

ченного расхода греющего пара, не компенсируемого снижением потерь спирта.

Значение  $X_0$  оптимального тем меньше, чем ниже температура бражки на входе в колонну  $t_M$ . Оптимальное значение  $X_0$  смещается в сторону меньших значений при открытом обогреве колонны.

Таким образом, анализ экономических характеристик дает возможность сделать вывод о путях достижения максимальной экономичности процесса как на этапе проектирования, так и в процессе эксплуатации. Минимальное значение  $K$  соответствует максимальной концентрации и температуре бражки. Желательно увеличение числа тарелок в колонне, так как при этом снижаются затраты на процесс и повышается устойчивость работы колонны в оптимальных условиях. Предел увеличения  $n$  определяется в зависимости от достижимых  $X_M$  и  $t_M$ . Оптимальное значение  $X_0$  зависит в основном от  $X_M$  и  $n$ .

Ввиду большого влияния  $X_M$  на экономичность процесса А. П. Николаев считает целесообразным оперативно рассчитывать изменение расхода пара  $\Delta P$  на процесс и связанных с расходом пара затрат в зависимости от изменения  $X_M$ , для чего им построен график, приведенный на рис. 58.

Выше рассмотрена экономическая характеристика бражной колонны брагоректификационной установки косвенного действия. В основном аналогичные зависимости получаются и при рассмотрении экономических характеристик бражных колонн других типов ректификационных установок [11].

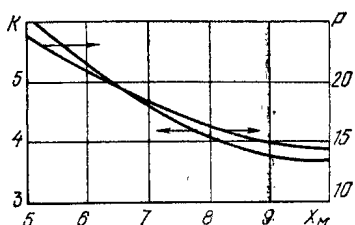


Рис. 58. Изменение расхода пара ( $P$ , кг на 1 дал безводного спирта) и затрат ( $K$ , коп. на 1 дал безводного спирта) на перегонку при изменении содержания спирта в бражке ( $X_M$ , % об.)

## Глава IV. АНАЛИЗ РАБОТЫ ЭПЮРАЦИОННЫХ КОЛОНН

В спирте-сырце, бражном дистилляте или в спирто-водном паре, выходящем из бражной колонны, содержатся разнообразные летучие примеси, характеристика которых дана во введении.

Общее содержание летучих примесей, сопутствующих спирту, невелико. Оно обычно составляет около 0,5% от количества спирта и только в отдельных случаях доходит до 1%. В процессе ректификации спирт должен быть почти полностью освобожден от всех сопутствующих летучих примесей. Допустимое содержание летучих примесей (кроме воды) в ректифицированном спирте ничтожно. В зависимости от того, насколько удастся освободить спирт от сопутствующих летучих примесей, судят об эффективности работы ректификационных установок.

Наряду с выделением примесей в процессе ректификации происходит и их концентрирование. Чем выше будет концентрация примесей, выводимых с побочными продуктами, тем выше будет выход ректифицированного спирта.

Назначение эюрационной колонны состоит в том, чтобы выделить из смеси спирта и сопутствующих ему летучих примесей головные продукты, сконцентрировать их и вывести из установки. При брагоректификации может проводиться эюрация как бражки, так и бражного дистиллята. В ряде случаев применяется двукратная эюрация, при которой обработке подвергают и бражку, и бражной дистиллят (см. рис. 16, 23, 27 и др.). В пределе эюрация должна полностью освободить спирт от сопутствующих ему головных примесей.

Для эюрации бражки, спирта-сырца и бражного дистиллята пользуются, как правило, полными колоннами, однако в отдельных случаях применяют только отгонные (см. рис. 22). В отгонной части эюрационной колонны происходит выделение головных примесей из спирто-водного потока, а в укрепляющей части — их концентрирование.

Эюрационные колонны питаются бражкой (в БРУ прямого действия), спиртом-сырцом (в установках для ректификации спирта-сырца), бражным дистиллятом (в БРУ косвенного действия) или спирто-водным паром (в БРУ полупрямого действия), выходящим непосредственно из бражной колонны. В БРУ косвенно-прямоточного действия эюрационная колонна питается дистиллятом, в котором концентрация примесей примерно в 2 раза выше, чем в БРУ косвенного действия.

В БРУ прямого действия в эюрационную колонну вводится бражка, предварительно нагретая до 60—90°C и освобожденная в значительной мере от диоксида углерода в сепараторе CO<sub>2</sub>. Из нижней части колонны выводится бражка, освобожденная от головных примесей и остатка диоксида углерода. Колонны для эюрации бражки обогреваются освобожденным от головных примесей спирто-водным паром, выходящим из бражной колонны.

При питании эюрационной колонны бражным дистиллятом в БРУ косвенного действия он вводится при температуре, близкой к температуре кипения. Концентрация спирта в бражном дистилляте такая же, как и в спирто-водном паре, поступающем непосредственно из бражной колонны, — 30—60% об. Из нижней части колонны выводится освобожденный от головных примесей бражной дистиллят — эюрат. Содержание спирта в нем определяется содержанием спирта в питании, способом обогрева колонны (применяется как открытый, так и закрытый) и количеством продукта, отбираемого из верхней части колонны.

В установках для ректификации спирта-сырца последний разбавляется до концентрации 50—70% об. и подогревается до температуры около 70—80°C.

Полные эюрационные колонны снабжаются дефлегматорами

для конденсации основной части парового потока, выходящего из верхней части колонны, и конденсаторами для конденсации остатальной части парового потока.

Из конденсатора отбирается головная фракция — этиловый спирт концентрацией 92—96% об., обогащенный головными примесями. Величина отбора головной фракции определяется количеством и степенью концентрирования головных примесей и колеблется в широких пределах — от 0,1 до 15% от введенного в колонну спирта.

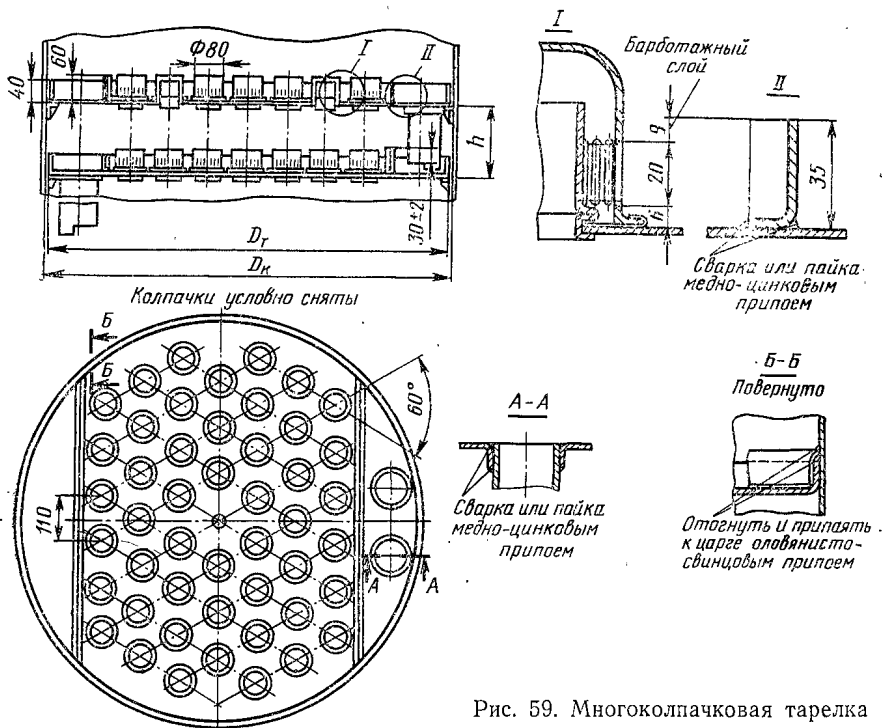


Рис. 59. Многоколпачковая тарелка

Обогащенный головными примесями спирто-водный пар, выходящий из верхней части открытой элюационной колонны, имеет обычно сравнительно низкую концентрацию (30—60% об.) и низкую концентрацию головных примесей. С ним отводится около 30—50% спирта, введенного в элюационную колонну. Пар после предварительной конденсации или без нее направляется в другую элюационную колонну для вторичной элюации.

Работу элюационной колонны (подача пара и питания, отбор головной фракции) регулируют обычно с таким расчетом, чтобы содержание уксусного альдегида в элюате было не более 0,0005% об., а содержание метилового спирта в том случае, когда ректификованный спирт не выдерживает пробу на содержание метилового спирта, в элюате было не более 0,07% об. при выработ-

ке спирта высшей очистки и не более 0,04% об. при выработке спирта экстра.

Современные установки для ректификации спирта-сырца и брагоректификационные установки снабжаются эпурационными колоннами закрытого типа с 39—40 многоколпачковыми тарелками, причем ввод питания предусматривается на 20, 28 или 36-ю тарелку, считая снизу.

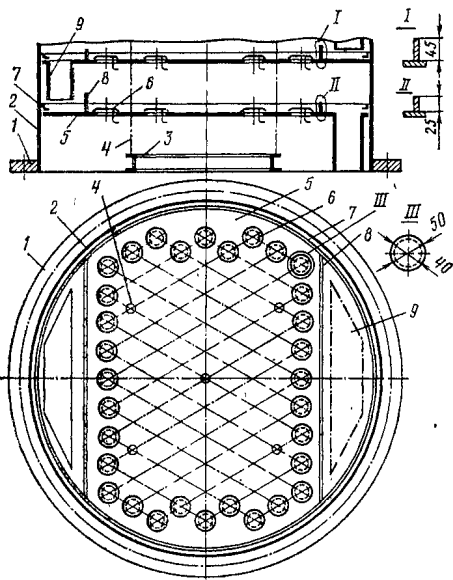


Рис. 60. Клапанная тарелка:

1 — фланец; 2 — обечайка; 3 — опорные балки; 4 — опорные стойки; 5 — плато тарелки; 6 — клапаны; 7 — уплотнение по периметру тарелки; 8 — переливные пороги; 9 — переливной стакан.

В зарубежных установках встречаются эпурационные колонны с числом тарелок в отгонной части от 2 до 30 при общем числе их до 60.

В той части эпурационной колонны, где движется бражка, устанавливаются одноколпачковые или ситчатые тарелки такой же конструкции, как и в бражных колоннах; там, где движется спирто-водная смесь без взвешенных частиц, — многоколпачковые или клапанные тарелки.

Нормализованные внутренние диаметры многоколпачковых колонн (в мм): 500, 600, 700 (750), 800 (850), 900 (950), 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000 — при межтарелочном расстоянии 170, 200 и 230 мм.

На рис. 59 показаны конструктивные элементы многоколпачковых тарелок. КПД

этих тарелок уменьшается с увеличением диаметра колонны (особенно сверх 1,25 м) и может быть принят в пределах 0,5—0,35, а в некоторых случаях достигает 0,7.

Эпурационные колонны (царги и тарелки) изготавливаются из листовой меди толщиной 1,5—3,5 мм. В настоящее время начат выпуск эпурационных колонн из нержавеющей стали с клапанными тарелками (рис. 60).

### Распределение концентраций спирта по тарелкам эпурационной колонны

На работу эпурационной колонны оказывает влияние удельный расход пара, концентрация спирта в питании, качественный состав примесей и их количество, число тарелок в отгонной ( $N_o$ ) и концентрационной ( $N_k$ ) части колонны, способ и величина отбора головной фракции.

При расчете и анализе работы эapurационных колонн ректификационных установок в первую очередь необходимо знать распределение концентраций спирта по тарелкам колонны, так как от этого зависят коэффициенты испарения выделяемых в колонне примесей.

Полные эapurационные колонны. Головную фракцию отбирают из эapurационной колонны непрерывно или периодически. Периодический отбор сопровождается длительными задержками от нескольких часов до нескольких суток, а сам отбор производится быстро, за 10—30 мин.

Для решения вопроса о распределении концентраций спирта по тарелкам построим на диаграмме  $X—Y$  рабочие линии для обеих частей колонны. Для простоты построения примем, что число флегмы колонны  $R = \infty$  и колонна питается жидкостью при температуре кипения. Тогда рабочая линия концентрационной части колонны, выраженная уравнением

$$Y = X, \quad (74)$$

совпадает с диагональю диаграммы. При работе колонны с бесконечным числом флегмы головная фракция не отбирается, колонна работает с задержкой. Однако и при непрерывном отборе, когда головная фракция отбирается в небольшом количестве, число флегмы колонны в первом приближении может быть принято равным  $\infty$ .

На рис. 61 показано построение рабочих линий эapurационной колонны для случая открытого (а) и закрытого (б) обогрева. Для определения концентрации спирта по тарелкам допустим, что отгонная часть колонны имеет 16 реальных тарелок, или 8 теоретических, при условии, что КПД тарелок равен 0,5. Проводя построение теоретических тарелок (ступеней изменения концентраций) для этой части колонны, легко убедиться, что большинство ступеней практически совпадает с точкой пересечения рабочей линии отгонной части колонны с кривой равновесия. Максимальное изменение концентрации от точки 1 до точки 2 происходит за счет испарения жидкости

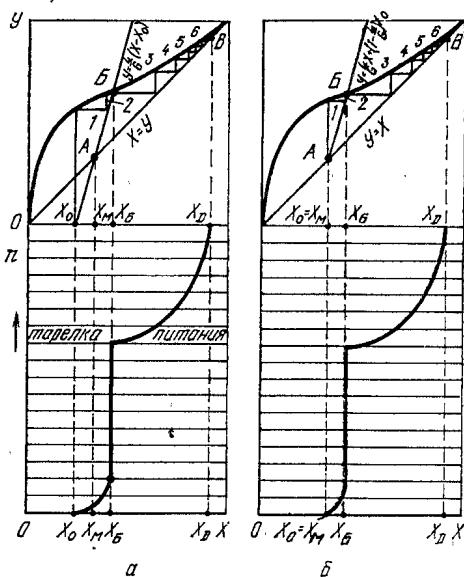


Рис. 61. Построение рабочих линий и график распределения концентраций спирта в эapurационной колонне

в кубе. График показывает, что на большинстве тарелок отгонной части эaporationной колонны концентрация спирта должна быть практически постоянной, близкой к концентрации, соответствующей точке *Б*.

Содержание спирта в жидкости на тарелках концентрационной части колонны будет соответствовать содержанию спирта, определяемому точками 3, 4, 5, 6 и т. д. на диагонали диаграммы.

Точка *А*, являющаяся точкой пересечения рабочих линий отгонной и концентрационной частей колонны, соответствует содержанию спирта в питающей колонну жидкости. Во всех случаях жидкость на тарелках, расположенных ниже ввода питания в колонну, имеет более высокую концентрацию, чем питающая колонну жидкость, и только в колоннах, обогреваемых открытым паром (рис. 62, *а*), содержание спирта в кубе ниже, чем в питающей колонну жидкости. В колонне с закрытым обогревом содержание спирта в этой жидкости практически равно содержанию спирта в эпорате (рис. 62, *б*).

