A} (на рис. 7 – изотерма $7-8$). Количество теоретических тарелок подсчитывается по числу изотерм, включая часть последней, находящейся справа от крайнего полюсного (например, для рис. 7 число теоретических тарелок $n_T = 3,2$). Число действительных тарелок определяется с учетом коэффициента эффективности разделительного действия и округляется до целого в большую сторону. На практике, правда, поступают наоборот, т.е. принимают число действительных тарелок $n_D = 24$ для нижней колонны и определяют $\eta_{эф}$.

II. Верхняя колонна

Верхняя колонна состоит из двух частей: отгонной – ниже ввода кубовой жидкости, и концентрационной – выше ввода кубовой жидкости, отличающихся количеством участвующих в ректификации пара и жидкости. В связи с этим в данном случае необходимо определить координаты двух полюсов, отдельно для отгонной и концентрационной секций.

1. Отгонная секция верхней колонны

Ниже ввода кубовой жидкости берем между тарелками произвольное сечение II–II. Количества пара и жидкости, проходящие через это сечение, обозначим соответственно через G_2 и g_2 . Составляем материальный баланс и баланс по нижекипящему компоненту для части колонны ниже сечения II–II:

$$\begin{cases} g_2 = G_2 + K; \\ g_2 x_2' = G_2 x_2'' + K x_K'' \end{cases} \quad \begin{cases} G_2 - g_2 = -K; \\ G_2 x_2'' - g_2 x_2' = -K x_K'' \end{cases}$$

$$x_{npII} = \frac{G_2 x_2'' - g_2 x_2'}{G_2 - g_2} = \frac{-K x_K''}{-K} = x_K''.$$

Для определения i_{npII} составляем баланс энергий колонны ниже сечения II–II:

$$\begin{aligned} g_2 i_2' + Q_K &= G_2 i_2'' + K i_K''; \\ G_2 i_2'' - g_2 i_2' &= Q_K - K i_K''; \end{aligned}$$

$$i_{npII} = \frac{G_2 i_2'' - g_2 i_2'}{G_2 - g_2} = \frac{Q_K - K i_K''}{-K} = i_K'' - \frac{Q_K}{K} = i_K'' - q_K.$$

2. Концентрационная секция верхней колонны

Берем между тарелками произвольное сечение III–III выше ввода кубовой жидкости. Количество пара и жидкости, проходящее через это сечение, обозначим соответственно через G_3 и g_3 . Составляем материальный баланс и баланс по нижекипящему компоненту для части колонны выше сечения III–III:

$$\begin{cases} g_3 + A = G_3 + D; \\ g_3 x_3' + Ax_A'' = G_3 x_3'' + Dx_D'; \\ G_3 - g_3 = A - D; \\ G_3 x_3'' - g_3 x_3' = Ax_A'' - Dx_D'; \end{cases}$$

$$x_{npIII} = \frac{G_3 x_3'' - g_3 x_3'}{G_3 - g_3} = \frac{Ax_A'' - Dx_D'}{A - D},$$

при $x_A'' = x_D'$, $x_{np} = x_D'$.

Для определения i_{npIII} составляем баланс энергий колонны выше сечения III–III:

$$\begin{cases} g_3 i_3' + Ai_A'' = G_3 i_3'' + Di_D^*; \\ G_3 i_3'' - g_3 i_3' = Ai_A'' - Di_D^*; \end{cases}$$

$$i_{npIII} = \frac{G_3 i_3'' - g_3 i_3'}{G_3 - g_3} = \frac{Ai_A'' - Di_D^*}{A - D}.$$

Для определения числа теоретических тарелок строим диаграмму $i-x$, совмещенную с диаграммой $T-x$ для давления $p_{в.к}$, аналогично тому, как это делалось для нижней колонны (рис.8). Отмечаем точки с координатами x_{npII} , i_{npII} и x_{npIII} , i_{npIII} . Обозначаем полюса P_{II} и P_{III} . Построения для отгонной секции ведем через полюс P_{II} . Область построения тарелок каждой секции ограничивается линией полюсов $P_{II}-P_{III}$. При это главная полюсная линия P_{II} и P_{III} обязательно должна пройти через точку M с координатами x_R' , i_R' (с учетом переохлаждения $\Delta i_R'$).

