

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Т. Ф. ГОРБАЧЕВА»**

**Кафедра энергоресурсосберегающих процессов
в химической и нефтегазовой технологиях**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО РАВНОВЕСИЯ
В СИСТЕМЕ «ПАР – ЖИДКОСТЬ» БИНАРНОЙ СМЕСИ**

Методические указания к лабораторной работе № 3 по дисциплине
«Процессы и аппараты химической технологии»
для обучающихся направлений подготовки
18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы
в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии,
18.03.01 Химическая технология,
20.03.01 Техносферная безопасность
всех форм обучения

Составители Н. В. Тиунова
Н. Н. Изотов
П. Т. Петрик
Г. С. Михайлов

Рассмотрены и утверждены
на заседании кафедры
Протокол № 2 от 09.10.2018
Рекомендованы к печати
учебно-методической комиссией
направления подготовки 18.03.02
Протокол № 2 от 09.10.2018
Электронная копия находится
в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2018

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является экспериментальное исследование фазового равновесия в системе «пар – жидкость» бинарной смеси.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

С позиций классической термодинамики фазовое равновесие можно определить как динамическое равновесие, в котором при неизменных параметрах состояния отдельные части гетерогенной системы сохраняют неизменными свои свойства. Динамическое равновесие характеризуется равенством температуры фаз и числа молекул каждого компонента, переходящих из одной фазы в другую.

В состоянии равновесия система имеет совершенно определенные свойства – температуру, давление и составы фаз. Изменение любого из этих параметров вызывает отклонение от состояния равновесия. Например, увеличение температуры жидкости, находящейся в равновесии с паром, вызывает нарушение равновесия и появление движущей силы, обуславливающей увеличение числа молекул, переходящих из жидкости в пар, по сравнению с числом молекул, переходящих из пара в жидкость. Это будет продолжаться до тех пор, пока давление пара не станет равной величине, отвечающей новым условиям равновесия.

При экспериментальном исследовании фазового равновесия в системе «пар – жидкость» определяются состав, а также температура и давление равновесных фаз. На основе экспериментальных данных расчетным путем определяются коэффициенты относительной летучести и коэффициенты активности компонентов.

Рассмотрим условия фазового равновесия в двухкомпонентной парожидкостной системе, состоящей из компонентов А и В.

Число термодинамических параметров, характеризующих парожидкостное равновесие, определяется правилом фаз Гиббса:

$$\Phi + C = K + 2, \quad (1)$$

где Φ – количество фаз гетерогенной системы; K – количество компонентов, присутствующих в системе; C – число независимых

переменных, однозначно определяющих состояние фазового равновесия в системе.

Для двухкомпонентной парожидкостной системы число $C = 2$. В качестве независимых переменных можно принять одну из следующих комбинаций параметров: $y - x$, $x(y) - t$ или $x - p$, где x, y – молярные концентрации одного из компонентов в жидкости и в паре; t, p – температура и давление в системе. На практике равновесие определяется или при постоянном давлении или при постоянной температуре. Соответственно выбранным параметрам равновесные соотношения представляются в виде зависимостей $x - p$, $x(y) - t$ или $y - x$ (рис. 1).