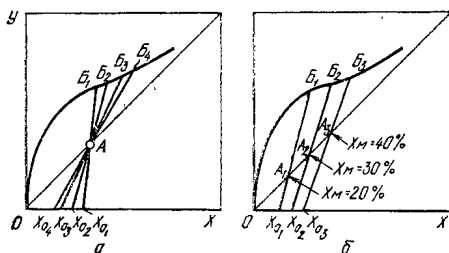


Рис. 62. Зависимость положения рабочей линии от удельного расхода пара (а) и концентрации спирта в питании (б)

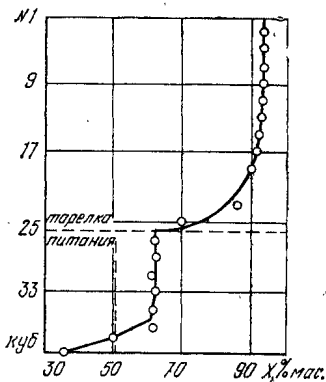


Рис. 63. Распределение концентраций спирта по тарелкам эaporationной колонны

Положение рабочей линии отгонной части колонны изменяется за счет изменения удельного расхода пара и содержания спирта в питающей колонну жидкости.

На рис. 62, *а* показана зависимость положения рабочей линии от удельного расхода пара. При изменении расхода пара рабочая линия вращается вокруг точки *А*, а точка *Б* скользит по кривой равновесия. С увеличением удельного расхода пара рабочая линия вращается по часовой стрелке, а с уменьшением — против нее. Соответственно и концентрация спирта на тарелках отгонной части возрастает или уменьшается. Изменение концентрации спирта в эпорате в колоннах с обогревом открытым паром будет противоположным изменению концентрации жидкости на тарелках.

На рис. 62, б показана зависимость положения рабочей линии от концентрации спирта в жидкости, питающей колонну. С увеличением концентрации точка А смещается вправо, угол наклона рабочей линии уменьшается в соответствии с уравнениями (15) и (16), следовательно, точка В, скользя по кривой равновесия, будет смещаться вправо быстрее. Другими словами, с увеличением концентрации питающей колонну жидкости нарастание концентрации спирта на тарелках отгонной части колонны идет еще быстрее.

В эспираторной колонне мы имеем наглядный пример ввода питания на тарелку, расположенную выше нормальной тарелки питания, содержание спирта на которой должно совпадать с содержанием спирта в жидкости, подаваемой в колонну. Однако это явление в данном случае не следует считать отрицательным, так как целью работы отгонной части эспираторной колонны является не концентрирование спирта, а выделение примесей, поэтому процесс изменения концентрации спирта по тарелкам отгонной части колонны является второстепенным.

На рис. 63 приведены данные о теоретическом и практическом, полученном на основании опыта, распределении содержания спирта по тарелкам отгонной и концентрационной частей эспираторной колонны для случаев работы колонны в одинаковых условиях (содержание спирта в питающей колонну жидкости равно 50,5% мас.; удельный расход пара 0,86 кг на 1 кг вводимого в колонну спирта). При теоретическом определении концентрации жидкости на тарелках КПД тарелок принят равным 0,5. На рисунке ясно видно, что данные, полученные опытным путем, совпадают с теоретическими (сплошная линия); это доказывает правильность выбранной величины КПД. Эксперимент был проведен на Лохвицком спиртокомбинате.

В установках прямого действия (рис. 64) эспираторная колонна больше связана с бражной, нежели в установках косвенного действия, так как бражная колонна питается через эспираторную, а последняя обогревается спирто-водным паром, выходящим из бражной колонны. Поэтому распределение концентраций спирта по тарелкам эспираторной колонны находится в зависимости от концентраций спирта в бражной колонне. Чтобы выявить эту зависимость, составим материальный и тепловой балансы эспираторной колонны (см. рис. 64).

Материальный баланс эспираторной колонны по всему продукту

$$M + H + G_1 = E + L_1, \quad (75)$$

где  $M$  — количество бражки, кг;  $H$  — количество непастеризованного спирта, кг;  $G_1$  — количество спирто-водного пара, поступающего из бражной колонны на обогрев эспираторной, кг;  $E$  — количество головной фракции, кг;  $L_1$  — количество эспираторной бражки, кг.

Величины  $M$ ,  $H$ ,  $E$  заданные. Количество спирто-водного пара  $G_1$ , поступающего из бражной колонны на обогрев эспираторной,

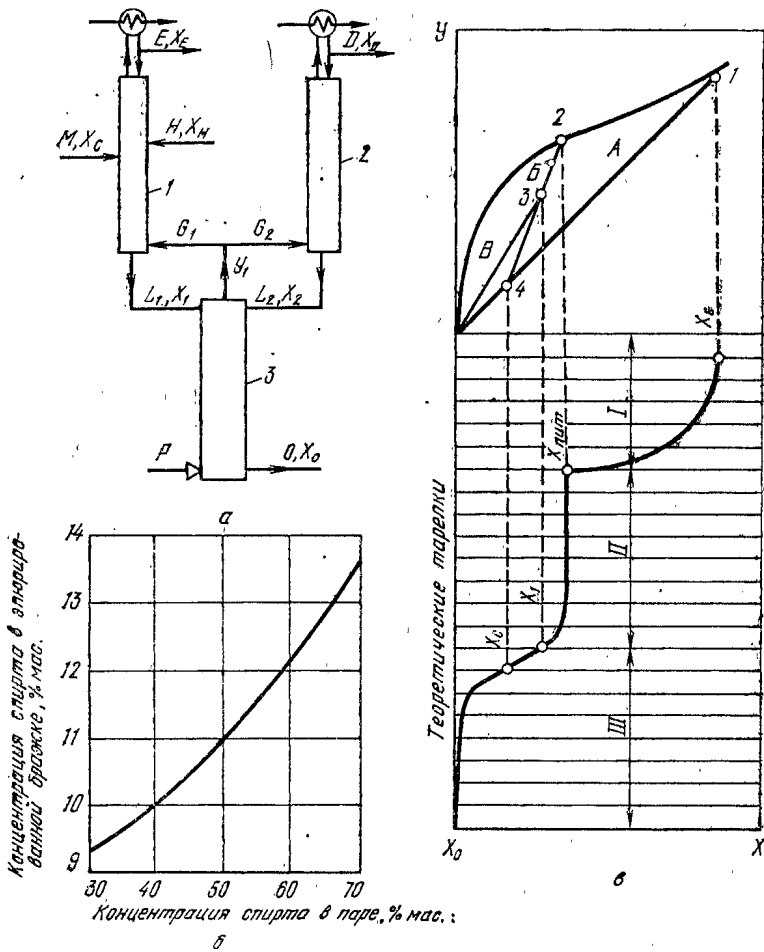


Рис. 64. К анализу работы установки прямого действия:

*a* — принципиальная схема установки: колонны: 1 — эвaporационная; 2 — спиртовая; 3 — бражная; *б* — зависимость содержания спирта в эвaporированной бражке ( $X_2$ , % мас.) от концентрации спирто-водного пара, поступающего на обогрев ( $X_1$ , % мас.); *в* — положение рабочих линий эвaporационной и бражной колонн и характер распределения концентраций спирта по высоте колонн. А — рабочая линия концентрационной части эвaporационной колонны I; Б — та же, отгонной части II; В — та же, бражной колонны III

определяется исходя из необходимого парового потока для обеспечения заданной эвaporации. Неизвестной величиной остается только  $L_1$ , которая легко определяется из уравнения (75).

Примем, что в эвaporационную колонну поступает бражка с содержанием спирта 7,5% мас.; удельный расход нормального пара на эвaporацию бражки 0,8 кг на 1 кг вводимого в колонну спирта; количество вводимого непастеризованного спирта 0,2 кг, концентрация его 94,13% мас.; отводится из колонны 0,1 кг головной фракции с концентрацией спирта 93,9% мас. Задаемся первоначальной концентрацией спирто-водного пара, поступающего из бражной ко-



лонны в эюрационную, равной 40% мас., чему соответствует теплота испарения спирто-водного пара  $r = 1693$  кДж/кг.

При удельном расходе пара на обогрев эюрационной колонны 0,8 кг/кг (в пересчете на нормальный пар) количество спирто-водного пара, поступающего из бражной колонны в эюрационную, на 100 кг бражки составит

$$G_1 = \frac{0,8 \cdot 7,5 \cdot 2263}{1693} = 8 \text{ кг},$$

где 2263 — теплота испарения нормального водяного пара, кДж/кг.

Материальный баланс эюрационной колонны:

$$100 + 0,2 + 8 = L_1 + 0,1,$$

откуда  $L_1 = 108,1$  кг.

Из баланса колонны по спирту найдем концентрацию спирта в эюрированной бражке  $X_1$ :

$$100 \frac{7,5}{100} + 8 \frac{40}{100} + 0,2 \frac{94,13}{100} = 108,1 \frac{X_1}{100} + 0,1 \frac{93,9}{100},$$

откуда  $X_1 \approx 10\%$  мас.

Из баланса следует, что концентрация спирта в эюрированной бражке возрастает по сравнению с концентрацией его в бражке, введенной в эюрационную колонну. По всей видимости, концентрация спирта будет тем выше, чем более концентрированным будет спирто-водный пар, поступающий из бражной колонны в эюрационную, и чем больше его будет. На рис. 64, б дан график зависимости содержания спирта в эюрированной бражке от концентрации спирто-водного пара при удельном расходе пара на обогрев эюрационной колонны 0,8 кг/кг. На рис. 64, в в координатах  $X$ — $Y$  показано положение рабочих линий эюрационной и бражной колонн для установки прямого действия и точки, характеризующие концентрацию спирта в барде ( $X_0$ ), в питании ( $X_c$ ) в эюрированной бражке ( $X_1$ ), на тарелке питания эюрационной колонны ( $X_{\text{пит}}$ ) и в головной фракции ( $X_E$ ).

В нижней части рис. 64, в показан характер распределения концентраций спирта по высоте бражной и эюрационной колонн. Анализируя графики, можно сделать вывод, что концентрация спирто-водного пара, выходящего из бражной колонны, может изменяться от  $Y = X_c$  при  $G/L = 1$  (точка 4) до  $Y = Y_{\text{пит}}$  при минимальном паровом числе ( $G/L_{\text{мин}}$ , точка 2). В последнем случае концентрация спирта на всех тарелках отгонной части эюрационной колонны будет постоянной, а бражная колонна должна иметь  $n = \infty$ .

Ввиду того что в предыдущей главе мы не могли привести полный анализ работы бражной колонны установок прямого действия без анализа эюрационной колонны, остановимся на некоторых деталях её расчета здесь.

Материальный баланс бражной колонны по всему продукту при обогреве колонны открытым паром (см. рис. 64, а):

$$L_1 + L_2 + P = G_1 + G_2 + O. \quad (76)$$

Величины  $L_1$  и  $G_1$  известны. Для определения прочих величин

составим материальный баланс спиртовой колонны по всему продукту:

$$G_2 = L_2 + D, \quad \text{или} \quad L_2 = G_2 - D, \quad (77)$$

и по этиловому спирту

$$G_2 Y_1 = L_2 X_2 + D X_D. \quad (78)$$

Совместное решение уравнений дает возможность определить

$$G_2 = D \frac{X_D - X_2}{Y_1 - X_2}. \quad (79)$$

Концентрация спирта в флегме  $X_2$ , поступающей из спиртовой колонны в бражную, находится в определенной зависимости от  $Y_1$  и определяется из уравнения рабочей линии спиртовой колонны [см. уравнение (9)].

По найденному значению  $Y_1$  определяют  $G_2$  и  $L_2$ . В уравнении материального баланса бражной колонны (76) неизвестными величинами остаются  $P$  и  $O$ . Для их определения дополнительно составляется уравнение теплового баланса бражной колонны:

$$L_1 I_{L_1} + L_2 I_{L_2} + P I_P = G_1 I_{G_1} + G_2 I_{G_2} + O I_O + Q_{\text{п}}. \quad (80)$$

Совместное решение уравнений материального (76) и теплового баланса (80) позволяет определить расход пара.

Работа бражной колонны в установках прямого действия тесно связана с работой эспираторной и спиртовой колонн, а расход пара на нее определяется потребностью в паре эспираторной и спиртовой колонн.

Суммарный расход пара на эспираторную и спиртовую колонны значительно превышает минимальный расход, необходимый для бражной колонны, поэтому бражная колонна установок прямого действия может работать при меньшем числе тарелок по сравнению с бражными колоннами установок косвенного действия.

Неполные эспираторные колонны. Они могут быть только отгонными и применяются в некоторых типах установок полупрямого действия. Известны две разновидности таких колонн. В одном случае колонна обогревается водяным паром (см. рис. 22), в другом — спирто-водным паром, выходящим из бражной колонны (см. рис. 16). Для первого случая положение рабочей линии на диаграмме в координатах  $X$ — $Y$  определяется в соответствии с рис. 65, а, для второго — рис. 65, б. В обоих случаях характер распределения концентраций спирта по высоте колонны остается одинаковым (см. нижнюю часть рис. 65).

Проведенный анализ дает представление о характере распределения концентраций спирта по тарелкам эспираторной колонны, что позволяет более правильно вести расчет числа тарелок эспираторных колонн и анализировать их работу.

Изучая характер распределения концентраций спирта по тарелкам эспираторной колонны, можно отметить, что на большинстве тарелок отгонной части колонны концентрация спирта постоянна. В большей мере она изменяется в концентрационной

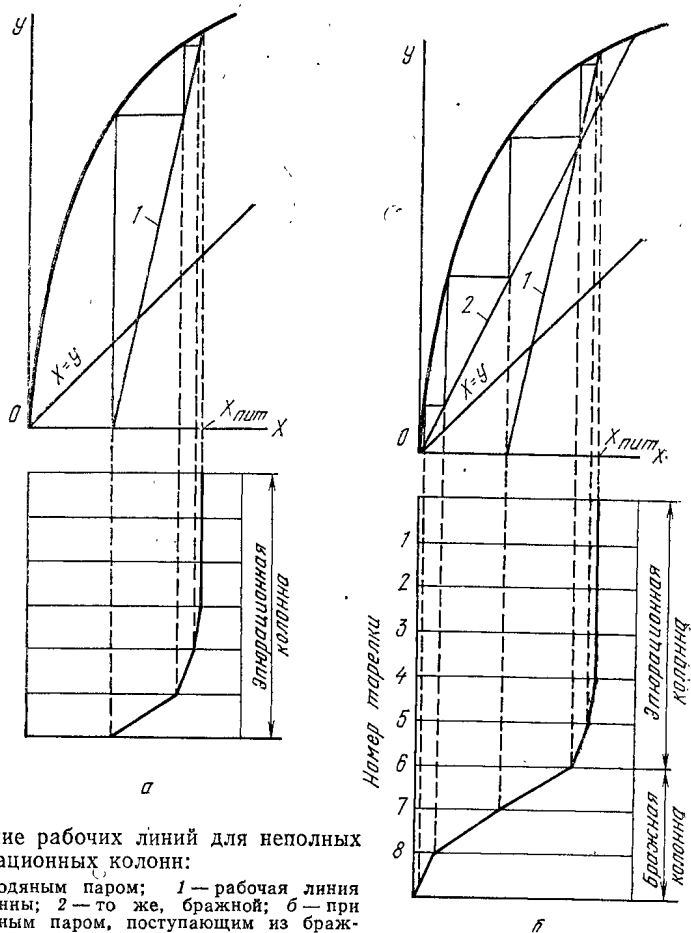


Рис. 65. Построение рабочих линий для неполных (открытых) эвaporационных колонн:

*a* — при обогреве водяным паром; 1 — рабочая линия эвaporационной колонны; 2 — то же, бражной; *b* — при обогреве спирто-водным паром, поступающим из бражной колонны

части и особенно — при работе колонн под разрежением, однако при расчете и анализе работы эвaporационной колонны, как правило, можно в первом приближении принимать концентрацию спирта на тарелках отгонной части колонны постоянной и равной концентрации его на тарелке питания, а для концентрационной части — равной концентрации спирта на верхней тарелке. Несомненно, такое допущение вносит некоторую погрешность в расчет, однако эта погрешность, как будет показано ниже, создает некоторый запас эффективности по выделению примесей, что нельзя считать большим недостатком расчета.