Исходной точкой 1 для построения тарелок в отгонной секции является состояние жидкого кислорода, стекающего с самой нижней тарелки (его концентрация принимается равной x_K''). Точка 2 , лежащая на другом конце изотермы $1-2$, соответствует состоянию пара, покидающего самую нижнюю тарелку. Пересечение полюсного луча, проходящего через точку 2 , с пограничной кривой насыщенной жидкости даст точку 3 , характеризующую состояние жидкости, стекающей с вышележащей тарелки. Построение изотермы для этой секции ведется до пересечения с линией полюсов (изотерма $9-10$).

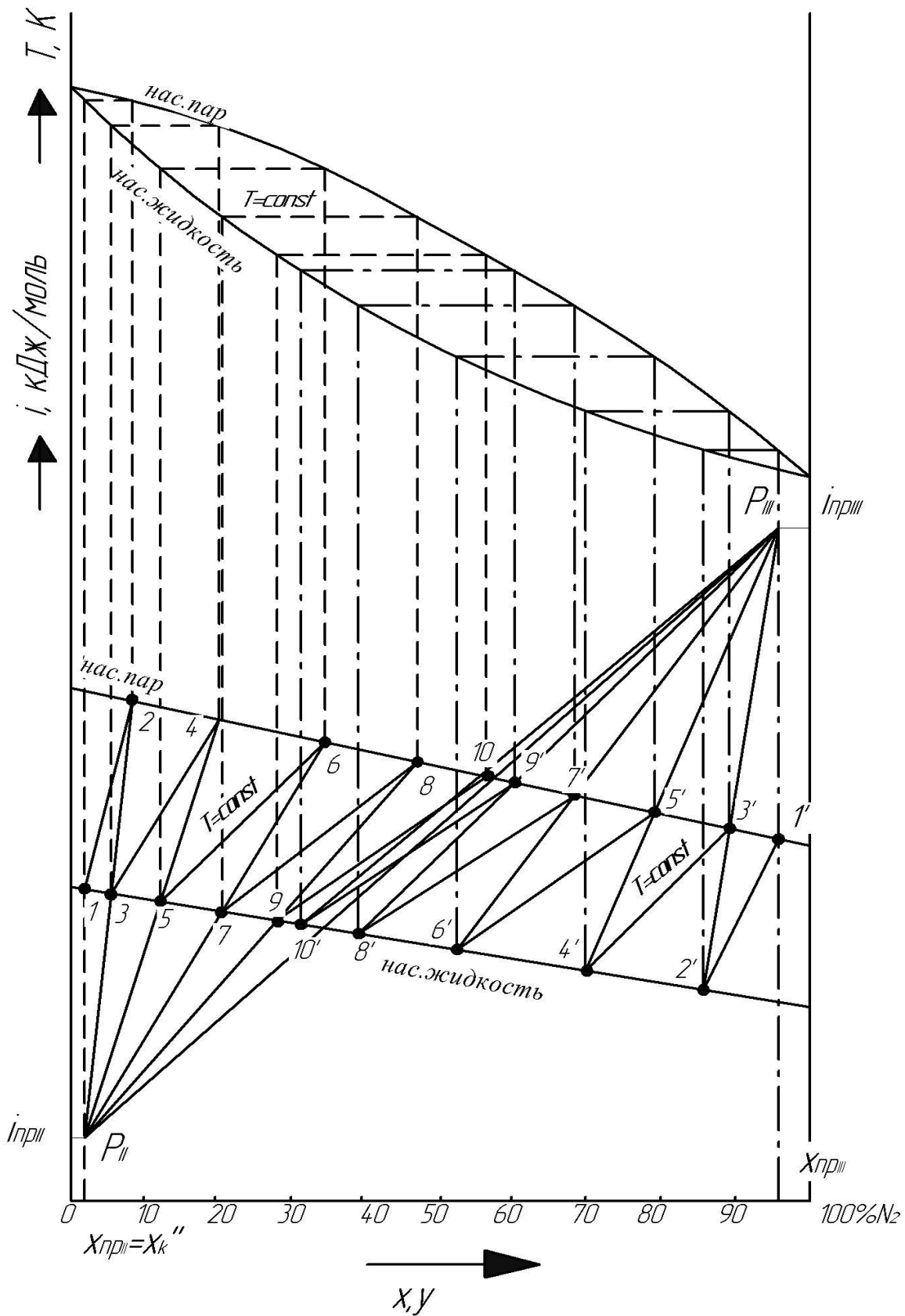


Рис.8. Диаграмма $i-x$, совмещенная с диаграммой $T-x$, для нахождения числа теоретических тарелок в верхней колонне

Исходной точкой I' для построения тарелок с концентрационной секции является состояние пара, покидающего самую верхнюю тарелку (с некоторым приближением его концентрацию можно принять равной x_A'').

Построение ведется аналогично описанному выше до пересечения последней изотермой (9–10) линии полюсов. Подсчет числа теоретических тарелок ведется отдельно для каждой секции, а затем определяется число действительных тарелок аналогично тому, как это делалось для нижней ректификационной колонны.

Кроме того, очевидно, что построение теоретических тарелок после изотермы 9–10 может быть продолжено с учетом полюса P_{III} до пересечения с полюсным лучом $P_{III} - x_D'$.