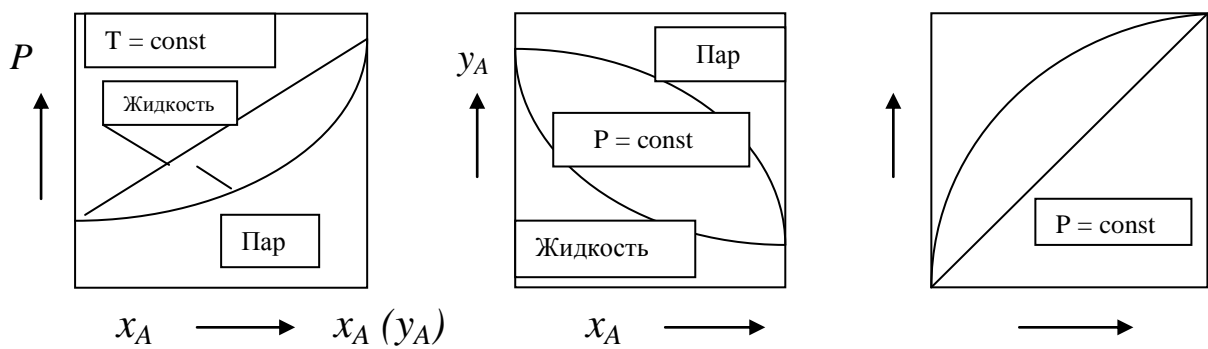


Рис. 1. Диаграммы равновесия
идеальной двухкомпонентной системы

Особенностью парообразного состояния вещества является значительно большее, чем в конденсированном состоянии, расстояние между молекулами и, как следствие этого, значительно меньшая интенсивность межмолекулярного взаимодействия. Благодаря этому к паровой фазе можно применять законы идеальных газов. Условия равновесия в системах с идеальной паровой фазой устанавливаются на основе закона Рауля

$$\begin{aligned} p_A &= P_A x_A, \\ p_B &= P_B x_B, \end{aligned} \quad (2)$$

где p_A, p_B – парциальные давления компонентов A и B в паровой фазе; P_A, P_B – давление насыщенных паров индивидуальных компонентов A и B при данной температуре; x_A, x_B – молярные доли компонентов A и B в жидкой смеси.

Если общее давление паров над жидкой смесью компонентов равно P , то в соответствии с законом Дальтона равновесные концентрации y_A , y_B компонентов A и B в паре составят

$$\begin{aligned} y_A &= \frac{p_A}{P}, \\ y_B &= \frac{p_B}{P}. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) позволяют установить связь между содержанием летучего компонента в паре и в жидкости. Подставив в уравнения (3) значения p_A и p_B из уравнений (2), получим

$$\begin{aligned} y_A &= \frac{x_A P_A}{P}, \\ y_B &= \frac{x_B P_B}{P}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для двухкомпонентной системы общее давление P равно сумме парциальных давлений p_A и p_B :

$$P = p_A + p_B = x_A P_A + (1 - x_A) P_B. \quad (5)$$

Примем, что компонент A при данном давлении имеет более низкую температуру кипения по сравнению с компонентом B и поэтому называется *низкокипящим* (*легколетучим*) компонентом. Соответственно компонент B назовем *высококипящим* (*труднолетучим*) компонентом бинарной смеси.

Подставив в уравнение (4) полученное значение P из уравнения (5), будем иметь

$$y_A = \frac{x_A P_A}{x_A P_A + (1 - x_A) P_B}. \quad (6)$$

Введем соотношение $\alpha = \frac{P_A}{P_B}$, называемое относительной летучестью компонентов A и B , в уравнение (6):

$$y_A = \frac{\alpha x_A}{\alpha x_A + (1 - x_A)}. \quad (7)$$

Из этой формулы, выражающей связь между составами равновесных фаз, следует, что $y_A > x_A$ при $\alpha > 1$; $y_A < x_A$ при

$\alpha < 1$. Если $\alpha = 1$, то $y_A = x_A$, т. е. сосуществующие фазы имеют одинаковый состав.

Уравнение (7) после преобразований можно представить в виде

$$\frac{y_A}{1 - y_A} = \alpha \frac{x_A}{(1 - x_A)}. \quad (8)$$

Из уравнения (8) следует, что для идеальных смесей относительное содержание легколетучего компонента A в паре в α раз больше его относительного содержания в жидкости.

Для неидеальных систем характерно отклонение от закона Рауля и законов идеальных газов. Отклонение системы от идеальной учитывается так называемым *коэффициентом активности*, характеризующим активность (подвижность) молекул в растворе и их взаимодействие. Коэффициенты активности для компонентов A и B могут быть определены как отношения

$$\gamma_A = \frac{p_A}{x_A P_A}, \quad (9)$$

$$\gamma_B = \frac{p_B}{x_B P_B}.$$

В неидеальных системах коэффициенты активности могут быть больше или меньше единицы. Значения γ_A , γ_B являются функцией давлений паров компонентов и их концентраций в растворе. Для компонента A $\gamma_A = 1$, если $x_A = 1$, т. к. чистые жидкости рассматриваются как идеальные растворы. В бинарной смеси по мере уменьшения концентрации x_A коэффициент активности γ_A увеличивается и достигает максимума при $x_A = 0$. Такая же зависимость наблюдается и для компонента B .