### Влияние различных факторов на извлечение примесей

Если обозначить концентрацию примеси в питающей колонну жидкости (бражке, бражном дистилляте, спирте-сырце) через  $\alpha_c$  и соответственно в эвaporате через  $\alpha_0$ , то величина  $\alpha_c/\alpha_0$  будет

характеризовать эффективность процесса эюрации. Назовем это отношение кратностью извлечения примесей. При анализе работы эюрационной колонны важно знать, какие факторы и в какой мере влияют на кратность извлечения примесей из спирта.

Учитывая незначительное изменение концентрации спирта на большинстве тарелок отгонной части эюрационной колонны, можно предположить, что при таких условиях, во-первых, сохранится практически постоянное значение коэффициента испарения многих примесей на большинстве тарелок отгонной части колонны, во-вторых, разделяемую смесь можно рассматривать как бинарную, состоящую из спирто-водного раствора (труднолетучий компонент) и головной примеси (легколетучий компонент).

При постоянном значении коэффициента испарения примесей кратность извлечения их может быть определена графически или аналитическим методом. Содержание примесей в спирте невелико (обычно не более 1% от количества этилового спирта).

При таких условиях, как правило, справедлив прямолинейный закон распределения компонентов в равновесных фазах, т. е.

$$\beta = K\alpha, \quad (81)$$

где  $\beta$  — равновесное содержание примеси в паре, % мас.;  $\alpha$  — содержание примеси в жидкости, % мас.;  $K$  — коэффициент испарения примеси.

Рабочая линия отгонной части колонны будет иметь вид

$$\beta = (L/G)(\alpha - \alpha_0). \quad (82)$$

На рис. 66 приведен пример графического расчета необходимого для извлечения примесей.

Если  $K \geq L/G$ , то при определенном числе тарелок возможно абсолютное извлечение примеси из спирто-водного раствора (абсолютная эюрация). При этом значение  $\alpha_0$  может приближаться к нулю на любую малую величину (рис. 66, а). При  $K < L/G$  даже с бесконечно большим числом тарелок невозможно получить содержание примеси в эюрате меньше  $\alpha_0'$  (рис. 66, б).

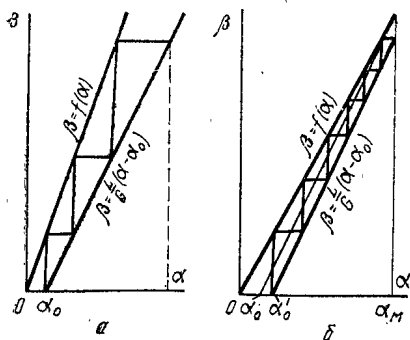


Рис. 66. Пример графического расчета числа тарелок в отгонной части эюрационной колонны

Линейная зависимость  $\beta = K\alpha$  дает возможность при анализе работы эюрационной колонны пользоваться более точным аналитическим методом расчета.

При  $L/G \neq K$  расчет кратности извлечения ( $\alpha_c/\alpha_0$ ) можно вести по формуле Сореля — Харина, приведя ее к виду

$$\alpha_c/\alpha_0 = \frac{\left(\frac{KG}{L}\right)^{n+1} - 1}{\frac{KG}{L} - 1}, \quad (83)$$

где  $L$  и  $G$  — величины соответственно жидкостного и парового потоков в отгонной части колонны, моль.

При  $L/G = K$

$$\alpha_c/\alpha_0 = n + 1, \quad (84)$$

где  $n$  — число теоретических тарелок в отгонной части колонны.

Величина парового потока определяется удельным расходом пара:

$$G = P/18 \text{ кмоль}, \quad (85)$$

где  $P$  — удельный расход пара, кг на 1 кг безводного спирта, введенного в колонну, в пересчете на нормальный пар.

Величина жидкостного потока для полной колонны складывается из потока питающей колонну жидкости (исходного продукта) и потока флегмы. При  $R = \infty$

$$L = M/M_{\text{ср}} + G \text{ моль}, \quad (86)$$

где  $M$  — масса исходного продукта, введенного в колонну, кг на 1 кг безводного спирта;  $M_{\text{ср}}$  — среднмолекулярная масса исходного продукта, кг/моль.

Масса исходного продукта зависит от концентрации спирта в нем, следовательно, величина жидкостного потока будет определяться концентрацией спирта в исходном продукте  $X_c$  и удельным расходом пара  $P$ . Таким образом, кратность извлечения примеси определяется коэффициентом испарения ее, удельным расходом пара, концентрацией спирта в исходном продукте и числом теоретических тарелок в отгонной части колонны.

Проанализируем количественное влияние каждого из этих факторов на кратность извлечения примесей. При расчетах воспользуемся формулами (83) и (84).

На рис. 67, а изображена зависимость между кратностью извлечения и коэффициентом испарения примеси  $K$ , которая показывает, что хорошо извлекаются примеси при  $K > L/G$ .

На рис. 67, б показана зависимость между кратностью извлечения и удельным расходом пара  $P$ ; при малом удельном расходе пара кратность извлечения незначительна и резко возрастает при удельном расходе пара, обеспечивающем величину  $L/G < K$ .

Зависимость кратности извлечения от концентрации спирта представлена на рис. 67, в, из которого следует, что влияние концентрации на кратность извлечения различных примесей неодинаково. Например, кратность извлечения уксусного альдегида (по Шиллингу) с повышением концентрации увеличивается, а уксусноэтилового эфира с повышением концентрации до 57% мас. умень-

шается. При дальнейшем повышении концентрации спирта кратность извлечения эфира практически остается постоянной. Зависимость кратности извлечения от концентрации более значительна при большем удельном расходе пара.

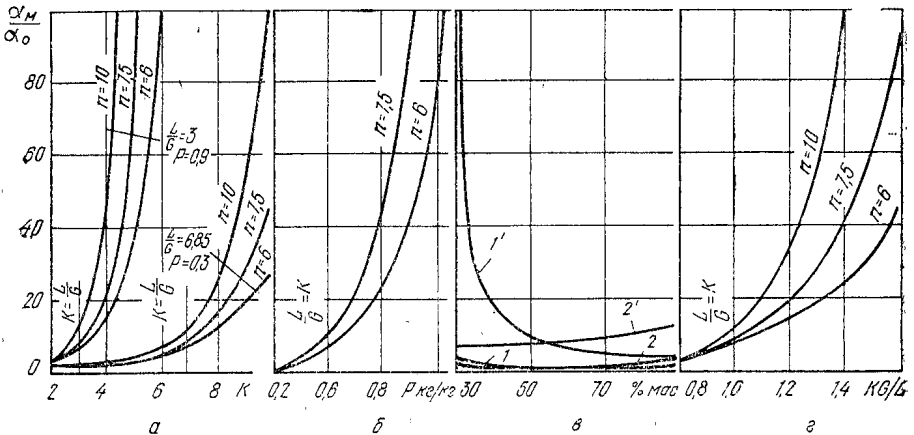


Рис. 67. Кратность извлечения примесей в зависимости от основных определяющих факторов:

1 — кротоновый альдегид; 2 — метанол; 1 и 2 — при  $P=0,4$  кг/кг, 1', 2' — при  $P=1,0$  кг/кг

Чтобы учесть одновременно влияние коэффициента испарения, удельного расхода пара и концентрации спирта на кратность извлечения, на рис. 67, *г* показана зависимость кратности извлечения от безразмерного комплекса  $KG/L$ , который объединяет все три указанных выше фактора; хорошее извлечение примеси достигается при величине  $KG/L > 1$ , когда также оказывает существенное влияние и число тарелок в отгонной части колонны. С увеличением числа тарелок повышается кратность извлечения примесей.

Из изложенного можно сделать вывод, что основным фактором, определяющим кратность извлечения примеси, является величина комплекса  $KG/L = S_0$  (критерий Сореля).

Для одновременного учета влияния числа тарелок на кратность извлечения примесей составлена номограмма (рис. 68, *а*), которая показывает зависимость между кратностью извлечения, безразмерным комплексом и числом тарелок:

$$\alpha_c/\alpha_0 = f(KG/L, n).$$

Величины  $K$  и  $L/G$  могут быть определены соответственно по табличным данным и расчетным путем или по рис. 68, *б*, на котором дана графическая зависимость коэффициентов испарения примесей  $K$  от концентрации спирта и зависимость отношения  $L/G$  от концентрации спирта и удельного расхода пара<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Зависимость между коэффициентом ректификации примесей ( $K'$ ) и концентрацией спирта для многих примесей была показана на рис. 5.

Кривые рис. 68, а связывают между собой величины  $\alpha_c$ ,  $\alpha_0$ ,  $K$ ,  $X$ ,  $P$  и  $n$  и дают возможность определить любую из них по прочим заданным, т. е. позволяют получать статические характеристики элюэционных колонн.

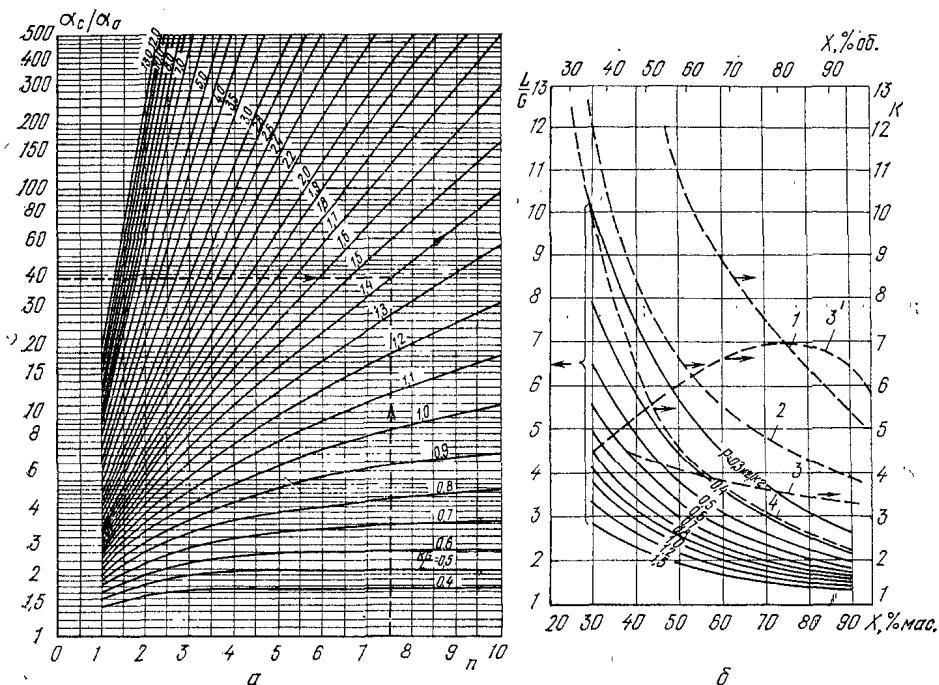


Рис. 68. Номограммы для определения зависимости:

а —  $\alpha_c/\alpha_0 = f\left(\frac{KG}{L}, n\right)$ ; б —  $L/G = f(X)$  и  $K = f(n)$ : 1 — муравьиноэтиловый эфир; 2 — уксуснометилловый эфир; 3 — уксусный альдегид (по Шиллингу); 3' — по В. М. Перельгину; 4 — уксусноэтиловый эфир

Головные примеси в основном представлены уксусным альдегидом, муравьиноэтиловым, уксуснометилловым и уксусноэтиловым эфирами. Кратность извлечения этих примесей при прочих равных условиях зависит от коэффициентов испарения, величины которых нанесены на рис. 68, б. Из сопоставления кривых, показывающих изменение коэффициентов испарения головных примесей, можно сделать вывод, что наиболее трудно извлекаются уксусный альдегид (при концентрации спирта-сырца ниже 57% мас.) и уксусноэтиловый эфир (при более высоких концентрациях). Следовательно, из головных примесей именно они являются определяющими при расчете элюэционной колонны.

Однако исходный продукт может содержать и другие головные примеси, выделение которых также необходимо. Чтобы определить условия их выделения, необходимо предварительно определить

характер изменения коэффициентов испарения их с изменением концентрации спирта в исходном продукте.

В ряде случаев для оценки эффективности работы эпорационной колонны целесообразно пользоваться не абсолютной величиной кратности извлечения, а относительной — степенью извлечения примеси, которая выражается в долях единицы (или в процентах):

$$\gamma = (\alpha_c - \alpha_0) / \alpha_c = 1 - 1/(\alpha_c / \alpha_0), \quad (87)$$

а обратная зависимость будет иметь вид

$$\alpha_c / \alpha_0 = 1 / (1 - \gamma).$$

Приведенные выше формулы (83), (84) и графики могут быть выражены через степень извлечения.

А. П. Николаев провел анализ работы эпорационной колонны при выделении метанола, кротонового альдегида, триэтиламина, акролеина. Данные анализа представлены в виде статических характеристик отгонной части эпорационной колонны (рис. 69).

