ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРИОДИЧЕСКОЙ РЕКТИФИКАЦИИ БИНАРНОЙ СМЕСИ ЖИДКОСТЕЙ

Ректификация – процесс разделения жидких гомогенных смесей с различной летучестью при противоточном контакте паровой и жидкой фазы. Ректификация проводится в противоточных колонных аппаратах, снабжённых контактными устройствами (насадкой или тарелками), и сводится к одновременно протекающим, многократно повторяемым актам частичного испарения и конденсации разделяемой смеси на поверхности раздела фаз.

При каждой частичной конденсации в жидкую фазу преимущественно переходит высококипящий компонент (ВК). Выделившаяся при конденсации теплота приводит к частичному испарению жидкости, при этом в паровую фазу преимущественно переходит низкокипящий компонент (НК), благодаря чему жидкость обогащается ВК, а пар – НК. В результате многократного повторения этих процессов верха колонны достигает пар, содержащий преимущественно НК, а низа колонны – жидкость, содержащая преимущественно ВК.

Исходная смесь, состоящая из двух компонентов, называется бинарной. Здесь рассматриваются смеси, для которых, согласно закону Коновалова, равновесный состав пара будет отличаться от состава жидкости большим содержанием НК. Мольные доли в жидкости и паре подчиняются уравнениям:

$$x_{\text{НК}} + x_{\text{ВК}} = 1,\ y_{\text{НК}} + y_{\text{ВК}} = 1. \qquad (5.1)$$

Для бинарной смеси достаточно знать лишь концентрацию одного, обычно низкокипящего компонента, поэтому в дальнейших уравнениях обозначения концентраций даются без индекса компонентов.

Процесс ректификации осуществляется в тарельчатых или насадочных аппаратах непрерывного или периодического действия. Принципиальная схема ректификационной установки непрерывного действия представлена на рис. 5.1.

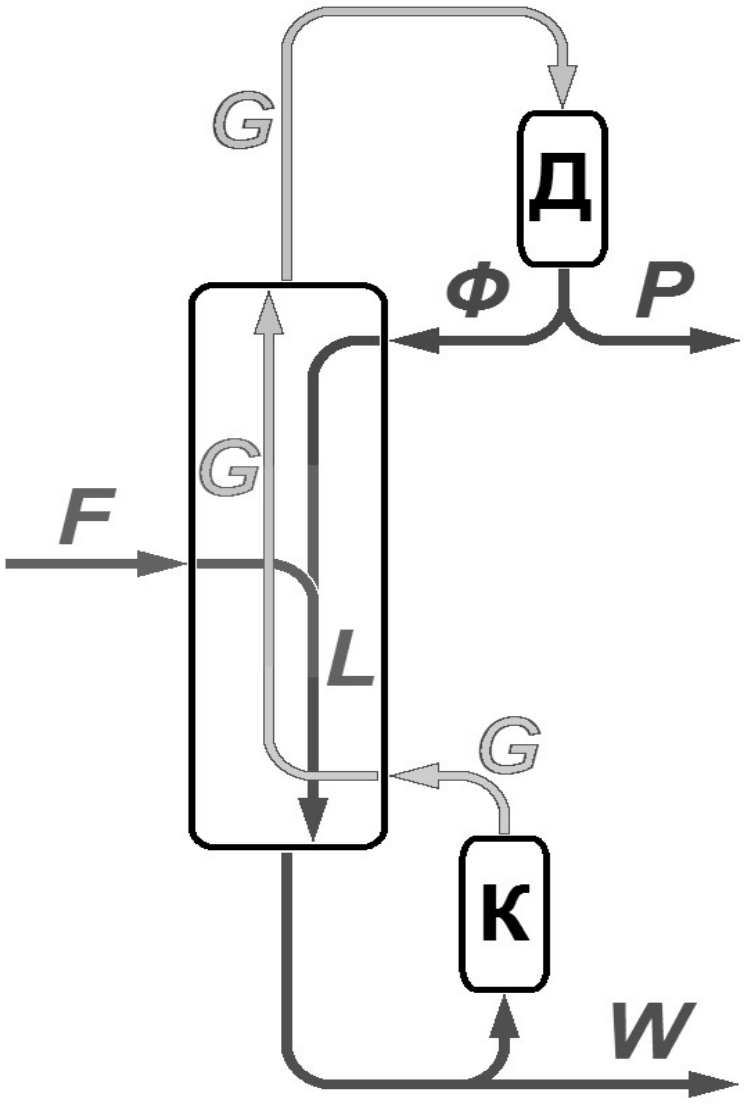

Рис. 5.1. Принципиальная схема непрерывной ректификации бинарной смеси

В колонну поступает исходная смесь F, содержание НК, в которой составляет x_F. Сечение колонны, куда подаётся исходная смесь, называют сечением (точкой) питания. Его положение в колонне определяется равенством состава фаз в данной точке колонны составу фаз питания. Стекая вниз по колонне, жидкость взаимодействует с поднимающимся из кипятильника паром, при этом жидкость обедняется НК и обогащается ВК. В кипятильнике К жидкость частично испаряется, образуя пар G состава y_W, а остальная часть жидкости (кубовый остаток) состава x_W выводится в качестве одного из продуктов разделения.

Пар из кипятильника, поднимаясь по колонне, контактирует со сте-

кающей жидкостью и обогащается НК, обедняясь ВК. При этом состав пара y меняется от y_W (внизу колонны) до y_P (вверху колонны). Из колонны пар поступает в дефлегматор Д, где конденсируется, превращаясь в жидкость состава x_P, которая делится на два потока: ректификат (дистиллят) P, отводимый в качестве продукта, и флегму Ф, подаваемую на орошение колонны.