Введение понятия коэффициентов активности позволяет представить количественные соотношения между компонентами в паре и жидкости в следующем виде:

$$\gamma_A = \frac{p_A}{x_A P_A} = \frac{y_A P}{x_A P_A}. \quad (10)$$

$$\gamma_B = \frac{p_B}{x_B P_B} = \frac{y_B P}{x_B P_B}. \quad (11)$$

$$\frac{x_A P_A \gamma_A}{y_A} = \frac{x_B P_B \gamma_B}{y_B}. \quad (12)$$

$$\frac{x_A P_A \gamma_A}{y_A} + \frac{x_B P_B \gamma_B}{y_B} = 1. \quad (13)$$

$$\frac{y_A P}{\gamma_A P_A} + \frac{y_B P}{\gamma_B P_B} = 1. \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{\gamma_A P_A}{\gamma_B P_B}. \quad (15)$$

Таким образом, условия равновесия между жидкостью и паром в бинарной системе определяются значением коэффициента относительной летучести. Из выражения (15) видно, что коэффициент относительной летучести зависит от свойств чистых компонентов, учитываемых отношением P_A/P_B , а также от интенсивности взаимодействия молекул этих компонентов в растворе, учитываемой отношением γ_A/γ_B . Коэффициенты активности компонентов не могут изменяться произвольно, независимо друг от друга. Между изменениями γ_A и γ_B имеется термодинамически обусловленная связь [3]:

$$\int_0^1 \lg \frac{\gamma_A}{\gamma_B} dx_A = 0. \quad (16)$$

Уравнение (16) применяется для оценки погрешности экспериментальных данных о равновесии по методу Редлиха – Кистера.

Комбинируя уравнения (8) и (15), получим выражение, определяющее отношение коэффициентов активности компонентов:

$$\frac{\gamma_A}{\gamma_B} = \frac{y_A(1-x_A)P_B}{x_A(1-y_A)P_A}. \quad (17)$$

Принимая во внимание (17), уравнение (16) можно записать следующим образом:

$$\int_0^1 \lg \frac{y_A}{(1-y_A)} \frac{(1-x_A)P_B}{x_A P_A} dx_A = 0. \quad (18)$$

Отклонение интеграла (18) от нуля обусловлено главным образом погрешностями в определении составов равновесных

фаз, чаще всего состава паровой фазы. Такое положение встречается в случаях, когда для анализа отбирается очень малое количество паровой фазы.

Проверка опытных данных по методу Редлиха – Кистера производится следующим образом. На основании экспериментальных данных по уравнению (17) рассчитываются значения γ_A/γ_B . По полученным данным строится кривая зависимости $\lg \gamma_A/\gamma_B$ от x_A и путем графического (численного) интегрирования определяется величина отклонения ΔI от нуля интеграла (16). В зависимости от величины погрешности в определении состава пара расчетное значение интеграла Редлиха – Кистера, равное ΔI , может колебаться в широких пределах. Например, ошибка в определении состава пара на уровне 0,5...1,0 % значения ΔI составляет $\pm(0,01...0,03)$.

Для иллюстрации метода Редлиха – Кистера на рис. 2 приведены результаты проверки опытных данных о равновесии в системе этиловый спирт – вода. На рис. 2 представлена зависимость $\lg \gamma_{ei}/\gamma_{Bi}$ от x_{wi} по данным равновесных составов, приведенных в Приложении А. Затем путем графического интегрирования определяются площади, ограниченные кривой $\lg \gamma_{ei}/\gamma_{Bi} = f(x)$ и осями координат. Согласно уравнению (16) алгебраическая сумма площадей ABC и CDE должна быть равна нулю. Однако при экспериментальном исследовании могли быть допущены погрешности при определении всех величин, входящих в уравнение (18). Площадь ABC составляет 2210 единиц, а площадь CDE – 2110 единиц. Следствием этого является отклонение значения интеграла от нуля на величину 0,047. Такую погрешность можно считать вполне приемлемой при исследовании фазового равновесия в системе пар – жидкость.