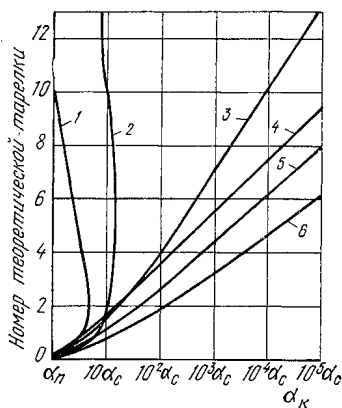
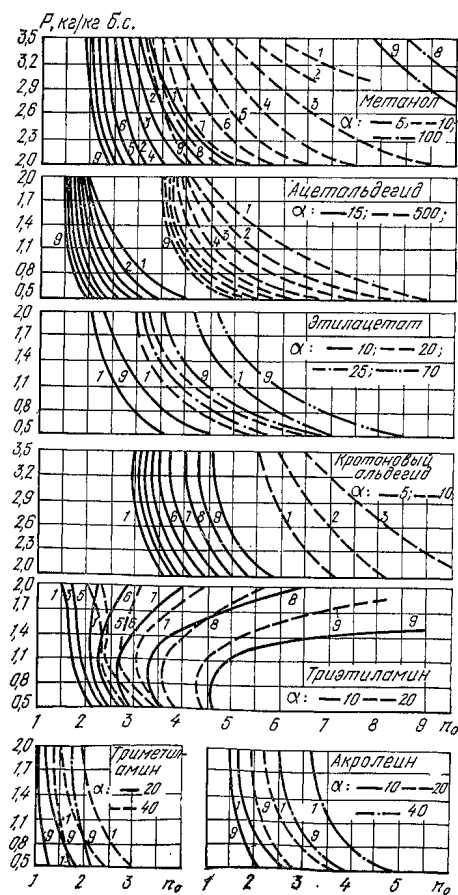


Рис. 70. График распределения примесей по высоте концентрационной части колонны при полном насыщении:

1 — изовалерианоэтиловый эфир; 2 — изомасляноэтиловый эфир; 3 — уксусноэтиловый эфир; 4 — уксуснометиловый эфир; 5 — муравьиноэтиловый эфир; 6 — уксусный альдегид

Рис. 69. Статическая характеристика отгонной части эпорационной колонны при  $X_m$ , % об.:

1 — 20; 2 — 25; 3 — 30; 4 — 35; 5 — 40; 6 — 45; 7 — 50; 8 — 55; 9 — 60



Общая закономерность, присущая процессу извлечения всех примесей, кроме триэтиламина, — положительное влияние увеличения расхода пара на процесс. Графики показывают, что извлечение метанола и кротонового альдегида связано со значительными трудностями. Оно осуществимо только при малых значениях  $\alpha_c/\alpha_0$  или при значительных расходах пара и большом числе тарелок.

Весьма своеобразно поведение триэтиламина. При некоторых условиях увеличение расхода пара может ухудшать его извлечение, а следовательно, привести к снижению качества ректификованного спирта.

Необходимая степень (кратность) извлечения примесей зависит от содержания их в исходном продукте, подвергаемом элюрации, т. е. в конечном счете от вида перерабатываемого на спирт сырья и его качества. Особенно велико различие в содержании альдегидов в исходном продукте (меласный спирт содержит их примерно в 3 раза больше, чем зерновой, и в 25—30 раз больше, чем картофельный). Ввиду того что содержание головных примесей в элюрате должно оставаться неизменным при очистке спирта, получаемого из различных видов сырья, в соответствии с увеличением содержания примесей в исходном продукте должна возрастать и степень извлечения их. Степень извлечения примесей может быть изменена прежде всего путем соответствующего изменения концентрации, вводимого в колонну исходного продукта (см. рис. 67, в), а затем — путем увеличения удельного расхода пара.

Приведенный анализ работы отгонной части элюрационной колонны сделан без учета влияния ее концентрационной части. Он полностью справедлив для колонн открытого типа. В колоннах закрытого типа (с дефлегмацией) работа концентрационной части может внести некоторые изменения в работу отгонной части колонны.

На рис. 70 приведены кривые распределения концентраций головных и некоторых промежуточных примесей по высоте концентрационной части колонны при полном ее насыщении.

Расчет проведен от тарелки к тарелке при  $R = \infty$  по формуле  $\alpha_n = K \alpha_{n-1}$ . Из рис. 70 видно, что по высоте колонны головные примеси 3, 4, 5, 6 быстро концентрируются. Промежуточные примеси 1, 2 имеют в концентрационной части колонны максимум концентрации.

Концентрационная часть колонны может оказать существенное влияние на работу отгонной части колонны, когда она будет пересыщена головными примесями. Рассмотрим этот случай на конкретных примерах. На рис. 70 видно, что из головных примесей уксусноэтиловый эфир обладает наименьшей степенью концентрирования, следовательно, им прежде всего будет насыщена колонна. Предположим, что концентрационная часть колонны имеет 12 реальных, или 6 теоретических, тарелок (при КПД 0,5). Емкость одной реальной тарелки (по флегме) обычно равна примерно двухминутному количеству питания, вводимого в колонну. Определяя

по рис. 70 максимально возможную степень насыщения для каждой тарелки, легко подсчитать, что при отсутствии отбора головной фракции (работа с задержкой) концентрационная часть колонны будет полностью насыщена уксусноэтиловым эфиром в течение примерно 60 ч.

При дальнейшей задержке отбора головной фракции начнется накопление уксусноэтилового эфира на тарелке питания, что равноценно повышению содержания примеси в исходном продукте. Это вызовет необходимость увеличить кратность извлечения в нижней части колонны, в противном случае задержка приведет к повышению содержания примесей в элюате. Чтобы избежать увеличения необходимой кратности извлечения, что связано с увеличением удельного расхода пара, необходимо начать отбор головной фракции. Минимальная величина отбора этой фракции будет определяться из баланса уксусноэтилового эфира, введенного в колонну и выведенного из нее, и степенью его концентрирования. Если концентрация его на верхней тарелке колонны достигла  $\alpha_k = 5 \cdot 10^2 \alpha_c$ , то минимальная величина отбора головной фракции составит  $\frac{1}{500} 100 = 0,2\%$  от количества введенного в колонну спирта.

Из рассмотренных головных примесей уксусноэтиловый эфир является определяющей, так как кратность концентрирования его минимальна. При выработке спирта из мелассы определяющей примесью также может быть и триэтиламин, если его много в бражке. При наличии других головных примесей с меньшей кратностью концентрирования они будут определять величину отбора головной фракции.

Расчеты показывают, что триметиламин и акролеин хорошо концентрируются и легко выводятся с головной фракцией.

С увеличением числа тарелок в концентрационной части колонны и их емкости длительность задержки соответственно увеличивается, а минимальная величина отбора головной фракции уменьшается. При этом следует учитывать аккумулирующую способность дефлегматора и конденсатора колонны. Таким образом, с точки зрения увеличения длительности задержки и возможно большего концентрирования головных примесей увеличение числа тарелок в концентрационной части колонны и их общей емкости не может встречать возражений. Но чрезмерная задержка или уменьшенный отбор головной фракции отрицательно сказывается на работе отгонной части колонны, особенно при наличии головных примесей, мало отличающихся по величине коэффициента испарения от спирта.

Теперь рассмотрим влияние числа тарелок, продолжительности задержек и величины отбора головной фракции на ход извлечения промежуточных примесей 1 и 2 (см. рис. 70). Промежуточные примеси этого типа относятся к верхним, так как концентрирование их совпадает с зоной концентрированного спирта (см. рис. 5). Верхние промежуточные примеси желательнее полностью выделить в элюационной колонне, так как сделать это в спиртовой

колонне почти невозможно из-за совпадения зоны их концентрирования с зоной максимальной концентрации спирта — зоной отбора очищенного спирта.

Рассмотрим поведение этих примесей на примере изомасляноэтилового эфира. Этот эфир быстро концентрируется на нижних тарелках колонны, затем концентрация его, достигнув максимума на пятой тарелке, начинает медленно уменьшаться при переходе на вышележащие тарелки. Так, если на пятой тарелке (см. рис. 70) кратность концентраций его по сравнению с тарелкой питания достигла 15, то на 11—12-й тарелках она снизилась до 10. Для полного отвода изомасляноэтилового эфира с пятой теоретической тарелки следовало бы отбирать не менее 6,7% головной фракции, при отборе же с 11—12-й тарелок — не менее 10%. Практически величина отбора головной фракции значительно меньше. Следовательно, концентрационная часть колонны всегда будет пересыщена изомасляноэтиловым эфиром, и некоторое количество его будет отводиться с элюратом.

Вследствие малой степени концентрирования промежуточных примесей на тарелках концентрационной части колонны полное насыщение ими колонны достигается очень быстро. Так, при указанных выше условиях полное насыщение колонны изомасляноэтиловым эфиром достигается приблизительно через 2 ч. Задержка отбора головной фракции вызовет переход его в элюрат.

При наличии в исходном продукте промежуточных примесей увеличение числа тарелок в концентрационной части колонны сверх оптимального и работа с длительными задержками нежелательны, так как это приводит к повышенному содержанию промежуточных продуктов в элюрате. Эти примеси обуславливают специфический вкус и запах мелассного спирта, поэтому их выделение при ректификации мелассного спирта должно считаться первоочередной задачей.

К таким примесям относится, например, кротоновый альдегид. Обладая очень малым коэффициентом испарения при больших концентрациях спирта, он практически не удаляется с ГФ при отборе ее в 3—5%. Он имеет зону максимального накопления на 6—9 ТТ выше тарелки питания, но накопление это незначительно. Таким образом, освободиться от кротонового альдегида в закрытой элюрационной колонне трудно, несмотря на то, что он сравнительно хорошо удаляется из нижней части колонны.

Следует отметить, что рассмотренные примеси являются не единственными примесями такого типа. При переработке разных видов сырья неодинакового качества и при различных технологических режимах возможно образование примесей, характер изменения коэффициентов испарения которых нам еще не известен.

Приведенные теоретические расчеты подкрепляются практикой. На основании испытаний элюрационных колонн, проведенных во ВНИИПрБе, показана целесообразность усиления отгонной части элюрационной колонны за счет уменьшения числа тарелок в концентрационной части.

При эюрации зерно-картофельного спирта, не содержащего промежуточных продуктов, возможна работа с задержкой до 40 ч, а при эюрации мелассных спиртов, содержащих значительное количество промежуточных эфиров, можно допустить только кратковременные задержки (1—2 ч).

Приведенный анализ сделан для колонны, работающей под атмосферным давлением. С изменением давления в колонне несколько изменится распределение спирта и примесей по высоте колонны. К сожалению, в настоящее время мы не располагаем данными о летучести большинства примесей при различных давлениях. Однако можно отметить, что с понижением давления в эюрационной колонне распределение концентраций этилового спирта в отгонной части практически не изменится, а в концентрационной изменение будет более резким, чем в случае работы колонны при атмосферном давлении, и концентрация спирта на верхних тарелках может достигать 97—97,3% об. (против 94—96), что может затруднить

выход верхних промежуточных примесей типа изовалерианоэтилового и изомасляноэтилового эфиров.

### Работа эюрационной колонны в случае подачи воды для гидроселекции

В последнее время с целью улучшения условий эюрации в некоторых схемах ректификационных установок (см. рис. 22, 23, 24) предусматривается подача воды в концентрационную часть эюрационной колонны (экстрактивная ректификация). Такой прием получил название гидроселекции. Гидроселекция позволяет снизить концентрацию спирта на тарелках эюрационной колонны и приводит к увеличению коэффициентов испарения большинства примесей. Рассмотрим, в какой мере гидроселекция влияет на степень извлечения и концентрирования примесей в эюрационной колонне.

Для построения рабочих линий отгонной части колонны при подаче воды на ее верхнюю тарелку (рис. 71) вполне применимы уравнения (15), (16). Для

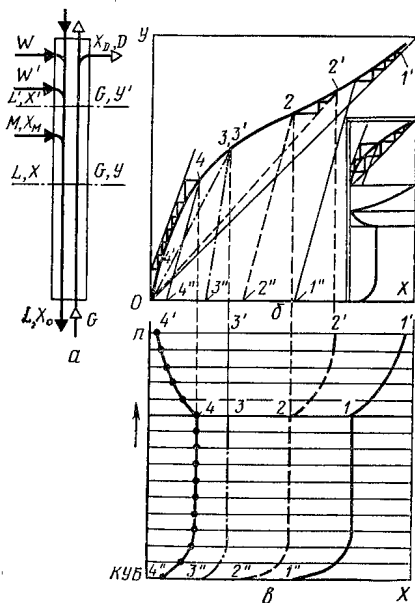


Рис. 71. Схема потоков в эюрационной колонне при гидроселекции (а), характер распределения концентраций спирта по высоте колонны (б) и то же, при промежуточном вводе воды  $W'$  (б):

$Y$  — концентрация спирта в паровой фазе;  $X$  — то же, в жидкой фазе;  $n$  — номер тарелки; 1, 2, 3, 4 — положение рабочих линий и соответственно концентрации спирта на тарелке питания; 1', 2', 3' и 4' — то же, на верхней тарелке концентрационной части; 1'', 2'', 3'', 4'' — то же, в отгонной части

концентрационной части уравнение рабочей линии может быть получено на основании баланса спирта (по рис. 71, а):

$$GY' = L'X' + DX_D, \quad (88)$$

откуда

$$Y' = (L'/G)X' + (D/G)X_D, \quad (89)$$

где  $X_D$  — концентрация спирта в дистилляте, % мол.;  $D$  — количество дистиллята, отбираемого из колонны, моль.

Величины  $D$  и  $X_D$  могут быть выражены через количество моль безводного спирта  $P$ , отводимого с дистиллятом:

$$DX_D = 100P. \quad (90)$$

Величина жидкостного потока

$$L' = G - D + W, \quad (91)$$

где  $W$  — поток вводимой в колонну воды.

Для выяснения распределения концентраций спирта по тарелкам эюрационной колонны при подаче воды на ее верхнюю тарелку примем в первом приближении, что колонна работает без отбора дистиллята, т. е.  $D=0$ . Такой режим возможен при работе с задержками. Уравнение (89) примет вид

$$Y' = (L'/G)X'. \quad (92)$$

Угловой коэффициент  $L'/G$  может изменяться в пределах от 1 до  $\infty$ , что соответствует изменению количества подаваемой воды от 0 до  $\infty$ .

На рис. 71, б показано различное положение рабочей линии концентрационной части колонны. В нижней части рисунка изображено распределение концентраций спирта по тарелкам соответственно различным положениям рабочей линии. Наибольшая концентрация спирта в верхней части колонны наблюдается при отсутствии подачи воды (рабочая линия 1). С увеличением подачи воды концентрация спирта на верхних тарелках уменьшается, и при пересечении рабочей линии 3 с кривой равновесия в точке 3', которая соответствует концентрации спирта на тарелке питания, в концентрационной части колонны спирт не концентрируется. При дальнейшем увеличении подачи воды концентрация спирта на тарелках верхней части колонны становится меньше концентрации его на тарелке питания из-за абсорбции паров спирта стекающей флегмой. При бесконечно большом количестве воды истощение будет абсолютным. Таким образом, изменяя количество воды, можно регулировать концентрацию спирта на тарелках концентрационной части, а это дает возможность подбирать оптимальные условия для вывода примесей спирта, выделенных в нижней части эюрационной колонны, через ее верхнюю часть. Предельным расходом воды в эюрационную колонну следует считать тот, при котором рабочая линия пересекает кривую равновесия в точке максимальной концентрации спирта на тарелке питания. Дальнейшее увеличение подачи воды, по-видимому, будет нецелесообразно, так как зон концентрирования промежуточных примесей по высоте колон-

ны уже не будет. К тому же это приводит к значительному разбавлению элюрата водой, требует повышенного расхода пара на проведение процесса элюрации и снижает производительность ректификационной колонны.

В нижнем правом углу верхней части рис. 71, б показан характер распределения концентраций спирта на тарелках элюрационной колонны в случае промежуточного ввода воды, т. е. когда вода вводится выше тарелки питания, но ниже верхней (см.  $W'$  на рис. 71, а). Промежуточный ввод воды значительно расширяет возможности гидроселекции для регулирования организации зон концентрирования примесей по высоте концентрационной части элюрационной колонны. Этот прием использован в установках ВНИИПрБа для направленного концентрирования и выделения промежуточных примесей в установках косвенно-прямоточного действия (см. рис. 16 и 24).