При этом следует учесть, что число действительных тарелок в верхних колоннах без отвода аргонных фракций обычно равно 36, а $\eta_{\phi} = 0,25 - 0,45$.

КОЛОННА ДВУКРАТНОЙ РЕКТИФИКАЦИИ, ИМЕЮЩАЯ ПЕРЕОХЛАДИТЕЛЬ АЗОТНОЙ ФЛЕГМЫ НИЖНЯЯ КОЛОННА СО ЗМЕЕВИКОМ (рис. 9)

Обозначения величин аналогичны предыдущему расчету. Величина переохладения азотной флегмы ΔT_D принимается равной $8 \div 10$ К.

I. Нижняя колонна

1. Проверяем температурный напор в конденсаторе аналогично тому, как это делалось при расчете нижней колонны без змеевика.

2. Ввиду того, что сжатый воздух после змеевика дросселируется в среднюю часть нижней колонны, в данном случае она так же, как и верхняя, состоит из двух частей: отгонной части – ниже ввода воздуха после дросселя и концентрационной – выше ввода воздуха, поэтому необходимо определить координаты двух полюсов.

3. В отгонной секции колонны берем произвольное сечение I–I между тарелками ниже ввода воздуха. Обозначим количество проходящих через это сечение пара и жидкости соответственно через G_1 и g_1 . Составим материальный баланс и баланс по нижекипящему компоненту для части колонны под сечением I–I:

$$B + g_1 = B + G_1 + R;$$

$$\begin{cases} G_1 - g_1 = -R; \\ G_1 x_1'' - g_1 x_1' = -R x_R'. \end{cases}$$

$$x_{npI} = \frac{G_1 x_1'' - g_1 x_1'}{G_1 - g_1} = \frac{-R x_R'}{-R} = x_R'.$$

Расчет ведется на 1 м^3 разделяемого воздуха при нормальных условиях.