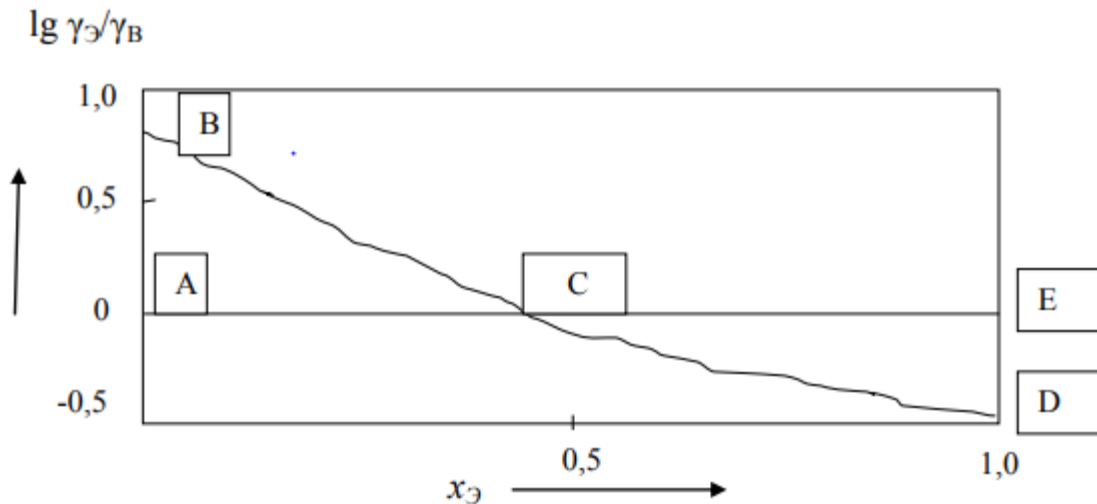


Рис. 2. Проверка данных о равновесии между жидкостью и паром по методу Редлиха – Кистера (система этанол – вода [2])

3. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

На экспериментальной установке при температурах кипения смеси этиловый спирт – вода различного состава и атмосферном давлении определяются равновесные концентрации компонентов в паровой и жидкой фазах. По результатам экспериментальных данных рассчитываются коэффициенты относительной летучести смесей и коэффициенты активности компонентов. Дается оценка погрешности в определении составов равновесных фаз.

По литературным данным (приложение А) производится построение изобар равновесного состава $y - x$ и $t - x(y)$ с нанесением точек, характеризующих составы фаз, полученных в результате экспериментальных исследований.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

В настоящей работе при исследовании парожидкостного равновесия используется метод однократного испарения, называемый также дистилляционным. Согласно данному методу из смеси жидких компонентов при температуре кипения отгоняется небольшое (по сравнению с массой этой смеси) количество жидкости, образующиеся пары отводятся из отгонной части аппарата и направляются в холодильник-конденсатор. В полученной пробе конденсата определяются концентрации компонентов.

На рис. 3 приведена схема дистилляционной установки для исследования равновесия между жидкостью и паром бинарной смеси. Установка состоит из следующих основных элементов: кипятильника (куб) *1*, в котором происходит кипение бинарной смеси путем нагрева ее с помощью электронагревателя *5*; разделительной колонки *2*, в которой обеспечивается отделение (сепарация) капелек жидкости, увлекаемых за собой поднимающимся вверх насыщенным паром; трубчатого конденсатора *3*, охлаждаемого водой; сборника *8* и запорного вентиля *15*, необходимого для сбора конденсата на анализ; гидрозатвора *10* и открытых вентилей *12*, *13*, *14* для поддержания давления в аппарате, равного атмосферному, и исключения утечки пара из системы.

Измерение температуры кипящей бинарной смеси $t_{жс}$ в кипятильнике производится термометром *11*. С целью исключения конденсации насыщенного пара на стенках разделительной колонки последняя снабжена электронагревателем *4* с автотрансформатором *6* для регулирования напряжения.

Установка работает следующим образом. В куб *1* загружается исходная смесь жидких компонентов и нагревается до кипения. Из кипятильника *1* пары кипящей бинарной смеси проходят в разделительную колонку *2* и поступают в трубчатый конденсатор *3*. Образовавшийся конденсат стекает из конденсатора и накапливается в сборнике *8*. Из сборника *8* конденсат через запорный вентиль *15* отбирается в сборник *9*. Из сборника *9* берется проба конденсата на анализ. Точность получаемых результатов зависит от скорости проведения процесса и количества отбираемых проб конденсата. Она тем выше, чем с меньшей скоростью происходит процесс испарения бинарной смеси, и чем меньшее количество конденсата отбирается на пробу. По этой причине интенсивность кипения смеси, регулируемая изменением напряжения электронагревателя *5* кипятильника, устанавливается такой, чтобы количество конденсата, поступающего при этом в сборник *8*, было не более 1 капли в секунду. Объем отбираемых проб конденсата не должен превышать 20 мл.