В нижней части колонны хорошо извлекаются примеси с коэффициентом испарения  $K > L/G$  (случай возможности абсолютной элюрации). Подача воды в колонну увеличивает жидкостный поток  $L$  в отгонной части, ухудшая условия извлечения примесей. Одновременно с этим уменьшается концентрация спирта, что оказывает противоположное влияние. Рассмотрим это на конкретных примерах.

Примем, что в элюрационную колонну поступает нагретый до кипения исходный продукт с концентрацией спирта 50% об., или 42,3% мас., расход греющего пара на элюрацию 0,6 кг на 1 кг безводного спирта, введенного в колонну с исходным продуктом. Для упрощения расчета допустим, что колонна работает без отбора дистиллята ( $D=0$ ). Величина парового потока в расчете на 1 кг безводного спирта, вводимого в колонну, составит  $G=0,6/18=0,033$  кмоль; масса спирто-водной смеси, вводимой в колонну,  $A=1 \cdot 100/42,43=2,36$  кг. Среднемолекулярная масса исходного продукта  $M_{cp}=24,25$ ; величина жидкостного потока в отгонной части колонны  $L=M/M_{cp}+G=0,131$ . Величина жидкостного потока для концентрационной части колонны  $L'=G$  (при  $R=\infty$ ). Таким образом, для отгонной части колонны  $L/G=3,97$ ; для концентрационной  $L'/G=1$ .

Концентрация элюрата составит:

$$X_0 = \frac{1 \cdot 100}{2,36 + 0,6} = 33,8 \% \text{ мас.}, \text{ или } 16,7 \% \text{ мол.}$$

На рис. 72, а нанесены рабочие линии и ступени изменения концентраций для отгонной и концентрационной частей колонны. На большинстве тарелок отгонной части колонны концентрация спирта в данных условиях и при  $n$ , равном 8 теоретическим тарелкам, соответствует точке  $A_0$ . Она равна 31,2% мол., или 53,7% мас. Для концентрационной части колонны при том же числе теоретических тарелок максимальная концентрация достигает 84,5% мол., или 93,25% мас. (точка  $A'_0$ ).

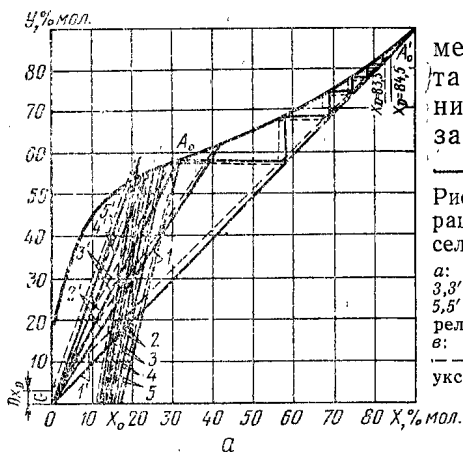
Теперь представим, что на верхнюю тарелку элюрационной ко-

лонны вводится различное количество воды ( $W$ ). Результаты аналитического и графического расчета сведены в табл. 6, а на рис. 72, а нанесены рабочие линии, соответствующие количеству подаваемой в колонну воды.

Таблица 6

Изменение концентраций спирта в зависимости от подачи воды

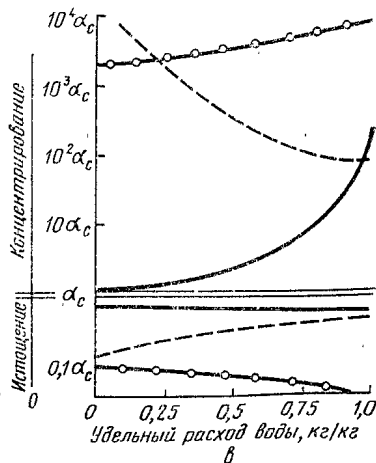
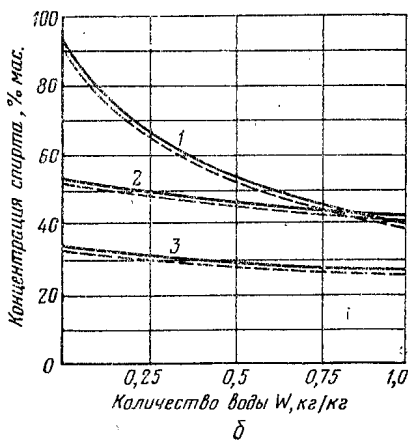
Количество воды, кг на 1 кг спирта	L/G	L'/G	Концентрация спирта, % мас.		
			в кубе	на тарелке	
				питания	верхней
0	3,97	1	33,8	53,6	93,25
0,25	4,4	1,42	21,2	49,7	67,0
0,5	4,8	1,85	28,9	46,2	53,7
0,75	5,22	2,27	7,0	43,3	44,8
1,0	5,63	2,65	25,3	40,8	39,0



На рис. 72, б показано изменение концентрации элюрата, жидкости на тарелке питания элюрационной колонны в зависимости от количества по-

Рис. 72. Графики изменения концентрации спирта и примесей при гидроселекции:

а: 1, 1' —  $W=0$  кг/кг; 2, 2' —  $W=0,25$  кг/кг; 3, 3' —  $W=0,5$  кг/кг; 4, 4' —  $W=0,75$  кг/кг; 5, 5' —  $W=1,0$  кг/кг; б: 1 — верхняя тарелка; 2 — тарелка питания; 3 — элюрат; в: — — — уксусноизоамиловый эфир; —○—○— уксусный альдегид; —○—○— уксусноэтиловый эфир



даваемой воды при концентрации спирта-сырца 50% об. и удельном расходе пара 0,6 кг на 1 кг безводного спирта-сырца, вводимого в колонну. С увеличением подачи воды быстро понижается концентрация спирта на верхней тарелке.

Предельное количество воды, которое может быть подано в колонну при данных условиях, равно примерно 0,9 кг на 1 кг вводимого в колонну спирта. При этом концентрация спирта в верхней части колонны будет постоянной и равной концентрации его на тарелке питания.

Рассмотрим влияние воды на извлечение примесей, принимая, что извлечение происходит при максимальной концентрации спирта, соответствующей концентрации его на тарелке питания.

По номограмме (см. рис. 68) определена кратность извлечения для двух головных и одной промежуточной примесей:  $\alpha_c/\alpha_o = f(KG/L, n)$ .

Результаты расчета сведены в табл. 7.

Таблица 7

**Кратность извлечения различных примесей в зависимости от количества введенной воды**

Примесь	При введении воды, кг на 1 кг спирта									
	0		0,25		0,5		0,75		1,0	
	K	$\alpha_c/\alpha_o$	K	$\alpha_c/\alpha_o$	K	$\alpha_c/\alpha_o$	K	$\alpha_c/\alpha_o$	K	$\alpha_c/\alpha_o$
Уксусный альдегид	3,95	9	4,05	6,5	4,15	5,5	4,25	4,6	4,4	4
Уксусноэтиловый эфир	4,2	12	4,6	11	5,2	13	5,7	14	6,3	15
Уксусноизоамиловый эфир	1,6	1,7	1,9	1,8	2,3	1,9	2,7	2,1	3,1	2,2

Из данных табл. 7 следует, что подача воды (что равноценно разбавлению вводимого в колонну исходного продукта) несколько улучшает кратность извлечения уксусноэтилового и уксусноизоамилового эфиров и значительно ухудшает извлечение уксусного альдегида.

Чтобы компенсировать ухудшение извлечения уксусного альдегида при подаче воды в колонну, следует увеличить подачу пара. Увеличение расхода пара до 0,75 кг полностью компенсирует этот недостаток за счет подачи в колонну воды в количестве 0,5 кг на 1 кг спирта. Кратность извлечения уксусноэтилового и уксусноизоамилового эфиров с увеличением подачи пара возрастает соответственно в 1,5 и 1,05 раза.

Для оценки влияния подачи воды на работу концентрационной части колонны важно знать изменение величины коэффициентов испарения примесей и кратности концентрирования в соответствии с концентрацией спирта на ее тарелках. В табл. 8 приведены минимальные значения коэффициента испарения, соответствующие мак-



симальной концентрации спирта на верхней тарелке концентрационной части колонны, и значения кратности концентрирования примесей.

На рис. 72, б показано изменение концентраций примесей на верхней тарелке концентрационной части колонны в зависимости от количества подаваемой воды при 8 теоретических тарелках и полном насыщении колонны.

Таблица 8

Кратность концентрирования различных примесей в зависимости от подачи воды

Примесь	При подаче воды, кг на 1 кг спирта							
	0		0,25		0,5		0,75	
	K	$\alpha_D/\alpha_0$	K	$\alpha_D/\alpha_0$	K	$\alpha_D/\alpha_0$	K	$\alpha_D/\alpha_0$
Уксусный альдегид	3,3	15900	3,7	2090	3,95	427	4,2	138
Уксусноэтиловый эфир	2,05	550	3,2	640	4,2	700	5,3	880
Уксусноизоамиловый эфир	0,55	0,0084	0,9	0,04	1,6	0,33	2,6	8,4

Концентрации примесей определялись расчетами от тарелки к тарелке по формуле

$$\alpha_{n+1}/\alpha_n = KG/L, \quad (93)$$

где  $\alpha_n$  — концентрация примеси на  $n$ -й тарелке.

Из рисунка видно, что концентрирование уксусного альдегида при увеличении подачи воды уменьшается, а уксусноэтилового и

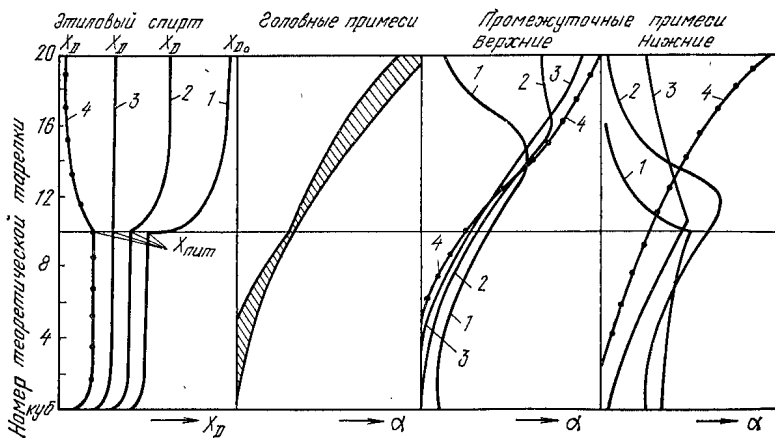


Рис. 73. Характер распределения спирта и его примесей по колонне при вводе различного количества воды на гидроселекцию:

1 —  $W=0$ ; ввод воды, обеспечивающий: 2 —  $X_{D_0} > X_D > X_{лит}$ ; 3 —  $X_D = X_{лит}$ ; 4 —  $X_D < X_{лит}$

укусноизоамилового эфиров — увеличивается. При подаче воды менее 0,6 кг на 1 кг спирта концентрация укусноизоамилового эфира выше тарелки питания уменьшается. При подаче воды более 0,6 кг укусноизоамиловый эфир концентрируется и выводится вместе с головными примесями. Изомасляноэтиловый и изовалерианоэтиловый эфиры, имеющие большие значения коэффициента испарения, перейдут в локальных условиях в группу головных примесей даже при меньшем количестве вводимой в колонну воды. Предотвратить ухудшение концентрирования укусного альдегида можно небольшим увеличением удельного расхода пара.

Приведенный анализ показывает целесообразность подачи воды на верхнюю тарелку элюационной колонны для выделения примесей (особенно промежуточного характера)<sup>1</sup>.

Таблица 9

Изменение концентрации спирта в зависимости от подачи воды (при отборе дистиллята)

Количество введенной воды, кг на 1 кг спирта	L/G	L'/G	Концентрация спирта, % мас.		
			в кубе	на тарелке	
				питания	верхней
0	3,94	0,975	32,6	53,0	92,7
0,25	4,36	1,39	30,01	48,0	65,2
0,5	4,78	1,82	27,9	45,5	51,7
0,75	5,2	2,24	26,0	42,6	43,2
1,0	5,6	2,64	24,3	40,1	36,7

Рассмотрим характер распределения спирта по тарелкам при отборе 5% дистиллята от вводимого в элюационную колонну спирта (табл. 9 и 10).

Сравнивая данные табл. 9 и 10, 6 и 7, а также положение рабочих линий на диаграмме (для случая с отбором дистиллята эти линии на рис. 72 нанесены пунктиром), можно сделать вывод, что отбор дистиллята не оказывает существенного влияния на распределение концентраций спирта по высоте колонны и на характер движения примесей. Таким образом, выводы, сделанные при анализе работы элюационной колонны с задержками, остаются в силе и в случае работы ее с отбором дистиллята. На рис. 73 показан общий характер изменения распределения спирта и его примесей при подаче различного количества воды на гидроселекцию.

<sup>1</sup> А. П. Николаев [11], пользуясь новейшими данными о фазовом равновесии, показал, что при промежуточном вводе воды на гидроселекцию увеличение расхода воды приводит к улучшению извлечения всех примесей при постоянном удельном расходе пара, а увеличение расхода пара приводит к увеличению кратности извлечения примесей, кроме дицетила. Гидроселекция позволяет достичь необходимой степени извлечения примесей при меньшем удельном расходе пара.

Кратность извлечения различных примесей в зависимости от подачи воды  
(при отборе дистиллята)

Примесь	При подаче воды, кг на 1 кг безводного спирта									
	0		0,25		0,5		0,75		1,0	
	$K$	$\alpha_c/\alpha_n$	$K$	$\alpha_c/\alpha_n$	$K$	$\alpha_c/\alpha_n$	$K$	$\alpha_c/\alpha_n$	$K$	$\alpha_c/\alpha_n$
Уксусный альдегид	4,0	9,5	4,05	7,0	4,2	5,5	4,3	4,7	4,4	4,2
Уксусноэтиловый эфир	4,25	12,5	4,65	12	5,2	13	5,75	14,5	6,6	16,1
Уксусноизоамиловый эфир	1,65	1,75	1,95	1,8	2,4	2,0	2,75	2,1	3,2	2,3

Ввод воды на верхнюю тарелку приводит к снижению концентрации спирта в головной фракции. В ряде случаев это нежелательно, поэтому возможен ввод воды на гидроселекцию и ниже верхней тарелки, например на 35-ю, считая снизу, при наличии в колонне 40 тарелок. В этом случае от тарелки питания (например, 20-й) до 30-й тарелки установится зона сравнительно низких концентраций спирта, а выше — высоких, что позволяет создать условия для концентрирования в этой зоне промежуточных примесей, откуда может быть организован их отвод. Такой прием позволил ВНИИПрБу создать брагоректификационную установку с направленным выделением промежуточных примесей (сивушного масла) из элюационной колонны, что привело к повышению качества спирта и увеличению производительности спиртовой колонны (см. рис. 16 и 24).