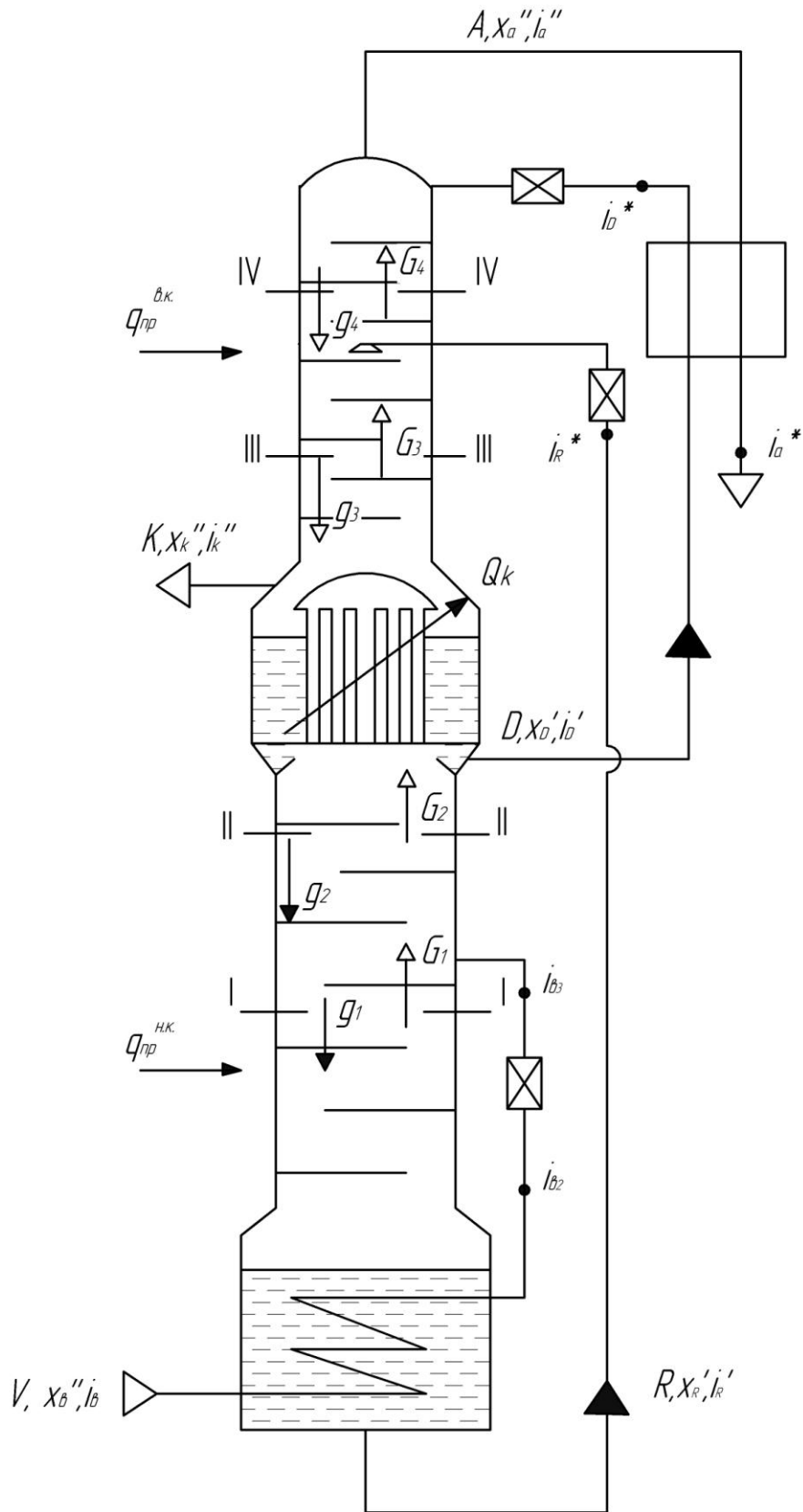


Рис. 9. Колонна двукратной ректификации, имеющая переохладитель азотной флегмы, нижняя колонна со змеевиком

Для нахождения i_{npl} составляем тепловой баланс колонны ниже сечения I–I:

$$Bi_{B_1} + g_1 i_1' = Bi_{B_2} + G_1 i_1'' + Ri_R';$$

$$G_1 i_1'' - g_1 i_1' = B(i_{B_1} - i_{B_2}) - Ri_R';$$

$$i_{npl} = \frac{G_1 i_1'' - g_1 i_1'}{G_1 - g_1} = \frac{B(i_{B_1} - i_{B_2})}{-R} - \frac{Ri_R'}{-R} = i_R' - \frac{B}{R}(i_{B_1} - i_{B_2}).$$

Удельное количество потоков A, K, D и R определяется таким же образом, как и в предыдущем расчете (нижняя колонна без змеевика).