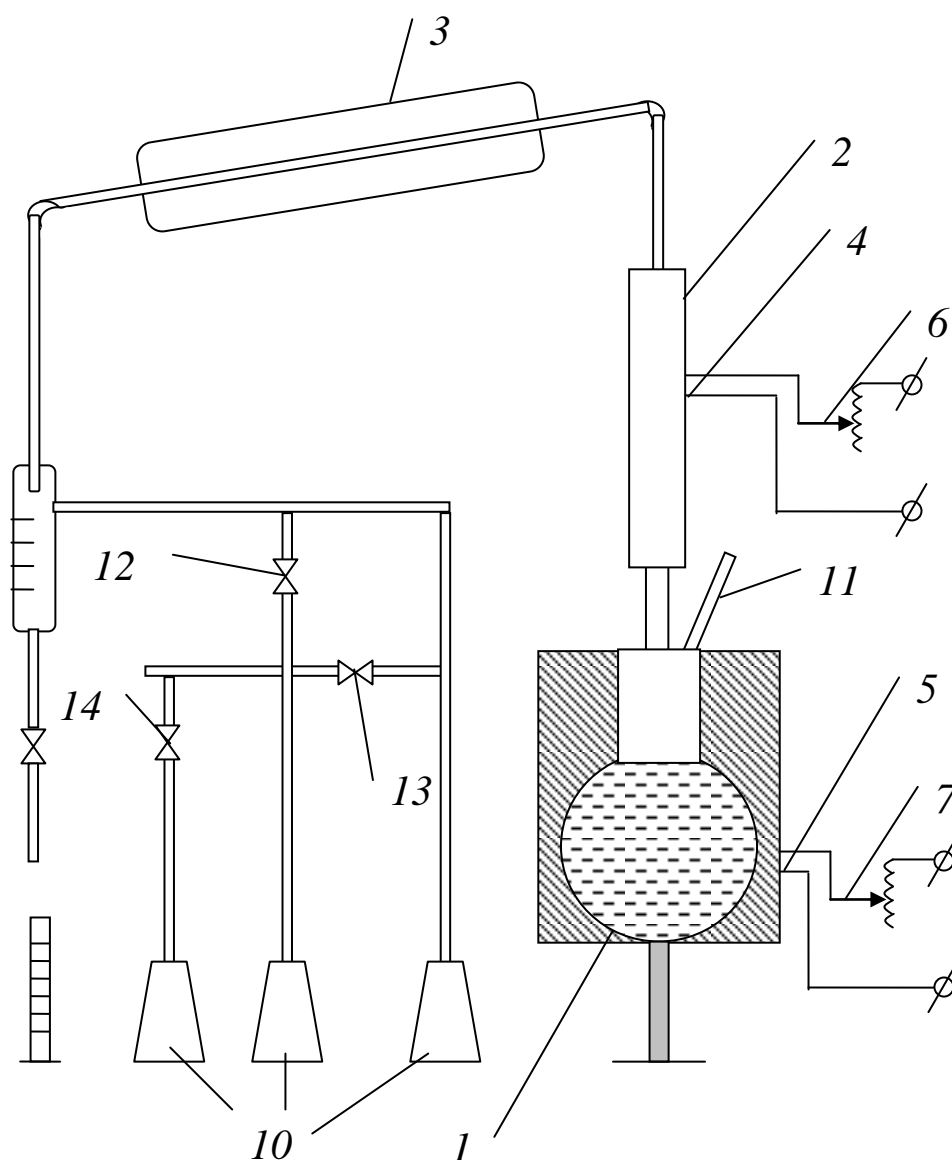


Рис. 3. Схема установки для исследования равновесия между жидкостью и паром бинарной смеси: 1 – кипятыльник; 2 – разделительная колонка; 3 – конденсатор; 4, 5 – кипятыльник; 6, 7 – автотрансформаторы; 8 – сборник конденсата; 12, 13, 14, 15 – запорные вентили; 9 – мерный цилиндр; 10 – гидрозатворы; 11 – термометр