Ректификационная колонна непрерывного действия имеет две части: нижнюю (исчерпывающую) – между точками ввода питания и пара из кипятильником и верхнюю (укрепляющую) – между точками ввода питания и флегмы. Стекающая по колонне жидкость L образована флегмой Ф в верхней части колонны и совместно флегмой и исходной смесью – в нижней части колонны:

$$L_В = Ф\,,\ L_Н = Ф + F\,. \tag{5.2}$$

Состав стекающей по колонне жидкости x меняется от x_P (вверху колонны) до x_W (внизу колонны).

Таким образом, при непрерывной ректификации исходная смесь F состава x_F делится на два продукта: ректификат P состава x_P и кубовую жидкость W состава x_W. Эти величины связаны между собой уравнениями материального баланса:

$$\begin{cases} F = P + W \\ F \cdot x_F = P \cdot x_P + W \cdot x_W. \end{cases} \tag{5.3}$$

Первое уравнение системы (5.3) составлено по сумме НК и ВК, второе представляет собой материальный баланс по НК. При этом потоки F, P и W выражены в киломолях смеси на единицу времени, а концентрации – в мольных долях. Такой выбор размерностей обусловлен тем, что для значительного числа разделяемых бинарных смесей мольные теплоты испарения (конденсации) близки между собой, в силу чего мольные потоки фаз по высоте колонны приближенно считают постоянными: G = const, $L_Н$ = const, $L_В$ = const.

Очевидно, что флегма и дистиллят – жидкости одинакового состава, поскольку являются частями одного потока – потока выходящего из дефлегматора конденсата. Отношение потока флегмы к потоку дистиллята называют флегмовым числом:

$$R = \frac{\Ф}{P}, \tag{5.4}$$

где потоки флегмы и дистиллята могут быть выражены как киломолями в единицу времени, так и килограммами в единицу времени.

Качество получаемых при ректификации продуктов в значительной мере определяется величиной флегмового числа.

В отличие от флегмового числа, число питания является отношением расхода исходной смеси к расходу дистиллята, где расходы могут быть выражены только киломолями в единицу времени:

$$f = \frac{F}{P}. \tag{5.5}$$

Материальный баланс, составленный для верхней (укрепляющей) части колонны, приводит к уравнению рабочей линии:

$$y = \frac{R}{R+1} \cdot x + \frac{x_{\text{Р}}}{R+1}\ . \tag{5.6}$$

Аналогично получают уравнение рабочей линии нижней (исчерпывающей) части колонны, в случае подачи питания при температуры кипения (в дальнейшим будет рассматриваться только такое питание):

$$y = \frac{R+f}{R+1} \cdot x + \frac{1-f}{R+1} \cdot x_{\text{W}}. \tag{5.7}$$

Уравнение (5.6) связывает рабочие концентрации фаз в укрепляющей (верхней) части колонны, при этом подразумевается, что пары в дефлегматоре конденсируются полностью, так что в верхней точке колонны $y_{\text{Р}} = x_{\text{Р}}$. Уравнение (5.7) связывает рабочие концентрации контактирующих фаз в исчерпывающей (нижней) части колонны, при этом приближении допускается, что $y_{\text{W}} = x_{\text{W}}$. Это условие подразумевает полное испарение жидкости

в кипятильнике, что в реальных условиях невозможно. На практике наблюдается частичное испарение жидкости в кипятильнике с образованием парожидкостной смеси (в случае вертикального испарителя), разделение которой на фазы происходит в нижнем сепарационном пространстве колонны. В соответствии с уравнением (5.6) рабочая линия верхней части колонны отсекает на вертикальной оси диаграммы *y–x* отрезок (рис. 5.5):

$$B = \frac{x_{\text{P}}}{R+1}. \tag{5.8}$$

Это свойство обычно используют при построении рабочих линий.

Наклон рабочих линий зависит от флегмового числа. При $R = \infty$ (полный возврат конденсата в колонну) рабочие линии совпадают с диагональю. По мере уменьшения флегмового числа рабочие линии приближаются к линии равновесия. При некотором значении $R = R_{\min}$ точка пересечения рабочих линий обеих частей касается равновесной линии. При этом рабочая концентрация пара в точке питания равна концентрации НК в паре, равновесном с исходной смесью: $y_{\text{F}} = y_{\text{F}}^*$. Это значение $R_{\min}$ называют минимальным флегмовым числом, соответствующим бесконечно большой поверхности контакта фаз, и его можно определить из уравнения:

$$R_{\min} = \frac{x_{\text{P}} - y_{\text{F}}^*}{y_{\text{F}}^* - x_{\text{F}}}. \tag{5.9}$$

Для работы реальной колонны флегмовое число *R* должно быть больше минимального. Связь этих двух значений даёт коэффициент избытка флегмы β:

$$R = \beta \cdot R_{\min}. \tag{5.10}$$

Интенсивность процесса разделения может быть охарактеризована величиной среднего коэффициента массопередачи для каждой из зон колонны, например, по паровой фазе:

$$K_{\text{y}} = \frac{j_{\text{НК}}}{A \cdot \Delta y_{\text{ср}}}, \tag{5.11}$$

где $j_{НК}$ – межфазный поток НК, кмоль/с; A – площадь поверхности массопередачи, м^2; $\Delta y_{ср}$ – средняя движущая сила массопередачи по паровой фазе, мол. доли.

Поток НК, перешедшего из одной фазы в другую, может быть найден по уравнению:

$$j_{НК} = \left(y_К - y_Н\right) \cdot P \cdot \left(R + 1\right). \tag{5.12}$$

Благодаря допущению о неизменности мольных расходов фаз расход паровой фазы в уравнении (5.12) может быть найден через расход дистиллята:

$$\dot{n}_G = P \cdot \left(R + 1\right). \tag{5.13}$$

Площадь поверхности массопередачи может быть принята равной величине геометрической поверхности насадки:

$$A = a \cdot H \cdot S, \tag{5.14}$$

где a – удельная поверхность насадки, м^2/м^3; H – высота насадки, м; $S = \dfrac{\pi \cdot D_{вн}^2}{4}$ – площадь сечения колонны, м^2; $D_{вн}$ – внутренний диаметр колонны, м.