Энтальпии i_K'', i_A'', i_R' и i_D' , кДж/кмоль, находятся по номограмме $T-i-p-x-y$.

Для нахождения энтальпии воздуха i_{B_1} на входе в колонну перед змеевиком составляем баланс энергий всего воздуходелительного аппарата:

$$Bi_{B_1} + B \sum q_c^K \cdot 22,4 = Ki_K'' + Ai_A^*.$$

Энтальпия i_A^* находится из теплового баланса переохладителя:

$$A\rho_A c_{P_A} \Delta T_A = A\rho_D c_{P_D} \Delta T_D,$$

$\rho_A \approx \rho_D$ (при нормативных условиях).

Из этого уравнения первоначально находим ΔT_A , затем i_A^*

$$i_A^* = i_A'' + c_{P_A} \Delta T_A \rho_A \cdot 22,4.$$

Для нахождения энтальпии сжатого воздуха после змеевика i_{B_2} первоначально определим по номограмме $T-i-p-x-y$ (по концентрации x_R' и давлению $p_{н.к}$) температуру кипения кубовой жидкости T_R . Температура сжатого воздуха на выходе из змеевика должна быть выше T_R на $8 \div 10$ К. Таким образом, $T_{B_2} = T_R(8 \div 10)$. Затем по $S-T$ диаграмме для воздуха находим $i_{B_2}^*$ (по температуре T_{B_2} при давлении $p = 20$ МПа). Эту величину нужно перевести в начало отсчета энтальпий по номограмме $T-i-p-x-y$. Поправка имеет положительное значение, т.е. к энтальпии $i_{B_2}^*$, полученной по диаграмме $S-T$, необходимо

прибавить поправку, чтобы перейти в номограмму $T-i-p-x-y$, т.е. получить i_{B_2} . Для некоторых диаграмм $S-T$ величина поправки дана в [7, с. 6–7]. Если в расчетах используется $S-T$ диаграмма, взятая из другого литературного источника, то в этом случае необходимо определить поправку самостоятельно. С этой целью для нескольких давлений снимаются значения энтальпий сухого насыщенного пара и насыщенной жидкости по диаграмме $S-T$ и номограмме (при концентрации 79,1 % N_2) и находится средняя величина разницы этих значений.

4. В концентрационной секции колонны берем произвольное сечение II–II между тарелками выше ввода воздуха. Количество пара и жидкости, проходящее через это сечение, обозначим через G_2 и g_2 . Составим материальный баланс и баланс по нижекипящему компоненту выше сечения II–II:

$$\begin{cases} G_2 = g_2 + D; \\ G_2 x_2'' = g_2 x_2' + D x_D'. \end{cases}$$

$$\begin{aligned} G_2 - g_2 &= D; \\ G_2 x_2'' - g_2 x_2' &= D x_D'; \end{aligned}$$

$$x_{npII} = \frac{G_2 x_2'' - g_2 x_2'}{G_2 - g_2} = \frac{D x_D'}{D} = x_D'.$$

Баланс энергий колонны выше сечения II–II:

$$\begin{aligned} G_2 i_2'' &= g_2 i_2' + D i_D' + Q_K; \\ G_2 i_2'' - g_2 i_2' &= D i_D' + Q_K; \end{aligned}$$

$$i_{npII} = \frac{G_2 i_2'' - g_2 i_2'}{G_2 - g_2} = \frac{D i_D' + Q_K}{D} = i_D' + \frac{Q_K}{D} = i_D' + q_D.$$