### Расчет расхода пара на эюарацию

Расчет расхода пара на эюарацию проще всего вести на основании графиков, изображенных на рис. 68. На рис. 68, б нанесены кривые коэффициентов испарения ( $K$ ) различных примесей в зависимости от концентрации спирта и кривые изменения  $L/G$  в зависимости от концентрации спирта в исходном продукте (питании)  $X$ , подвергающемся эюарации при различном удельном расходе греющего пара ( $P$ ) на 1 кг вводимого в колонну безводного спирта.

Сопоставляя кривые коэффициентов испарения  $K$  и кривые изменения  $L/G$ , можно сделать вывод, что муравьиноэтиловый и уксусноэтиловый эфиры должны хорошо извлекаться при удельном расходе пара 0,3 кг/кг, т. е. во всем диапазоне изменения концентрации спирта коэффициенты испарения их значительно больше  $L/G$ . В то же время уксусноэтиловый эфир и уксусный альдегид будут извлекаться плохо, так как для них значения  $K$  в основном меньше  $L/G$ . Отсюда можно сделать вывод, что удельный расход

пара 0,3 кг/кг для хорошей эюрации всех примесей недостаточен. Уксусноэтиловый эфир будет хорошо извлекаться при удельном расходе пара  $P > 0,4$  кг на 1 кг безводного спирта.

Для извлечения уксусного альдегида при концентрации спирта 57% мас. удельный расход пара должен быть не менее 0,4 кг/кг, а с понижением концентраций он должен повышаться. Так, при 39% мас. спирта он должен быть не менее 0,6 кг/кг.

Теперь рассмотрим влияние качества исходного продукта на удельный расход пара и качество эюрации.

Проследим на числовых примерах за влиянием качества исходного продукта на удельный расход пара и качество эюрации. Допустим, что в первом случае имеем исходный продукт с концентрацией уксусного альдегида  $\alpha_c = 0,0047\%$  об. Концентрация спирта в исходном продукте  $X_c = 50\%$  мас., число теоретических тарелок в отгонной части колонны  $n = 7,5$  (при КПД тарелок 0,5  $N = 15$  действительным тарелкам) и удельный расход греющего пара 0,3 кг/кг.

Из графика (см. рис. 68, б) находим, что при  $P = 0,3$  и  $X_c = 50\%$  мас.,  $L/G = 5,7$ . При этих условиях концентрация спирта на большинстве тарелок отгонной части колонны (по построению) равна 56% мас., а  $K \approx 4$ . Следовательно,

$$KG/L = 4/5,7 \approx 0,7.$$

По формуле (83) или по номограмме (см. рис. 68, а) находим, что при  $KG/L = 0,7$  и  $n = 7,5$  кратность извлечения  $\alpha_c/\alpha_o = 3,2$ , откуда  $\alpha_o = \alpha_c/3,2 = 0,00147\%$  об. Такая концентрация в эюрате недопустима. Для ее снижения необходимо увеличить расход пара.

Определим удельный расход пара при условии получения эюрата с концентрацией альдегида  $\alpha_o = 0,0005\%$  об. Из рис. 68, а находим, что при

$$\alpha_c/\alpha_o = 0,0047/0,0005 = 9,4 \text{ и } n = 7,5; KG/L = 1,02.$$

Но так как  $K \approx 4$  (ориентировочно), то  $L/G = K/1,02 = 3,92$ . По рис. 68, б находим, что при  $L/G = 3,92$  и  $X_c = 50\%$  мас.  $P = 0,47$  кг/кг. По построению находим концентрацию на тарелках отгонной части эюрационной колонны  $X = 57,5\%$  мас., при этом для уксусно-го альдегида  $K = 4$ .

Теперь предположим, что эюрации подвергается мелассный спирт с концентрацией альдегида 0,11% об. При удельном расходе пара  $P = 0,47$  кг/кг концентрация альдегидов в эюрате при всех прочих равных условиях будет  $\alpha_o = 0,0124\%$  об., что недопустимо при выработке ректифицированного спирта.

С целью улучшения эюрации увеличим удельный расход пара до  $P = 1$  кг/кг, тогда  $L/G$  будет равно 2,35 (см. рис. 68, б).

Из рис. 68, а или уравнения (83) находим, что  $\alpha_c/\alpha_o = 130$ , откуда  $\alpha_o = 0,00089\%$  об.

Таким образом, даже при увеличении удельного расхода греющего пара до  $P = 1$  кг/кг качество эюрата остается недостаточно хорошим. Чтобы улучшить кратность извлечения альдеги-

да при том же удельном расходе пара, можно повысить концентрацию вводимого в колонну исходного продукта.

При концентрации  $X_c=70\%$  мас. и  $P=1$  кг/кг по рис. 68, а находим, что  $K=3,7$ , а  $L/G=1,75$ . По рис. 68, а или уравнению (83) при полученных значениях  $K$  и  $L/G$  находим  $\alpha_0=0,00023\%$  об.

Из расчета следует, что, для того чтобы добиться хорошей эюрации спирта из меласного сырья, нужно не только обеспечить сравнительно большой удельный расход пара, но и, возможно, увеличить концентрацию вводимого в колонну спирта. Что же касается уксусноэтилового эфира, то степень его извлечения с повышением концентрации спирта от 50 до 70% мас. не изменяется. Анализ работы эюрационной колонны показывает, что на удельный расход пара при эюрации оказывает большое влияние качественный состав исходного продукта и концентрация в нем спирта. Значительное влияние оказывает также и число тарелок в отгонной части колонны.

При получении ректифицированного спирта из сырья различного качества содержание альдегидов в спирте может резко изменяться. В соответствии с изменением концентрации альдегидов и в зависимости от концентрации спирта следует изменять режим работы эюрационной колонны. В каждом конкретном случае надо устанавливать оптимальный расход пара, обеспечивающий высокое качество эюрации. Излишний расход пара также нежелателен. Определять расход пара можно или опытным путем, или по разработанной нами и приведенной выше методике.

Приведенные расчеты будут справедливы и применимы к практическим условиям лишь в тех случаях, когда определяющей примесью будет уксусный альдегид. В каждом конкретном случае подобные расчеты необходимо проводить по той примеси, от выделения которой зависит качество спирта. Проведенный анализ дает представление о влиянии удельного расхода пара на эффект эюрации и о зависимости расхода пара от качества спирта-сырца. Расчеты дают также представление о величине удельного расхода пара на эюрацию.

### **Сравнительная оценка различных приемов эюрации**

Большинство рассмотренных технологических схем различается организацией процесса эюрации. В ряде случаев эюрация организована без должного анализа процесса. Для выявления наиболее эффективного приема эюрации проведем некоторые сравнительные расчеты.

Примем, что во всех случаях в БРУ поступает бражка с концентрацией спирта 8% мас. Для установок косвенного действия концентрация спирта в бражном дистилляте (а для установок полупрямого действия — концентрация спиртового пара), поступающем в эюрационную колонну, 45,22% об. (38% мас.). Содержание уксусного альдегида в исходном продукте примем 0,08% об., а уксусноэтилового эфира — 0,02% об. Примем удель-

ный расход пара 0,8 кг на 1 кг спирта, введенного на эюорацию, число теоретических тарелок в отгонной части эюорационной колонны  $n=8$ .

При концентрации спирта в бражном дистилляте  $X_c=38\%$  мас. и  $P=0,8$  кг/кг для эюорационной колонны установки косвенного действия  $L/G=3,6$  (см. рис 68, б).

По построению определяем, что концентрация спирта на большинстве тарелок отгонной части эюорационной колонны  $X_1=52,25\%$  мас. При этих условиях:

для уксусного альдегида  $K=7,25$  и  $KG/L \approx 2$ ;

для уксусноэтилового эфира  $K=4,25$  и  $KG/L \approx 1,18$ ;

для уксусного альдегида  $\alpha_c/\alpha_o=500$ ;

для уксусноэтилового эфира  $\alpha_c/\alpha_o=20$ .

Следовательно, концентрация уксусного альдегида в эюорате составит  $0,08/500=0,00016\%$  об.; концентрация уксусноэтилового эфира  $0,02/20=0,001\%$  об.

По аналогии с приведенным расчетом проведены расчеты и для эюорационной колонны БРУ полупрямого действия (типовой) эюорационной колонны установки прямого действия, неполной (отгонной) эюорационной колонны, эюорационной колонны, работающей с гидроселекцией. Результаты расчетов различных способов эюорации сведены в табл. 11.

Из сопоставления результатов расчета эюорационных колонн установок косвенного и полупрямого действия видно, что при одинаковых условиях в установках полупрямого действия качество эюората выше. Если качество эюорации в установке полупрямого действия будет таким же, как и в установках косвенного действия, то расход пара в установках полупрямого действия будет на 35—40% меньше, нежели в установках косвенного действия. Такой расход пара достаточен в том случае, когда концентрацион-

Таблица 11

Сравнительные данные различных способов эюорации

Способ эюорации	Удельный расход пара $P$ , кг/кг	$L/G$	Уксусный альдегид		
			$KG/L$	$\alpha_c/\alpha_o$	$\alpha_o$
В установке косвенного действия	0,8	3,6	2	500	$16 \cdot 10^{-5}$
В установке полупрямого действия	0,8	3,6	2	500	$22 \cdot 10^{-6}$
То же	0,5	5,2	1,49	70	$16 \cdot 10^{-5}$
В установке прямого действия	0,8	15,8	1,17	18	$45 \cdot 10^{-4}$
То же	1,45	9,2	2	500	$16 \cdot 10^{-5}$
В установке косвенного действия с гидроселекцией	0,8	4,2	1,8	250	$32 \cdot 10^{-5}$
В неполной (отгонной) колонне для бражки	0,875	13,5	2	500	$16 \cdot 10^{-5}$
То же	0,312	30,5	—	—	—
»	0,3	39,5	0,67	3	$27 \cdot 10^{-3}$

Способ эюрации	Удельный расход пара $P$ , кг/кг	Уксусный эфир			Процент отбора ГФ
		$KG/L$	$\alpha_c/\alpha_o$	$\alpha_o$	
В установке косвенного действия	0,8	1,18	20	$1 \cdot 10^{-3}$	2
В установке полупрямого действия	0,8	1,18	20	$5 \cdot 10^{-4}$	2
То же	0,5	0,82	4,7	$1 \cdot 10^{-3}$	>2
В установке прямого действия	0,8	1,4	48	$42 \cdot 10^{-5}$	2
То же	1,45	—	—	—	<2
В установке косвенного действия с гидроселекцией	0,8	1,25	25	$8 \cdot 10^{-4}$	2
В неполной (отгонной) [колонне для бражки	0,875	—	—	—	59
То же	0,312	1,18	20	$1 \cdot 10^{-3}$	26
»	0,3	0,91	6,3	$32 \cdot 10^{-4}$	20

ная часть эюрационной колонны установки полупрямого действия не насыщена примесями. В случае полного насыщения ее примесями концентрация их в флегме, стекающей на тарелку питания, будет равна концентрации примесей в эюрационной колонне установки косвенного действия. Тогда степень извлечения примесей в установках косвенного и полупрямого действия станет одинаковой при одном и том же удельном расходе пара. Для того чтобы эюрационная колонна установки полупрямого действия могла работать с уменьшенным на 35—40 % расходом пара, необходимо иметь повышенный отбор головной фракции во избежание предельного насыщения концентрационной части колонны примесями.

Сопоставляя расчетные данные эюрационных колонн БРУ косвенного и прямого действия, можно сделать вывод, что уксусноэтиловый эфир извлекается в последних установках лучше, чем в первых, а уксусный альдегид — хуже. Для получения эюрата такого же качества по содержанию альдегидов, как и в установках косвенного действия, необходимо увеличить расход пара на эюрацию до 1,45 кг на 1 кг безводного спирта.

Таким образом, в эюрационных колоннах установок различных типов мы можем достигнуть одинакового эффекта извлечения примесей, но при различной затрате пара. Если принять за ключевой компонент уксусный альдегид, то при рассмотренных условиях наименьший удельный расход пара для установки полупрямого действия составит 0,8—0,5 кг/кг и наибольший для установки прямого действия около 1,45 кг/кг.

Общим недостатком рассмотренных типов колонн является отсутствие благоприятных условий для вывода промежуточных примесей, так как в концентрационной части любой из рассмотренных эюрационных колонн устанавливается зона спирта с концентрацией 94—96 % об., а для эюрационных колонн, работающих под

разрежением, концентрация спирта будет еще выше и может достигать 97—97,3% об.; в этих условиях коэффициент испарения промежуточных примесей меньше 1, в связи с чем примеси в значительном количестве будут накапливаться в средней части элюационной колонны, откуда будут попадать в элюат. Такое движение промежуточных примесей нежелательно, поскольку выделять их в спиртовой колонне трудно. Чтобы устранить этот недостаток, необходимо или резко увеличить отбор ГФ и уменьшить число тарелок в концентрационной части колонны, или обеспечить в верхней части колонны низкие концентрации спирта путем подачи воды на верхнюю тарелку, что особенно важно для колонн, работающих под разрежением.

Для неполных (отгонных) элюационных колонн характерен высокий отбор головной фракции.

Расчет по уксусному альдегиду показывает, что с головной фракцией необходимо вывести из колонны 59% спирта; расчет по уксусноэтиловому эфиру дает величину 26%. Отбор головной фракции в количестве 59% велик. Обычно авторы схем с открытыми колоннами предусматривают отбор этой фракции в размере 15—30% от спирта, введенного в элюационную колонну. При таком малом отборе выделение альдегидов, очевидно, будет недостаточным.

При отборе фракции, обогащенной головными примесями, в количестве 20%, элюированная бражка будет иметь слишком высокое содержание как уксусного альдегида, так и уксусноэтилового эфира, однако расчеты показывают, что с головной фракцией в неполных (отгонных) колоннах полностью отводятся промежуточные примеси.

Таким образом, неполные элюационные колонны могут быть использованы для бражки или только для частичной элюации спирта, которая может способствовать более полному выделению остальной части примесей в основной элюационной колонне, или при наличии в исходном продукте большого количества промежуточных примесей. Значительным недостатком неполных элюационных колонн является отвод большого количества этилового спирта с головными примесями; оно прямо пропорционально количеству пара, введенному в колонну для элюации.

В заключение следует отметить, что ни один из рассмотренных приемов элюации не является в полной мере эффективным. Режим элюации надо подбирать с таким расчетом, чтобы из элюируемого продукта можно было в первую очередь выделить промежуточные примеси, а головные примеси могут быть с успехом выделены либо пастеризацией, либо в колонне окончательной очистки.

По-видимому, для получения высокого эффекта элюации необходимо комбинирование процесса элюации с гидроселекцией, которая дает возможность иметь концентрацию спирта в концентрационной части колонны ниже той, при которой происходит образование зон накопления верхних промежуточных примесей.



Эпюрация в установках для ректификации спирта-сырца происходит так же, как в полных колоннах БРУ косвенного действия.

Теперь рассмотрим эпюрацию с гидроселекцией. Если исходить из той гаммы примесей, для которой известны  $K$ , то за максимальную концентрацию спирта в концентрационной части эпюрационной колонны можно принять приблизительно 60 % об.  $\approx 52$  % мас. = 29,8 % мол., так как при этой концентрации все верхние промежуточные примеси имеют  $K > 1$ . При этих условиях можно развивать концентрационную часть эпюрационной колонны, добиваясь высокой степени концентрирования в ней как головных, так и верхних промежуточных примесей.