Средняя движущая сила массопередачи определяется выражением:

$$\Delta y_{ср} = \frac{y_К - y_Н}{N_{Oy}}, \tag{5.15}$$

$$N_{Oy} = \int_{y_Н}^{y_К} \frac{dy}{y^*\left(x\right) - y}, \tag{5.16}$$

где N_{Oy} – общее число единиц переноса, рассчитанное по концентрациям НК в паровой фазе.

С учётом выражений (5.12) и (5.15) уравнение (5.11) может быть приведено к виду:

$$K_{\text{у}} = \frac{P \cdot (R+1) \cdot N_{\text{Оу}}}{A}. \qquad (5.17)$$

Высота единицы переноса определяется по уравнению:

$$h_{\text{Оу}} = \frac{H}{N_{\text{Оу}}}, \qquad (5.18)$$

где H – высота насадки, м.

Мольный расход ректификата определяется по формуле:

$$P = \frac{V_{\text{Р}}}{t} \cdot \frac{\rho_{\text{Р}}}{M_{\text{Р}}}, \qquad (5.19)$$

где $V_{\text{Р}}$ – объём дистиллята, м^3; t – время отбора дистиллята, с; $\rho_{\text{Р}}$ – плотность дистиллята, кг/м^3; $M_{\text{Р}} = M_{\text{НК}} \cdot x_{\text{Р}} + M_{\text{ВК}} \cdot (1 - x_{\text{Р}})$ – молярная масса ректификата, кг/кмоль.

Высота теоретической ступени находится по уравнению:

$$h_{\text{Т}} = \frac{H}{N_{\text{Т}}}, \qquad (5.20)$$

где $N_{\text{Т}}$ – число теоретических ступеней, определяемое графически, как число ступеней между рабочей и равновесной линией на диаграмме *y–x* (см. рис. 5.5).

Периодическая ректификация имеет ряд особенностей, отличающих её от непрерывной. При постоянном значении флегмового числа состав продуктов ректификации непрерывно меняется, что усложняет процесс расчёта. Однако в первой части данной лабораторной работы вследствие небольшого количества отбираемого дистиллята состав продуктов меняется незначительно и процесс ректификации можно считать квазистационарным. Для стационарного процесса, при определении усредненных величин, можно применять зависимости, используемые для непрерывной ректификации – уравнения (5.1) – (5.20).

Одной из основных задач расчёта процесса периодической ректификации при постоянном флегмовом числе является определение среднего состава дистиллята. Ввиду того, что содержание НК в кубе непрерывно

уменьшается по ходу течения ректификации, концентрация НК в дистилляте также падает. Наиболее распространённый метод определения среднего состава дистиллята основан на предположении о постоянной разделяющей способности колонны, что выражается в постоянном числе теоретических ступеней, достигаемых при разделении данной смеси по ходу всего процесса периодической ректификации (N_T = const).

Таким образом, определение среднего состава дистиллята сводится к решению системы уравнений (5.3), которая для периодической ректификации принимает вид:

$$\begin{cases} F = P_K + W_K \\ F \cdot x_F = P_K \cdot x_{P\,ср} + W_K \cdot x_{W\,K}. \end{cases} \tag{5.21}$$

Эту систему дополняют следующим уравнением:

$$\ln\left(\frac{P_K + W_K}{W_K}\right) = \int_{x_{WK}}^{x_F} \frac{\mathrm{d}\,x_W}{x_P - x_W}, \tag{5.22}$$

В уравнениях (5.21) – (5.22) x_P, x_W – концентрации НК в дистилляте и в кубовой жидкости; x_{WK} – конечное содержание НК в кубе; P_K и W_K – конечное число киломолей дистиллята и кубового остатка; $x_{P\,ср}$ – средняя концентрация НК в дистилляте.

В соответствии с вышеизложенным, проведение экспериментов и расчёт разделяются на две части.

В первой части работы производится небольшой отбор дистиллята за малое время. По определенным величинам объёма дистиллята и концентрации НК в дистилляте по уравнениям (5.13–5.20) определяют K_y, h_{Oy} и h_T.

Во второй части производят отбор достаточно большого количества дистиллята за продолжительное время, затем в соответствии с уравнениями (5.21) – (5.23) определяют средний состав дистиллята.

***Цель работы**:* ознакомление с устройством и работой ректификационной установки; разделение жидкой бинарной смеси этанол-вода периодической ректификацией; определение состава дистиллята, числа ступеней

изменения концентраций (теоретических тарелок) и высоты, эквивалентной теоретической тарелке, числа единиц переноса и высоты единицы переноса, коэффициента массопередачи.

Описание установки

Установка предназначена для разделения жидких смесей при атмосферном давлении. Схема лабораторной установки изображена на рис. 5.2. Ректификационная установка изготовлена фирмой SOVIREL (Франция).

Исходная смесь этанола и воды заливается в куб-кипятильник К, где нагревается до температуры кипения. Обогрев куба производится трубчатым электронагревателем ТЭН. Измерение температуры в кубе осуществляется термометром (поз. 1).

Образующиеся к кубе К пары поступают в ректификационную колонну КР внутренним диаметром 80 мм, где контактируют со стекающей по насадке жидкостью, обогащаясь этанолом. Колонна заполнена насадкой Н – стеклянными кольцами Рашига размером 7×7×1,5 мм; высота слоя насадки в колонне равна 180 см. Далее через отверстие О в куполообразной перегородке пары поступают в дефлегматор Д, где конденсируются за счёт отвода теплоты водой, подаваемой в змеевик дефлегматора. Расход воды регулируется вентилем $В_1$ и контролируется по ротаметру (поз. 2).