Величина Q_K определяется из теплового баланса нижней колонны:

$$B i_{B_1} + B q_c^{h.k} \cdot 22,4 = R i_R' + D i_D' + Q_K,$$

а затем проверяется из теплового баланса верхней колонны:

$$Ai_A'' + Ki_K'' = Ri_R' + Di_D^* + Bq_c^{6.K} \cdot 22,4 + Q_K.$$

Энтальпия

$$i_D^* = i_D' - c_{P_D} \Delta T_D \rho_D \cdot 22,4.$$

5. После определения координат полюсов строим диаграмму $T-x$, совмещенную с диаграммой $i-x$ для давления $p_{н.к}$ (рис. 10), отмечаем положение полюсов P_I и P_{II} и проводим линию полюсов $P_I - P_{II}$, которая должна пройти через точку M с координатами $x_B, i_{B_2} = i_{B_3}$. Процесс построения тарелок в каждой секции аналогичен описанному выше для верхней колонны (в каждой секции тарелки строятся с использованием своего полюса до пересечения с линией полюсов).

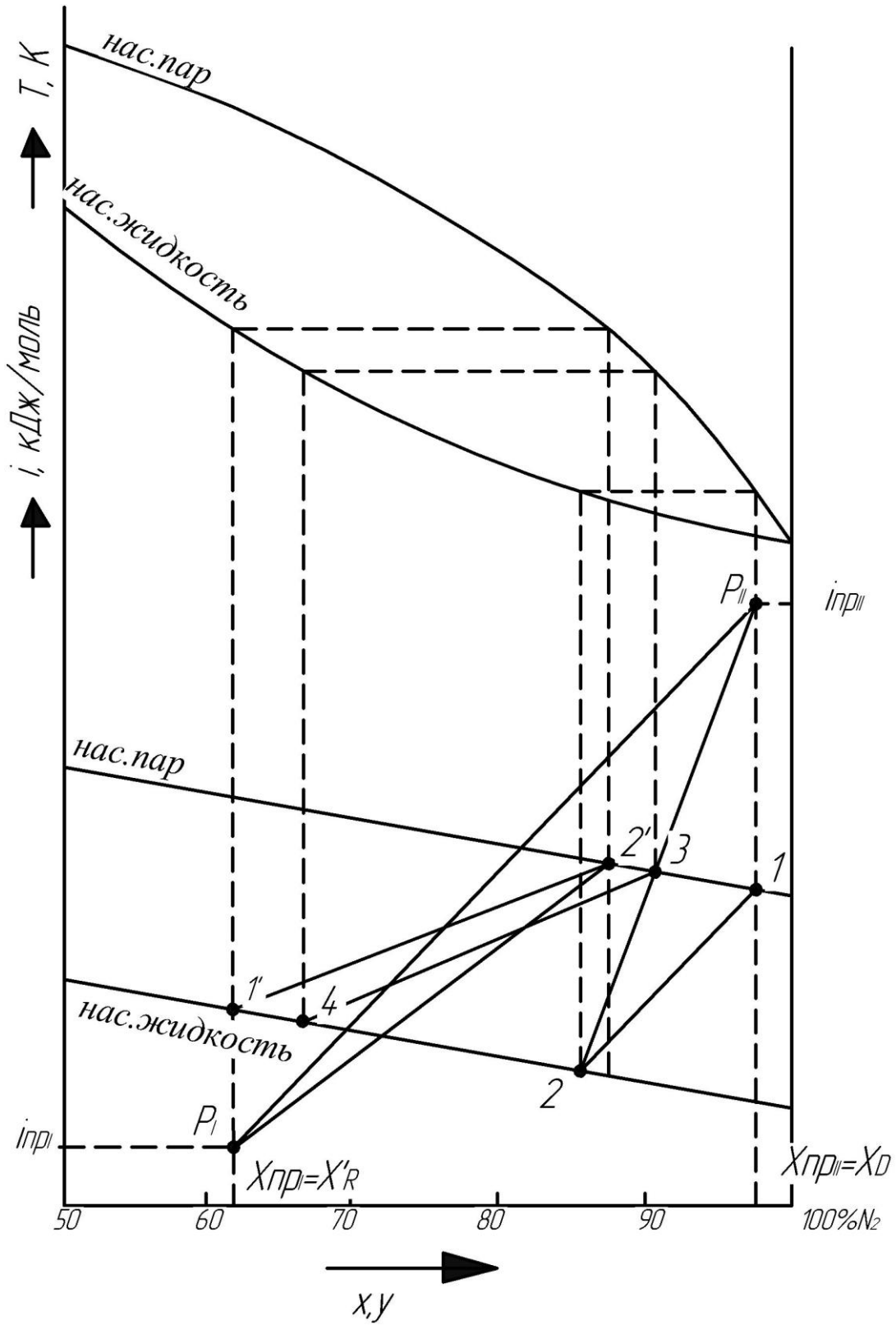


Рис. 10. Диаграмма i - x , совмещенная с диаграммой T - x , для нахождения числа теоретических тарелок в нижней колонне

II. Верхняя колонна

Расчет числа тарелок в верхней колонне в этом случае производится так же, как и в том случае, если нижняя колонна выполнена без змеевика (см. предыдущий расчет).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Архаров А.М. и др.** Криогенные системы: Учеб. для студ. вузов по спец. “Техника и физика низких темпер”. В 2 т. Т.1. Основы теории и расчета. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1996. – 576 с.
2. **Архаров А.М.** Основы криологии. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2014. – 507 с.
3. **Наринский Г.Б.** Ректификация воздуха. – М.: Машиностроение, 1978. – 248 с.
4. Кислород: Справочник под ред. Д.Л. Глизманенко, ч. I. – М.: Металлургия, 1967. – 422 с.
5. **Холодковский С.В.** Термодинамические диаграммы криогенных продуктов. 2-е изд., испр. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2011. – 40 с.