Чтобы решить вопрос об экономической целесообразности применения гидроселекции для освобождения спирта от промежуточных примесей, проведем расчет расхода воды и пара на эпюрацию с применением гидроселекции.

На рис. 74 приведен график, показывающий положение рабочей линии при различных концентрациях спирта в исходной смеси, но при постоянной концентрации его на тарелке питания и вышерасположенных тарелках. Из графика следует, что для концентрационной части колонны  $L/G = Y_p/X_1 = 57,4/29,8 = 1,92$ , т. е. соотношение флегмы и пара должно быть 1,92/1. Очевидно, для ориентировочных расчетов можно принять 2/1. Таким образом, при удельном расходе пара 1 кг на 1 кг безводного спирта, введенного в колонну, удельный расход воды составит около 1 кг/кг. Это условие справедливо для установок косвенного и прямого действия. В установках полупрямого действия паровой поток в концентрационной части эпюрационной колонны складывается из потока пара бражной и эпюрационной колонн, поэтому удельный расход воды должен быть равен суммарному потоку пара или примерно в 3 раза больше, чем в установках косвенного действия.

Подачу в установку такого большого количества воды нельзя считать рациональной как по теплотехническим, так и по эксплуатационным соображениям, поскольку увеличивается удельный расход пара и снижается производительность установки в целом, а спиртовой колонны особенно. Для установок прямого и косвенного действия концентрация спирта в эпюрате будет в 2 раза ниже концентрации его в бражке или соответственно бражном дистилляте, а для установок полупрямого действия — в 3 раза ниже концентрации спирто-водного пара, выходящего из бражной колонны.

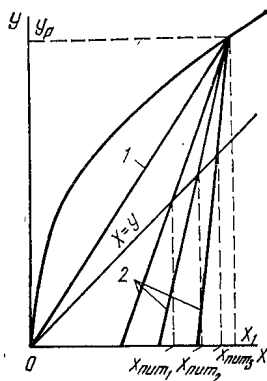


Рис. 74. Положение рабочих линий при постоянной концентрации спирта в концентрационной части эпюрационной колонны, начиная с тарелки питания:

1 — рабочая линия концентрационной части; 2 — то же, отгонной части

Анализ показывает, что процесс эюрации целесообразно расчленить на две ступени (рис. 75): в первой проводить эюрацию спирта без значительного концентрирования примесей, а во второй — эюрацию головной фракции первой ступени с применением гидроселекции. Расчеты показывают, что при расходе пара 2 кг на 1 кг спирта в дополнительной колонне получается эюрат необходимой чистоты.

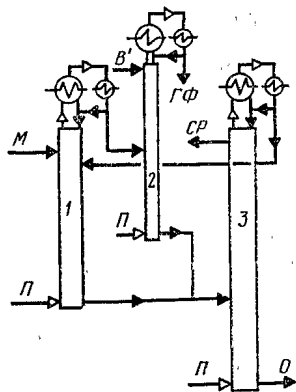


Рис. 75. Схема двухступенчатой эюрации:

колонны: 1 — основная эюрационная; 2 — дополнительная эюрационная; 3 — спиртовая

Если отнести расход пара на дополнительную эюрацию к общему количеству спирта, подвергнутого эюрации в обеих колоннах, то он составит всего 0,15—0,2 кг. Таким образом, суммарный расход пара на эюрацию составит 1 кг на 1 кг безводного спирта. Расход воды на гидроселекцию составит 0,15—0,2 кг/кг. Такое небольшое количество воды практически не снижает производительности установки в целом, а концентрация спирта в эюрате снижается незначительно.

Дополнительная эюрационная колонна должна иметь развитую как отгонную, так и концентрационную часть. Увеличение концентрационной части колонны обеспечивает высокую степень концентрирования примесей,

которая пропорциональна числу тарелок.

Данный прием нами реализован при разработке технологии выделения спирта из головной фракции (см. рис. 31), при разработке ректификационных установок с выводом всех примесей в виде одного побочного продукта — СЭАК (см. рис. 18); УкрНИИСП использовал его при разработке вакуумных брагоректификационных установок с двумя ступенями эюрации (см. рис. 22).

### Определение фактического расхода пара

При анализе работы эюрационной колонны важно знать фактическое потребление пара колонной. Такое определение может быть проведено с помощью установки специальных расходомерных устройств. Однако иногда такие определения проводят косвенным путем — по количеству тепла, отведенного водой из дефлегматора и конденсатора эюрационной колонны. В этом случае необходимо замерять количество воды, проходящей через конденсатор и дефлегматор.

В ряде случаев возникает необходимость в оперативном определении расхода пара на эюрацию спирта. Для этой цели можно воспользоваться методикой, показанной ниже на примере. Расход пара в этом случае определяется на основании материального баланса эюрационной колонны.

*Пример.* Концентрация спирта в бражном дистилляте  $X_c = 40,9\%$  об. =  $34,1\%$  мас. Содержание спирта в эюрате  $X_o = 34\%$  об. =  $28\%$  мас. Отбор головной фракции (по контрольному снаряду) —  $3\%$  безводного спирта от введенного с бражным дистиллятом; ввод непастеризованного спирта —  $2\%$  безводного спирта от введенного с бражным дистиллятом (по предварительному замеру).

Расчет. Баланс по спирту (на 1 кг введенного с бражным дистиллятом):

$$1 + 0,02 = 0,03 + \mathcal{E};$$

$\mathcal{E} = 0,99$  кг — количество спирта, выведенного с эюратом.

Баланс по всему продукту:

$$\frac{1 \cdot 100}{34,1} + \frac{0,02 \cdot 100}{94} + P = \frac{0,03 \cdot 100}{93} + \frac{0,99 \cdot 100}{28},$$

где 94 и 93 — соответственно концентрация непастеризованного спирта и головной фракции, % мас.

Отсюда  $P = 0,61$  кг на 1 кг безводного спирта, введенного с бражным дистиллятом.

Если принять, что количество отбираемой ГФ равно количеству непастеризованного спирта, вводимого в колонну, то расчет расхода пара производится по формуле

$$P = 100 \frac{X_c - X_o}{X_c X_o}.$$

Подобный расчет дает возможность быстро определить ориентировочный расход пара. Для проведения расчета необходимо в течение 1 ч провести 5—10 замеров концентрации спирта в бражном дистилляте и эюрате, а затем взять среднюю концентрацию. Таким методом следует определять расход пара при стабильной работе установки и открытом обогреве эюрационной колонны водяным паром, не содержащим воды.

### Методика расчета эюрационных колонн

При расчете эюрационной колонны определяющей величиной является кратность, или степень извлечения ключевой примеси. В настоящее время мы еще не располагаем полными данными о составе примесей и коэффициентах испарения их, однако известно, что основными компонентами группы головных примесей являются уксусный альдегид и уксусноэтиловый эфир, к тому же из группы известных головных примесей они обладают наименьшими коэффициентами испарения. Это дает основание принять уксусноэтиловый эфир и уксусный альдегид за ключевые компоненты при расчете эюрационных колонн. В отдельных случаях (например, при переработке дефектной мелассы) в качестве ключевой примеси могут быть азотистые или серосодержащие примеси, а при переработке зерно-картофельного сырья или отходов виноделия — метанол.

При эксплуатации эюрационных колонн считается допустимым содержание в эюрате альдегидов до 5 мг/л, эфиров 80 мг/л, метанола до 0,06% об. При выработке спирта экстра эти нормы ужесточаются и соответственно составляют 2,40—60 и 0,04% об.

Группа альдегидов представлена в основном уксусным альдегидом или альдегидами, имеющими коэффициент испарения, близкий к нему. Поэтому расчет колонны по группе альдегидов без большой погрешности можно вести по уксусному альдегиду.

Значительно сложнее обстоит дело с эфирами, так как группа эфиров представлена целым рядом компонентов, обладающих различной летучестью. При анализе спирто-водных смесей содержание эфиров определяется групповым методом, поэтому мы не знаем, какая доля из них приходится на уксусноэтиловый. Основываясь на данных УкрНИИСПа, можно ориентировочно принять, что в бражном дистилляте на долю уксусноэтилового эфира приходится 70%. Содержание уксусноэтилового эфира в элюате можно допустить не более 10 мг/л. Исходя из этих соображений можно провести расчет элюационной колонны.

Этот расчет следует считать ориентировочным впрямь до детального изучения качественного и количественного состава примесей, сопутствующих спирту, и коэффициентов испарения их.

При расчете элюационной колонны в первую очередь должно быть определено необходимое число тарелок и сечение колонны в зависимости от степени извлечения ключевой примеси.

Исходными величинами при расчете будут: концентрация спирта в жидкости, поступающей на питание элюационной колонны  $X_1$ , и содержание в ней ключевого компонента  $\alpha_0$ .

Порядок расчета проследим на конкретном примере.

*Пример.* Примем, что элюационная колонна БРУ косвенного действия должна работать при следующих условиях: содержание спирта в бражном дистилляте  $X_1=45,22\%$  об.=38% мас.=19,34% мол., ключевая примесь — уксусноэтиловый эфир. Содержание уксусноэтилового эфира в бражном дистилляте  $\alpha_0=200$  мг/л, в элюате  $\alpha_0=10$  мг/л; суточная производительность колонны 2000 дал безводного спирта. Колонна обогревается закрытым паром.

Задавшись несколькими значениями удельного расхода пара ( $P=0,6; 0,8; 1; 1,2$  и  $1,4$  кг/кг спирта, введенного в колонну), определим значения  $L/G$  (по рис. 68, б). Затем по построению на диаграмме  $X-Y$  определим соответственно концентрации спирта на тарелке питания  $X_{пит}$ , а на основании послед-

Таблица 12

К расчету числа тарелок в элюационной колонне

$P$ , кг/кг	$P$ , кг/дал	$L/G$	$X_{пит}$		$K$	$KG/L$	$n$
			% мол.	% мас.			
0,4	3,2	6,2	25,2	46,3	5,0	0,806	—
0,6	4,8	4,4	27,7	49,45	4,55	1,033	14,7
0,8	6,4	3,6	29,9	52,15	4,3	1,195	7,8
1,0	8,0	3,1	31,9	54,5	4,1	1,32	6,2
1,2	9,6	2,7	34,1	56,95	3,9	1,44	5,3
1,4	11,2	2,45	36,0	59,0	3,7	1,51	4,2
0,57	4,56	4,6	—	—	4,6	1,0	24,3

них — значения  $K$  для уксусноэтилового эфира. На основании полученных данных определяется величина  $KG/L$ ; по рис. 68, а или по формуле (83) величина  $n$  при  $a_c/a_o=200/10$  равна 20. Результаты расчета сведены в табл. 12.

При удельном расходе пара  $P=0,4$  кг/кг требуется бесконечно большое число тарелок. Определим, при каком значении  $L/G$  величина  $KG/L=1$ . т. е. при каком значении  $L/G=K$ . Для этого по табличным данным построим график  $KG/L=f(L/G)$  (рис. 76).

Из графика находим, что  $K=L/G=4,6$ , чему соответствует  $P=0,57$  кг/кг, а по формуле (83) находим, что  $n=24,3$ .

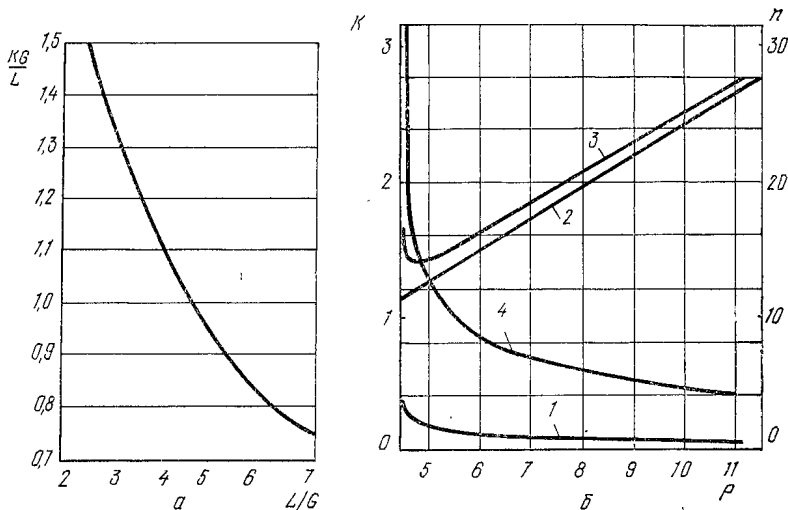


Рис. 76. К определению оптимального числа тарелок в элюиционной колонне: а —  $KG/L=f(L/G)$ ; б — определение затрат ( $K$ , коп./дал): 1 — амортизационные отчисления; 2 — стоимость пара; 3 — суммарные затраты; 4 — необходимое число тарелок ( $n$ , шт.) в зависимости от удельного расхода пара ( $P$ , кг/дал)

В результате расчета получена зависимость между удельным расходом пара  $P$  и числом теоретических тарелок  $n$ . Оптимальное число тарелок находим на основании технико-экономического расчета.

Примем, что стоимость пара равна 0,25 коп./кг, а амортизационные отчисления, приходящиеся на 1 теоретическую тарелку, 0,015 коп. на 1 дал спирта. На рис. 76, б построен график зависимости удельного расхода пара и суммарных расходов на проведение процесса элюации, а также показана зависимость между числом теоретических тарелок и удельным расходом пара.

Из графика видно, что минимальным затратам соответствует удельный расход пара 4,8 кг/дал, или 0,6 кг на 1 кг спирта, при  $n=14,7$ . Если принять КПД тарелок  $\eta=0,5$ , то в отгонной части колонны необходимо установить реальных тарелок

$$N_1 = n/\eta = 14,7/0,5 = 29,4 \approx 30.$$

Таким путем рассчитывается число тарелок в отгонной части колонны. Для концентрационной части колонны число тарелок следует определять исходя из заданной концентрации этилового спирта в головной фракции и кратности концентрирования ключевой примеси.

При расчете концентрационной части колонны примем, что  $R=\infty$ , тогда концентрация спирта и содержание уксусноэтилового эфира по тарелкам кон-

центрационной части колонны определится в соответствии с табл. 13 (при  $P=4,8$  кг/дал, или 0,6 кг на 1 кг спирта).

Концентрация спирта определялась по диаграмме  $X-Y$ , а содержание уксусноэтилового эфира — расчетом от тарелки к тарелке по формуле  $\alpha_n = K\alpha_{n-1}$ . Из данных табл. 13 видно, что концентрация спирта на пятой тарелке достигла 91,5 % мас. = 94,5 % об., а содержание эфиров 31000 мг/л. Чтобы вывести весь уксусноэтиловый эфир с головным продуктом, необходимо отбирать не менее 0,65% головной фракции от количества введенного в колонну спирта. При наличии шести тарелок отбор может быть уменьшен до 0,31%.