Стекающий из дефлегматора конденсат поступает в делитель флегмы Ф, который представляет собой ёмкость с электромагнитным клапаном. При открытом клапане конденсат направляется в линию отбора дистиллята, при закрытом клапане жидкость (флегма) поступает на орошение колонны. Соотношение потоков флегмы и дистиллята (флегмовое число) устанавливается по соотношению времени открытого клапана и времени, когда клапан закрыт. Управление клапаном осуществляется с помощью компьютера.

В случае проскока паров через дефлегматор Д они будут сконденсированы в обратном холодильнике ХО. Для предотвращения проскока паров через линию дистиллята она снабжена гидравлическим затвором Г.

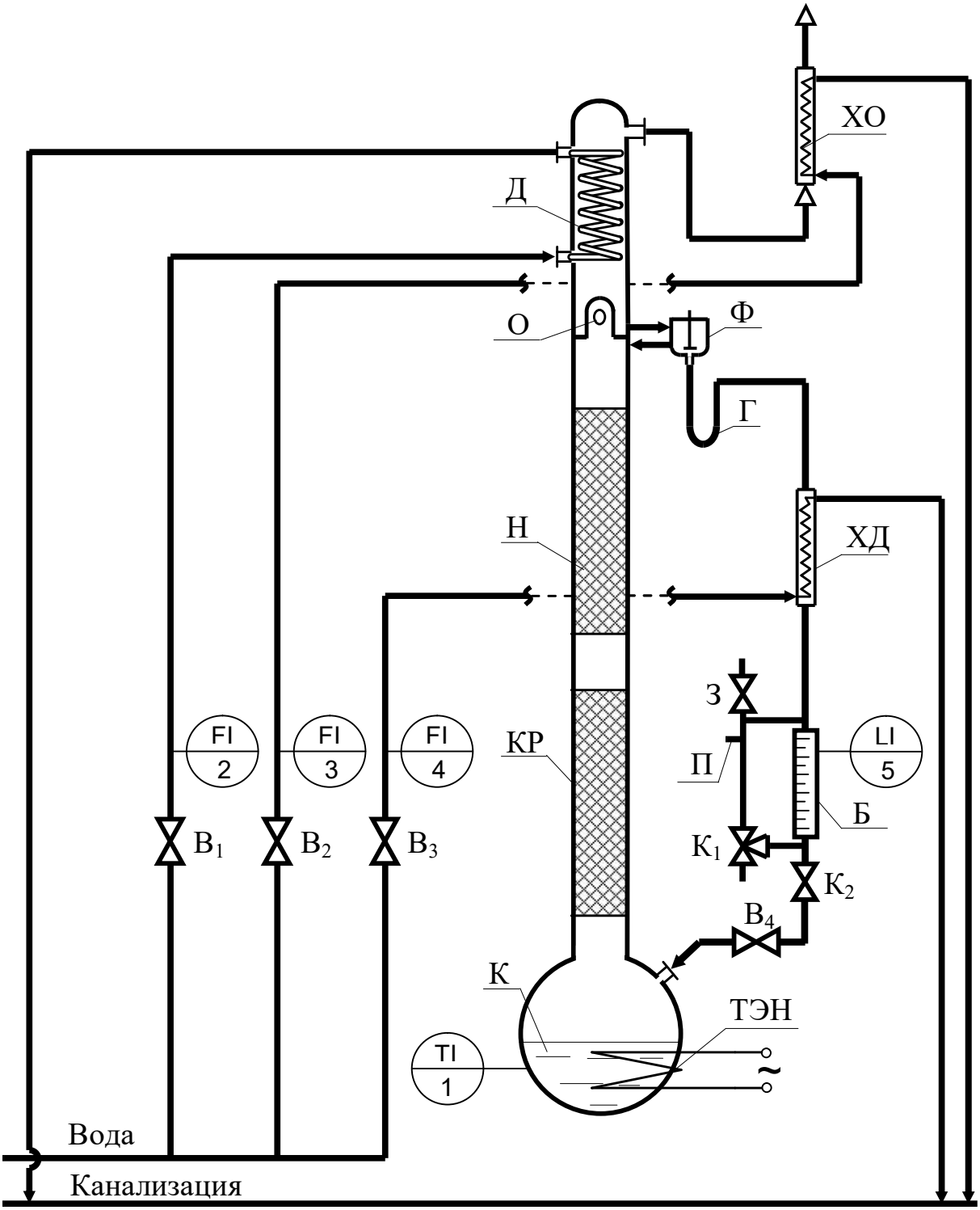

Рис. 5.2. Схема лабораторной ректификационной установки [6, 9]:
К – куб-кипятильник, ТЭН – трубчатый электронагреватель, КР – ректификационная колонна, Н – насадка, Д – дефлегматор, ХО – обратный холодильник, Б – бюретка, ХД – холодильник, П – пробоотборник, З – заглушка, Ф – делитель флегмы, Г - гидравлический затвор.

Дополнительное охлаждения дистиллята происходит в холодильнике ХД, после которого дистиллят либо возвращается в куб-кипятильник К, либо накапливается в мерной бюретке Б (при открытом кране $К_2$ и вентиле $В_4$). Мерная бюретка отградуирована от 0 до 100 $см^3$. Бюретка снабжена байпасной линией с трёхходовым краном $К_1$, пробоотборником П и патрубком с заглушкой (пробкой) З для возврата в установку отобранных в ходе работы проб.

Методика выполнения первой части работы

Пуск установки осуществляется после детального ознакомления с устройством, с инструкцией по технике безопасности, уяснения способа изменения расхода дистиллята и отбора пробы на анализ, беседы с преподавателем и при наличии от него разрешения на проведение работы. Перед пуском установки необходимо убедится, что куб заполнен исходной смесью не менее чем на половину, но не более чем на две трети. Работа на установке требует достаточной квалификации и опыта, поэтому все включения или переключения на установке выполняется только учебным мастером или лаборантом.