6. **Акулов Л.А., Борзенко Е.И., Зайцев А.В.** Теплофизические свойства и фазовое равновесие криопродуктов: Справочник. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2009. – 567 с.
7. Примеры расчетов установок глубокого охлаждения. Под ред. С.С. Будневича – Л.: Машиностроение, 1972. – 288 с.

Дополнительная

- Головко Г.А.** Установки для производства инертных газов. – Л.: Машиностроение, 1974. – 384 с.
- Разделение воздуха методом глубокого охлаждения. Под ред. В.И. Елифановой и Л.С. Аксельрода, т. I. – М.: Машиностроение, 1973. – 72 с.
- Справочник по физико-техническим основам криогеники. Под ред. проф. М.П. Малкова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 350 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Ректификация воздуха.....	4
Колонны для разделения воздуха	5
Графические расчеты при помощи i - x диаграммы.....	10
Колонна двукратной ректификации, имеющая переохладитель азотной флегмы и кубовой жидкости. Нижняя колонна без змеевика (рис. 6).....	15
Колонна двукратной ректификации, имеющая переохладитель азотной флегмы. Нижняя колонна со змеевиком (рис. 9).....	27
Список литературы.....	34

Борзенко Евгений Иванович
Логвиненко Екатерина Владимировна

РАСЧЕТ КОЛОННЫ ДВУКРАТНОЙ РЕКТИФИКАЦИИ ВОЗДУХА С ПОМОЩЬЮ i -х ДИАГРАММЫ

Учебно-методическое пособие

Ответственный редактор
Т.Г. Смирнова

Компьютерная верстка
Д.Е. Мышковский

Дизайн обложки
Н.А. Потехина

Подписано в печать 16.03.2016. Формат 60×84 1/16
Усл. печ. л. 2,09. Печ. л. 2,25. Уч.-изд. л. 2,13
Тираж 50 экз. Заказ № С 8

Университет ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Издательско-информационный комплекс
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9