Таблица 13

Распределение концентраций спирта и уксусноэтилового эфира по тарелкам концентрационной части эпоксидной колонны

Тарелка	X		K	$\alpha$ , мг/л	Минимальный процент отбора ГФ
	% мол.	% мас.			
Питания	27,7	49,45	4,55	200	100
1-я	56,6	79,9	2,75	910	22
2-я	68,2	84,6	2,45	2500	8
3-я	74,2	88,0	2,3	6120	3,26
4-я	78,2	90,2	2,2	14100	1,42
5-я	80,6	91,5	2,1	31000	0,65
6-я	82,3	92,2	2,1	65000	0,31

Определим число флегмы при отборе 0,31% головной фракции. При  $P=0,6$  кг/кг  $G=0,6/18=0,033$  кмоль. Количество головной фракции на 1 кг введенного в колонну спирта

$$G_{ГФ} = (1 \cdot 0,31 \cdot 100) / (92,2 \cdot 100) = 0,0034 \text{ кг.}$$

Среднемолекулярная масса водно-спиртовой смеси при концентрации 92,2% мас.

$$M_{ср} = \frac{100}{(92,2/46) + (7,8/18)} = 41,1 \text{ кг/кмоль.}$$

Величина парового потока  $G=0,033 \cdot 41,1=1,36$  кг.

Следовательно, число флегмы будет равно

$$R = (G - G_{ГФ}) / G_{ГФ} = (1,36 - 0,0034) / 0,0034 \approx 399.$$

При построении рабочей линии без большой погрешности можно принимать  $R=\infty$ .

Если принять для концентрационной части колонны КПД тарелок 0,5, то требуется всего  $N_2=6/0,5=12$  тарелок.

Общее число тарелок в колонне  $N=N_1+N_2=30+12=42$  шт.

При расчете числа тарелок в эпоксидной колонне важно правильно выбрать ключевую примесь. В случае расчета эпоксидных колонн, работающих под разрежением, необходимо учитывать изменение коэффициентов испарения спирта и его примесей.

Для определения сечения колонны предварительно следует задаться типом тарелки и межтарелочным расстоянием.

Примем, что устанавливаются многоколпачковые тарелки с межтарелочным расстоянием 170 мм. Допуская постоянство парового потока  $G=0,033$  кмоль на 1 кг спирта, введенного в колонну, определим его объем при условии, что избыточное давление в нижней части колонны  $p=14,7 \cdot 10^3$  Па и в верхней  $p=4,9 \cdot 10^3$  Па. При производительности колонны 2000 дал/сут секундная производительность ее составит

$$(2000 \cdot 8)/(24 \cdot 3600) = 0,185 \text{ кг},$$

или

$$G = 0,033 \cdot 0,185 \approx 0,0061 \text{ кмоль/с.}$$

Масса парового потока в верхней части колонны (при  $X=92,2\%$  мас.)

$$G_B = 0,0061 \cdot 41,1 = 0,25 \text{ кг/с};$$

в нижней части колонны

$$G_H = 0,0061 \cdot 23,4 = 0,143 \text{ кг/с},$$

где 23,4—среднемолекулярная масса спирто-водной смеси при  $X=38\%$  мас.

Плотность пара в верхней части колонны при избыточном давлении  $4,9 \cdot 10^3$  кПа (0,5 м вод. ст.)  $\rho_B=1,5$  кг/м<sup>3</sup>, плотность пара в нижней части колонны при давлении  $14,7 \cdot 10^3$  кПа (1,5 м вод. ст.)  $\rho_H=0,89$  кг/м<sup>3</sup> (см. рис. 84, а).

Допустимая скорость пара в верхней части колонны  $w_B=0,58$  м/с и в нижней  $w_H=0,75$  м/с (см. рис. 84, б).

Сечение колонны с учетом возможной форсировки (20% против расчетной) равно:

в верхней части колонны

$$F_B = (G_B \cdot 1,2)/(\rho_B w_B) = (0,25 \cdot 1,2)/(1,5 \cdot 0,58) = 0,345 \text{ м}^2,$$

или  $d_B=0,663$  м;

в нижней части колонны

$$F_H = (G_H \cdot 1,2)/(\rho_H w_H) = (0,143 \cdot 1,2)/(0,89 \cdot 0,75) = 0,257 \text{ м}^2,$$

или  $d_H=0,573$  м. Принимаем больший диаметр.

Следует отметить, что эapurационные колонны ректификационных установок не всегда запроектированы правильно.

Брагоректификационные установки полупрямого действия, получившие некоторое распространение на спиртовых заводах Советского Союза после Великой Отечественной войны, имели эapurационную колонну с малым сечением, что снижало их производительность. В последние годы Гипропищепром-2 запроектировал брагоректификационные установки, в которых сечение эapurационных колонн завышено.

На основании теоретического анализа работы эapurационных колонн и экспериментальных данных с учетом возможных практических отклонений в процессе работы эapurационной колонны можно рекомендовать следующие зависимости между основными параметрами эapurационных колонн (табл. 14).

При расчете принято расстояние между тарелками многоколпачковыми 170 мм, одноколпачковыми—280 мм; скорость пара в свободном сечении 0,5 м/с. Удельный расход пара принят максимально возможный при переработке сырья пониженного качества.

Ориентировочно производительность эapurационных колонн брагоректификационных установок косвенного действия и установок для ректификации спирта-сырца с многоколпачковыми тарелками по спирту высшей очистки можно определять в зависимости от их диаметра:

$$M = 2222 D^2 \text{ дал/сут.}$$

## Основные параметры эпорационных колонн

Тип эпорационной колонны	Число тарелок		Тип тарелок
	отгонная часть	концентрационная часть	отгонная часть
Полная колонна для эпорации бражки	20—25	12—10	Одноколпачковые
Отгонная колонна для эпорации бражки	10	—	То же
Полная колонна для эпорации бражного дистиллята	30—38	18—10	Многоколпачковые, клапанные
Полная колонна для эпорации дистиллята, полученного из отгонной колонны эпорации бражки	30—38	18—10	То же
Полная колонна при питании спиртоводным паром	30—38	12—10	»

Продолжение табл.

Тип эпорационной колонны	Тип тарелок	Диаметр колонны, м	
	концентрационная часть	отгонная часть	концентрационная часть
Полная колонна для эпорации бражки	Многоколпачковые, клапанные	$0,025\sqrt{M^*}$	$0,025\sqrt{M^*}$
Отгонная колонна для эпорации бражки	То же	$0,0177\sqrt{M^{**}}$	—
Полная колонна для эпорации бражного дистиллята	»	$0,0212\sqrt{M}$	$0,0212\sqrt{M}$
Полная колонна для эпорации дистиллята, полученного из отгонной колонны эпорации бражки	»	$0,0165\sqrt{M}$	$0,0165\sqrt{M}$
Полная колонна при питании спиртоводным паром	»	$0,0212\sqrt{M}$	$0,033\sqrt{M}$

Примечание.  $M$  — суточная производительность установки, дал безводного спирта.\* Для колонн с ситчатыми тарелками  $0,017\sqrt{M}$ .\*\* То же,  $0,012\sqrt{M}$ .

Число тарелок в колонне  $N$  целесообразно устанавливать также в зависимости от диаметра:

$$\text{при } D \leq 1,2 \text{ м } N = 48 \left( \frac{18}{30}; \frac{10}{38} \right);$$

$$\text{при } D \geq 1,4 \text{ м } N = 56 \left( \frac{18}{38}; \frac{10}{46} \right).$$

В скобках дано желаемое соотношение тарелок в концентрационной — верхней (числитель) и отгонной — нижней (знаменатель) части колонны, предусматривая наличие вводов питания по высоте колонны.



## Оптимальное проектирование и эксплуатация эюорационных колонн

А. П. Николаевым установлено, что основными факторами, определяющими затраты ( $K$ , коп./дал) на процесс эюорации, являются расход пара ( $P$ , кг/дал) и процент отбора ГФ ( $E$ , %). На рис. 77 дана экономическая характеристика полной эюорационной колонны установок для ректификации спирта-сырца и брагоректификационных установок косвенного действия. Характеристика показывает, что наиболее экономична работа колонны при минимальных  $P$  и  $E$ . Выбор оптимальной величины  $P$  определяется статической характеристикой отгонной части эюорационной колонны  $P_{\text{опт}} = f(a_c/a_o, X_M, n)$ , а выбор оптимального значения  $E$  — статической характеристикой концентрационной части колонны.

Из анализа экономической и статической характеристики эюорационной колонны видно, что вследствие значительной стоимости греющего пара и малой стоимости тарелок экономичность процесса тем выше, чем больше (до определенного предела) число тарелок в отгонной части колонны, что позволяет работать с меньшим расходом пара (см. рис. 76).

Опыт промышленной эксплуатации показывает, что увеличение числа тарелок в эюорационных колоннах способствует повышению качества ректифицированного спирта, снижению энергетических затрат, а следовательно, повышению экономичности работы колонн.

Число тарелок должно быть достаточно большим, как в отгонной, так и в концентрационной части колонны. Увеличение числа тарелок в отгонной части за счет концентрационной допустимо только в тех случаях, когда необходимо повысить степень извлечения примесей, не взирая на снижение экономических показателей, за счет роста отбора ГФ.

В последнее время в типовых ректификационных установках увеличено число тарелок в спиртовых колоннах с 66 до 74 (при установке одной дополнительной царги), а в ряде случаев до 82 (при установке двух дополнительных царг). По всей видимости, настала необходимость увеличить число тарелок и в эюорационной колонне по крайней мере на 1 царгу (8 тарелок), а для колонн большого диаметра — даже на 2 (16 тарелок). В таком случае верхняя отметка установки эюорационных колонн будет соответствовать верхней отметке спиртовой колонны. Таким образом, эюорационные колонны будут иметь 47—48 или 55—56 тарелок.

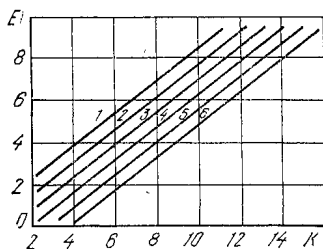


Рис. 77. Экономическая характеристика эюорационной колонны при  $P$ , кг на 1 кг безводного спирта:

1 — 0,5; 2 — 1,0; 3 — 1,5; 4 — 2,0; 5 — 2,5; 6 — 3,0

В зарубежной практике применяются элюционные колонны с 65—70 тарелками. Экономическая характеристика (рис. 77) позволяет определить затраты на процесс в зависимости от процента отбора ГФ и удельного расхода пара ( $P$ ). Необходимый расход пара определяется на основе статической характеристики колонны.

Анализом элюционных колонн брагоректификационных установок прямого действия установлено, что оптимальный расход пара для большинства примесей (уксусноэтиловый эфир, триэтиламин, уксусный альдегид) составляет около 0,2—0,25 моля на 1 моль питания. Уменьшение или увеличение подачи пара приводит к снижению извлекающей способности колонны; это объясняется тем, что с увеличением подачи пара уменьшается  $L/G$  и повышается концентрация спирта в отгонной части колонны, что приводит к снижению коэффициента испарения примеси. Установлено также, что метанол плохо концентрируется в верхней части колонны, поэтому отбор 3% ГФ не обеспечивает полного выделения метанола при наличии даже 20 тарелок в концентрационной части колонны.

Резюмируя результаты анализа работы элюционной колонны установок прямого действия, следует отметить, что элюция примесей в них идет менее эффективно, нежели в полных элюционных колоннах установок косвенного или полупрямого действия, хотя затраты на процесс минимальны, так как элюционная колонна обогревается вторичным паром.

Анализ элюирующей части бражной колонны в брагоректификационных установках косвенно-прямоточного действия показывает, что при наличии пяти теоретических тарелок в элюирующей части и отборе 40% головного продукта извлекающая способность элюирующей части достаточна для получения качественного спирта при переработке недефектного сырья. При переработке сырья, требующего большей кратности извлечения примесей, должны быть увеличены отбор головного продукта и число тарелок в элюирующей части колонны.

Анализ работы открытых элюционных колонн показывает, что при расходе пара 3—4 кг/дал в колонне с 30 тарелками можно достичь большего эффекта по выделению уксуснопропилового, уксусноизовалерианового эфиров, этилпропионата, этилизовалерианата, изоамилацетата, диацетила и кротонового альдегида, чем в полной элюционной колонне, при расходе пара 8—12 кг/дал, но при этом следует отгонять 30—50% этанола.

Анализируя работу элюционных колонн, А. П. Николаев установил, что при гидроселекции возможно снижение расхода греющего пара на 3—5 кг/дал без изменения качества спирта, что приводит к снижению стоимости на 1—1,5 коп./дал. Разбавление элюрата водой усложняет работу спиртовой колонны, но это может быть компенсировано увеличением числа тарелок в ней. Добавление 10 тарелок к спиртовой колонне увеличивает затраты всего на 0,05 коп./дал.

В случае работы элюционной колонны с гидроселекцией, когда вода подается на тарелки, расположенные выше ввода питания, но ниже верхней, процесс извлечения примесей интенсифицируется. Анализ показывает, что с увеличением расхода воды (при  $P = \text{const}$ ) увеличивается извлечение практически всех примесей. Головные примеси лучше извлекаются за счет отгонной части, а промежуточные — за счет гидроселекционной (между вводом питания и вводом воды) части колонны.

Увеличение расхода пара при гидроселекции сопровождается повышением эффекта извлечения примесей, кроме диацетила. Увеличение числа тарелок в гидроселекционной части колонны за счет отгонной способствует извлечению промежуточных примесей, таких, как диацетил, этилпропионат, но ухудшает извлечение головных примесей.

Анализ показал, что уменьшение числа тарелок в извлекающей части нежелательно, особенно когда в комплексе примесей преобладают головные.

Перемещение вверх точки ввода воды способствует извлечению промежуточных примесей.

## Глава V. АНАЛИЗ РАБОТЫ СПИРТОВЫХ КОЛОНН

В брагоректификационных установках и установках для ректификации спирта-сырца назначение спиртовой колонны состоит в том, чтобы выделить из элюрата спирт, сконцентрировать его, освободив от хвостовых, промежуточных и остатка головных примесей.

В сырцевых ректификационных установках в спиртовой колонне происходит только концентрирование спирта до 88 % об. за счет освобождения его от хвостовых примесей (лютерной воды).

В данном разделе рассматривается работа спиртовой колонны на примере брагоректификационных установок.

Чаще всего в брагоректификационных установках в качестве спиртовых применяют полные ректификационные колонны, и лишь в установках прямого действия с совмещенным извлечением спирта из бражки и лютерной воды применяют неполные колонны, состоящие только из концентрационной части. В отдельных случаях для удобства монтажа и ремонта спиртовую, как полную ректификационную колонну, расчленяют на отгонную и концентрационную части, которые органически связаны паровыми и жидкостными потоками. Такая колонна может рассматриваться как одна полная.

Спиртовая колонна может питаться элюратом, смесью элюрата и элюрированного пара или только элюрированным паром.

Элюрат вводится в спиртовую колонну при температуре, близкой к температуре его кипения, а спиртовой пар — сухой насыщенный.

Спиртовая колонна снабжена дефлегматором и конденсатором, в которых происходит конденсация всего парового потока. Из кон-