1. С помощью вентилей $В_1$, $В_2$ и $В_3$ включите подачу водопроводной воды на охлаждение дефлегматора Д, обратного холодильника ХО и холодильника дистиллята ХД, контролируя расход воды по ротаметрам (поз. 2, 3 и 4).

2. Убедитесь, что краны $К_1$ и $К_2$ закрыты, а вентиль $В_4$ на линии возврата дистиллята в куб-кипятильник открыт.

3. Включите трубчатый электронагреватель ТЭН.

Жидкость в кубе закипит через 40–50 мин.

От начала закипания жидкости в кубе до появления дистиллята в дефлегматоре проходит около 20 мин, которые требуются на прогрев насадки колонны (наблюдается визуально по стекающему по насадке конденсату).

4. С помощью компьютера, управляющего делителем флегмы Ф, установите заданное преподавателем флегмовое число, как соотношение временных отрезков подачи флегмы на орошение колонны и отбора ди-

стиллята.

Поступление конденсата на линию дистиллята наблюдается визуально по изменению уровня жидкости в гидрозатворе Г, а после его заполнения – по стеканию дистиллята в мерную бюретку Б.

5. При появлении первых порций жидкости в мерной бюретке Б откройте кран $К_2$ для возврата дистиллята в куб-кипятильник.

6. Через 10–15 мин после поступления первых порций дистиллята в мерную бюретку Б установка выйдет на стационарный режим работы.

Зафиксируйте температуру кипения жидкости в кубе T_W.

7. Закройте кран $К_2$ и произведите замер времени накопления дистиллята в мерной бюретке Б от деления 0 до деления 100 $см^3$.

8. Не открывая кран $К_2$ после набора полной мерной бюретки, дождитесь перелива жидкости из бюретки в байпас.

При закрытом кране $К_1$ налейте в мерный цилиндр 50 мл дистиллята через шланг, закреплённый на патрубке П.

Сразу после отбора пробы откройте краны $К_1$ и $К_2$ для слива дистиллята из байпаса и бюретки в куб-кипятильник.

9. Измерьте плотность пробы дистиллята с помощью ареометра и её температуру с помощью термометра.

Воспользовавшись зависимостью плотности водных растворов от состава, определите массовую долю этанола по измеренным значениям плотности и температуры.

10. Слейте содержимое мерного цилиндра в куб через заглушку (пробку) З.

11. Выключите питание трубчатого электронагревателя ТЭН. Остановите работу делителя флегмы Ф. Подачу воды в дефлегматор и холодильники отключите не ранее чем через 25 минут после выключения электронагревателя.

Порядок выполнения работы при совмещении первой и второй части

Вторую часть работы проделайте после выполнения первых 7-ми пунктов первой части. Дальнейшие пункты выполнения работы следующие.

8. После отбора дистиллята для определения концентрации НК в

начале ректификации продолжайте отбор дистиллята в другую (более объёмную) ёмкость. Отбор дистиллята продолжается до температуры кипения в кубе, соответствующей заданной величине конечной концентрации НК в кубе (x_{WK}). Замерьте объём отобранного дистиллята.

9. Определите содержание этанола в первой пробе дистиллята и в большом объёме дистиллята.

10. Верните в установку весь отобранный дистиллят через открытую заглушку (пробку) 3.

11. Выключите установку в порядке, обратном включению, при этом прекратите подачу воды в теплообменники через 25 мин после выключения ТЭН.

Обработка экспериментальных данных (первая часть)

1. Найдите мольные доли этанола в кубе x_W и в дистилляте x_P.

Для этого по равновесным данным для смеси этанол–вода постройте $T - x,y$ диаграмму и по температуре кипения жидкости в кубе T_W определите x_W.

Пересчитайте определённую раннее массовую долю этанола в дистилляте в мольную долю по формуле:

$$x_P = \frac{\overline{x}_P / M_{НК}}{\overline{x}_P / M_{НК} + (1 - \overline{x}_P) / M_{ВК}}. \qquad (5.23)$$

2. Постройте рабочую линию процесса ректификации на диаграмме $y - x$.

Следует отметить, что лабораторная установка (как все установки периодической ректификации) не имеет нижней (исчерпывающей) части. Можно считать, что её роль играет куб-кипятильник, разделяющим действием которого пренебрегать (как это приближённо делают при расчёте непрерывной ректификации) нельзя, поскольку в данном случае вклад кипятильника в процесс разделения достаточно велик.

Образующийся в кубе-кипятильнике пар находится в состоянии равновесия с кипящей кубовой жидкостью $y_W = y_W^*$. В этом случае разделяющее действие куба-кипятильника можно учесть, построив на диаграмме

одну теоретическую ступень разделения. При этом состав выходящей из колонны и входящей в куб-кипятильник жидкости можно условно обозначить как $x_F = x_{вых}$, а состав покидающего куб-кипятильник пара – как $y_F = y_{вых}$.

Рассчитав по формуле (5.8) длину отрезка B и отложив его на вертикальной оси, постройте рабочую линию верхней (укрепляющей) части колонны в интервале составов от x_F до x_P (см. рис. 5.5).

3. Определите минимальное флегмовое число по уравнению (5.9), подставив в него найденное в предыдущем пункте значение x_F и определённое по графику равновесное ему значение y_F^*. Определите значение коэффициента избытка флегмы β, выразив его из уравнения (5.10).

4. Определите значение общего числа единиц переноса по концентрациям в паровой фазе. Для этого постройте график, отложив по горизонтальной оси y, а по вертикальной оси $\frac{1}{y^* - y}$. Значения y^* и y определите по диаграмме y–x в интервале от y_F до y_P (см. пункт 2). Общее число единиц переноса по паровой фазе будет численно равно площади полученной криволинейной трапеции. Проведите численное интегрирование (см. рис. 5.6).

Определите высоту единицы переноса, разделив высоту насадки на число единиц переноса по уравнению (5.18).

5. Определите мольный расход дистиллята по уравнению (5.19).

6. Определите мольный расход паровой фазы по формуле (5.13) и найдите коэффициент массопередачи по уравнению (5.17), рассчитав площадь поверхности массопередачи по уравнению (5.14) и приняв удельную поверхность насадки $a = 750\ м^2/м^3$.

7. Определите число теоретических ступеней графическим построением ступеней между рабочей линией и равновесной в интервале x_P–x_F. Рассчитайте высоту теоретической ступени, по уравнению (5.20):

Результаты измерений и расчётов сведите в табл. 5.1

Таблица 5.1

Экспериментальные и расчётные величины

Экспериментальные данные	
Флегмовое число R	
Температура кипения кубовой жидкости t_W, °С	
Объём дистиллята V_P, см^3	
Время сбора дистиллята t, с	
Плотность дистиллята ρ_P, кг/м^3	
Результаты расчёта	
Состав кубовой жидкости x_W, мол. доли	
Состав дистиллята x_P, мол. доли	
Молярная масса дистиллята M_P, кг/кмоль	
Мольный расход дистиллята P, кмоль/с	
Мольный расход паровой фазы $P\cdot(R+1)$, кмоль/с	
Состав жидкой фазы на входе в куб-кипятильник x_F, мол. доли	
Минимальное флегмовое число R_{min}	
Коэффициент избытка флегмы β	
Число единиц переноса N_{Oy}	
Высота единицы переноса h_{Oy}, м	
Площадь поверхности массопередачи A, м^2	
Коэффициент массопередачи K_y, $\dfrac{\text{кмоль НК}}{\text{м}^2\cdot\text{с}\cdot\dfrac{\text{кмоль НК}}{\text{кмоль пара}}}$	
Число теоретических ступеней N_T	
Высота теоретической степени h_T, м	

Обработка экспериментальных данных (вторая часть)

Как указано выше, отбор дистиллята проводится до температуры кипения в кубе, соответствующей заданной величине конечной концентрации НК в кубовой жидкости (x_{WK}). Приближённо можно считать, что положение рабочей линии, построенной на диаграмме $y-x$ в первой части работы соответствует концентрации дистиллята в нулевой момент времени. Для численного интегрирования правой части уравнения (5.22) необходимо иметь несколько значений концентраций НК в дистилляте и в кубовой жидкости (x_{Pi} и x_{Wi}). Для этого проводят ряд рабочих линий, парал-

лельных рабочей линии, взятой из первой части работы. Точка пересечения *i*-й линии с диагональю соответствует x_{Pi}. Построив от x_{P1}, определённой в первой части работы, рабочую линию, определяют по ней число теоретических ступеней N_T, а по величине $N_T + 1$ получают x_{W1}. Для расчёта x_{PK} (конечной концентрации НК в дистилляте) необходимо провести несколько вариантов таких параллельных линий. Значение x_{PK} будет соответствовать точке пересечения той линии, для которой число теоретических ступеней построенных между ней и равновесной кривой, будет равно $N_T + 1$ (в интервале $x_{PK} - x_{WK}$). Определённые пары концентраций занесите в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Данные для интегрирования по уравнению (5.23)

x_P	x_{P1}	x_{P2}	….	x_{PK}
x_W	x_{W1}	x_{W2}	….	x_{WK}

После определения x_{PK} необходимо провести проверку принятой величины x_{WK}. Конечная концентрация НК в кубе должна соответствовать неравенству:

$$x_{WK} < \frac{(R+1)\cdot y^*(x_{вых}) - x_{PK}}{R}. \qquad (5.24)$$

Поскольку система уравнений (5.21) – (5.22) построена на принципе равенства количества НК, испарённого из куба, количеству НК, поступившему в дистиллят, требуется учёт всех теоретических ступеней, участвующих в процессе разделения, т. е. $N_T + 1$.

По данным табл. 5.2 проведите численное интегрирование правой части уравнения (5.22). По уравнению (5.22) найдите W_K, затем из уравнения 5.21 определите величину среднего состава дистиллята.

Экспериментальное значение средней концентрации этанола в дистилляте рассчитайте из значений концентраций, определённых в первой пробе и в основном объёме дистиллята.

$$x_{Pср.эксп} = \frac{\rho_1 \cdot V_1 \cdot x_{P1} + \rho_2 \cdot V_2 \cdot x_{Pосн}}{\rho_1 \cdot V_1 + \rho_2 \cdot V_2}, \qquad (5.25)$$

где x_{P1} – концентрация НК в первой пробе, мол. доля; $x_{Росн}$ – концентрация НК в основном объёме дистиллята; V_1 – объём бюретки, м^3; V_2 – основной объём дистиллята, м^3; ρ_1 и ρ_2 – плотности жидкости в бюретке и в основном объёме дистиллята, кг/м^3.

Сравните теоретически и экспериментально найденные средние концентрации НК в дистилляте и определите погрешность теоретического расчёта.

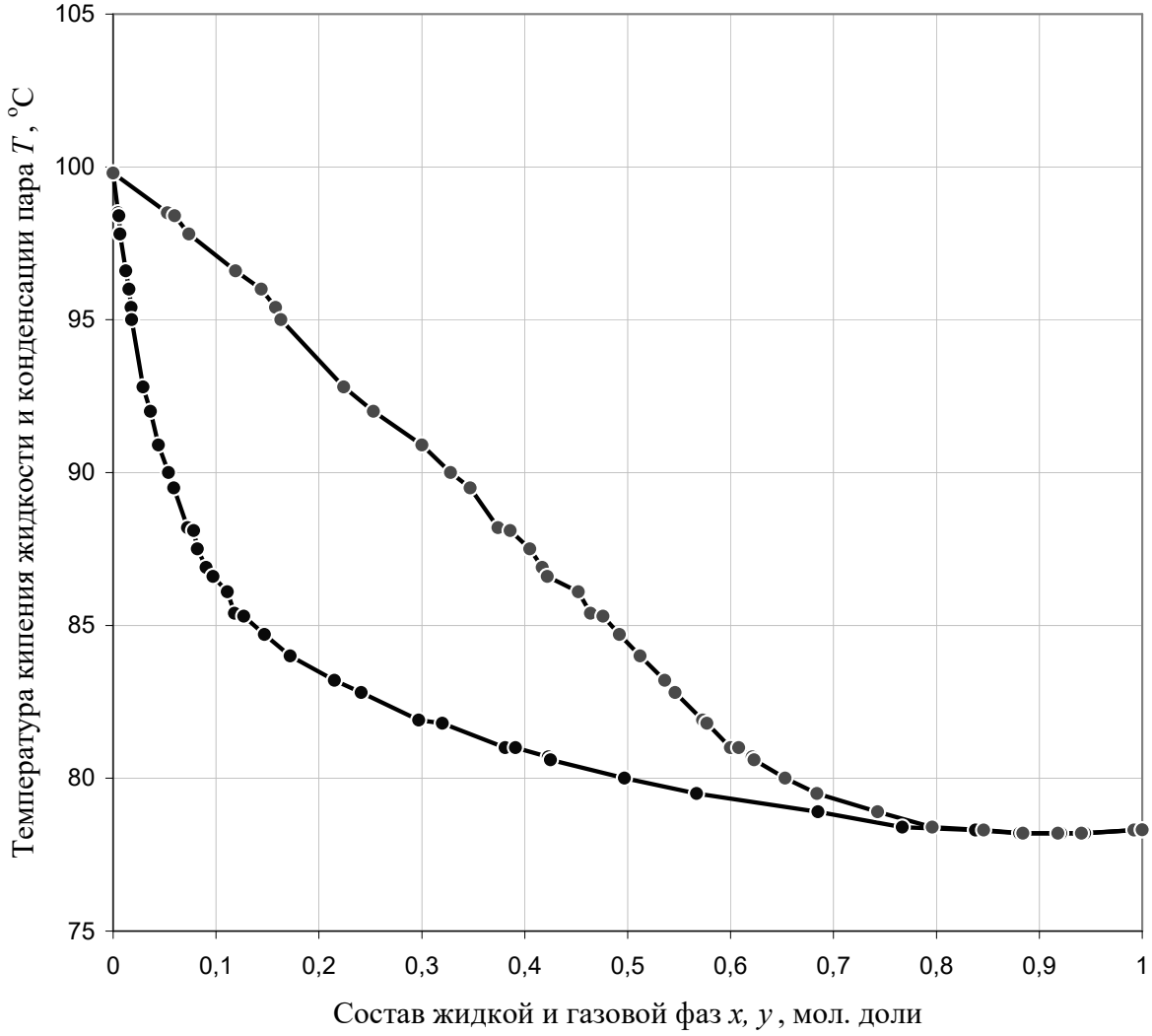

Рис. 5.3. Диаграмма $T – x,y$ для смеси этанол-вода

Таблица 5.3.

Равновесные составы для смеси этанол - вода

Состав жидкой фазы *x*, мол. доля	Состав газовой фазы *y*, мол. доля	Температура *T*, °C
0	0	99,8
0,005	0,0528	98,5
0,0056	0,0597	98,4
0,0067	0,0736	97,8
0,0124	0,119	96,6
0,0155	0,144	96
0,0175	0,158	95,4
0,018	0,163	95
0,0292	0,224	92,8
0,0363	0,253	92
0,044	0,3	90,9
0,0538	0,328	90
0,0589	0,347	89,5
0,0725	0,374	88,2
0,0782	0,386	88,1
0,082	0,405	87,5
0,0905	0,417	86,9
0,097	0,422	86,6
0,111	0,452	86,1
0,118	0,464	85,4
0,127	0,476	85,3
0,147	0,492	84,7
0,172	0,512	84
0,215	0,536	83,2
0,241	0,546	82,8
0,297	0,573	81,9
0,32	0,577	81,8
0,381	0,6	81
0,391	0,608	81
0,423	0,621	80,7
0,425	0,623	80,6
0,497	0,653	80
0,567	0,684	79,5
0,685	0,743	78,9
0,767	0,796	78,4
0,838	0,846	78,3
0,881	0,884	78,2
0,921	0,918	78,2
0,944	0,941	78,2
0,993	0,992	78,3
1	1	78,31

Рис. 5.4. Плотность водных растворов этанола в зависимости от состава.

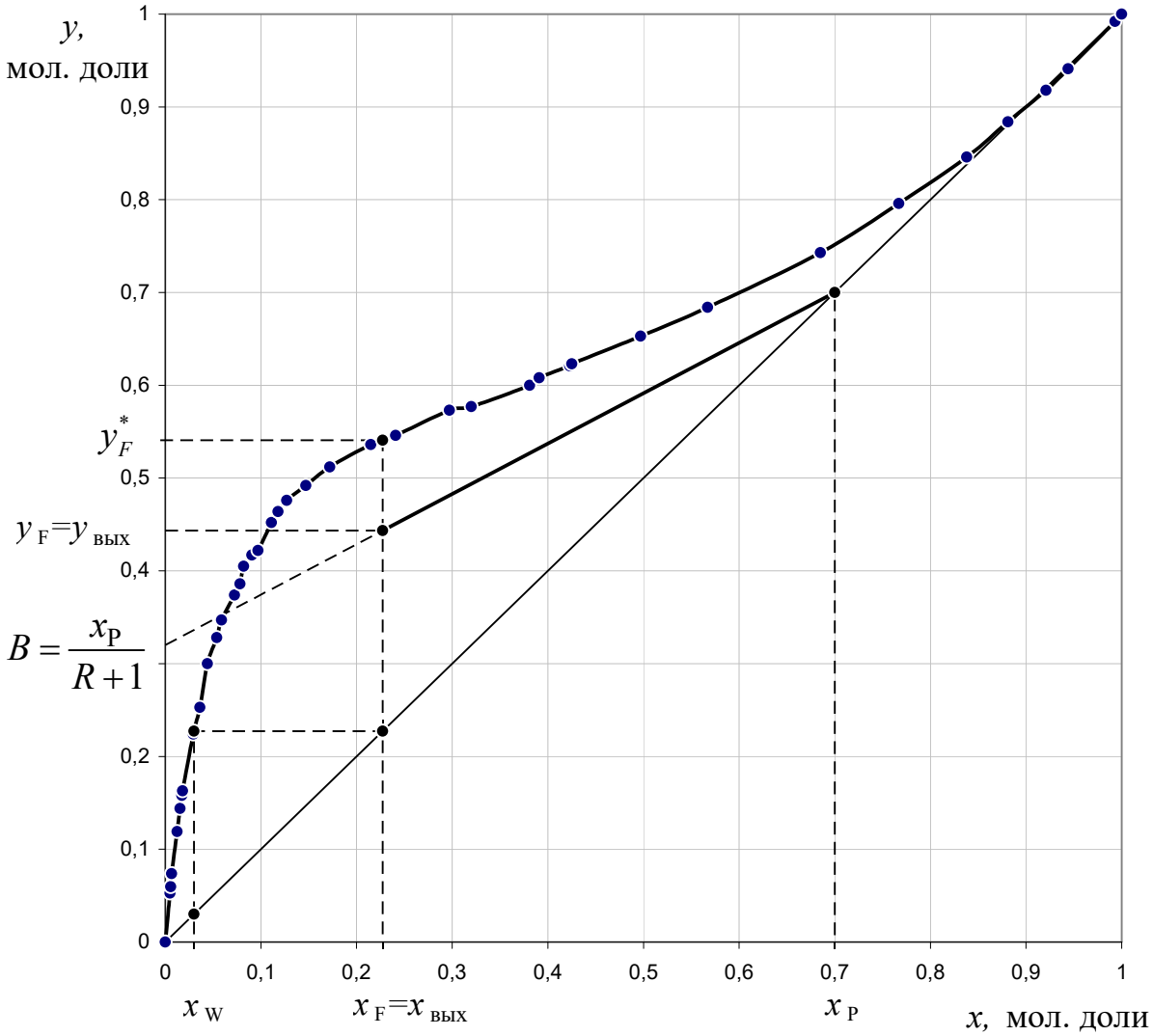

Рис. 5.5. Построение рабочих линий на диаграмме *y* - *x* для смеси этанол-вода

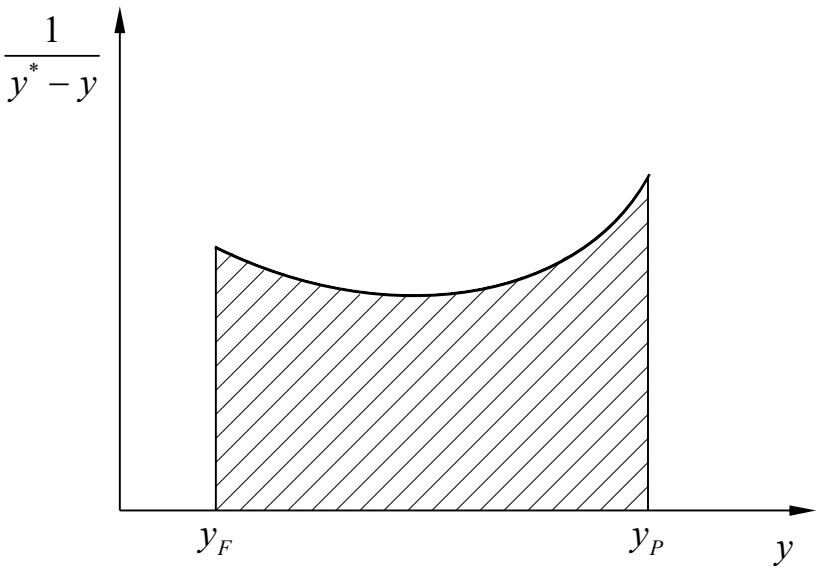

Рис. 5.6. Определение числа единиц переноса графическим интегрированием

Контрольные вопросы

1. В чём заключается физическая сущность процесса ректификации? Что является его движущей силой?
2. Что такое флегмовое число ректификационной колонны? Как рассчитывают его минимальное значение?
3. Понятие единицы переноса и теоретической ступени разделения (тарелки). Что называют высотой единицы переноса (ВЕП) и высотой, эквивалентной теоретической ступени (ВЭТС)?
4. Дайте определение эффективности тарелки по Мерфри. Как его используют при построении кинетической линии?
5. Какие допущения принимают при анализе работы ректификационной колонны?
6. Выведите уравнения рабочих линий для верхней (укрепляющей) и нижней (исчерпывающей) частей колонны. Какое из этих уравнений применяется в данной работе?
7. Пределы изменения флегмового числа и его влияние на положение рабочей линии.
8. Сравните установки периодической ректификации и простой перегонки. В чём их принципиальное отличие?
9. Какие два основных режима проведения периодической ректификации известны? Какой из этих режимов используется при проведении данной лабораторной работы?
10. Как изменяется во времени состав дистиллята, если периодическую ректификацию проводить при постоянном флегмовом числе?
11. Каково предельное значение концентрации этанола в дистилляте при проведении данной лабораторной работы? Каковы теоретические условия его достижения?
12. В каких единицах рассчитывается коэффициент массопередачи в данной работе? Чем обусловлен выбор этих единиц?