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Приготовить смесь этилового спирта и воды в количестве $450\text{--}500\text{ см}^3$ с содержанием спирта 15–18 %.
2. Определить начальную концентрацию спирта в смеси.
3. Включить установку.
4. Загрузить приготовленную смесь в кипятильник 1 и включить нагреватели 4 и 5. Установить напряжение $U = 150\text{ В}$ на нагревателе 4 автотрансформатором 6 и напряжение $U = 120\text{ В}$ на нагревателе 5 автотрансформатором 7.
5. При достижении температуры бинарной смеси 60–65 °С установить автотрансформатором 7 напряжение $U = 90\text{ В}$ на нагревателе 5.
6. В момент поступления конденсата в сборник зафиксировать время и температуру смеси в кипятильнике.
7. Для отбора проб на анализ обеспечить заполнение конденсатором сборника 8 в объеме не более 20 мл, открыть вентиль 15 и слить конденсат в колбу.
8. Определить объем конденсата с помощью мерного цилиндра 9.
9. С помощью рефрактометра определить угол преломления n и затем по тарировочной кривой (Приложение С) определить массовую концентрацию спирта в конденсате.
10. Записать в журнал наблюдения (Приложение Б) объем взятой пробы, температуру смеси в кипятильнике, массовую концентрацию этилового спирта в конденсате.
11. Производить отбор и анализ проб конденсата до тех пор, пока температура смеси в кипятильнике не достигнет 99,5 °С.
12. По окончании работы выключить приборы и установку из сети.
13. Заполнить журнал наблюдений (таблица 1) согласно приложению Б.

6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Обработка данных каждого опыта, завершающегося отбором порции конденсата, выполняется в порядке, представленном ниже.

1. Рассчитывается плотность жидкой смеси спирта и воды в i -й пробе конденсата $\rho_{см}$, кг/м³.

$$\frac{1}{\rho_{см}} = \frac{\bar{x}_{ki}}{\rho_{э}} + \frac{(1 - \bar{x}_{ki})}{\rho_{в}},$$

где $\rho_{э}$ – плотность этилового спирта, кг/м³; $\rho_{в}$ – плотность воды, кг/м³ (данные взять в приложении В).

2. Определяется масса i -й пробы конденсата G_{ki} , кг

$$G_{ki} = \rho_{см} V_i.$$

3. Определяется масса исходной смеси в кубе G_{w0} , кг

$$G_{w0} = \rho_{см} V_0.$$

4. Рассчитывается массовая концентрация этанола в кубе после отбора i -й пробы конденсата, \bar{x}_{wi}

$$\bar{x}_{wi} = \frac{G_{w0} \bar{x}_{w0} - \sum G_{ki} \bar{x}_{ki}}{G_{w0} - \sum G_{ki}}.$$

5. Выполняется пересчет массовых концентраций этанола в молярные концентрации

$$x_{wi} = \frac{\bar{x}_{wi} / M_A}{\bar{x}_{wi} / M_A + (1 - \bar{x}_{wi}) / M_B}.$$

$$y_{ki} = \frac{\bar{x}_{ki} / M_A}{\bar{x}_{ki} / M_A + (1 - \bar{x}_{ki}) / M_B},$$

где M_A – молярная масса этилового спирта; M_B – молярная масса воды.

6. По данным Приложения Г определяется давление насыщенного пара воды при температуре кипения смеси в кубе P_{Bi} , мм рт. ст.

7. Рассчитывается давление насыщенного пара этилового спирта при кипении смеси в кубе $P_{эi}$, мм рт. ст.

$$\lg P_{эi} = 12,36 - \frac{4922}{t_{wi} + 441}.$$

8. Рассчитывается коэффициент активности для этанола $\gamma_{эi}$

$$\gamma_{эi} = \frac{y_{ki}P}{x_{wi}P_{э}}.$$

9. Рассчитывается коэффициент активности для воды γ_{Bi}

$$\gamma_{Bi} = \frac{y_{ki}P}{(1 - x_{wi})P_B}.$$

10. Определяется коэффициент относительной летучести спирта для смесей различного состава $\alpha = \frac{\gamma_{э}P_{э}}{\gamma_B P_B}$.

Результаты расчета по пунктам 1–10 заносятся в таблицу 2 приложения Б. Далее выполняются следующие операции:

– производится построение изобар равновесных составов $y - x$, $x(y) - t$ по данным Приложения А с нанесением точек, характеризующих составы, полученных в результате экспериментальных исследований.

– на основании экспериментальных данных рассчитывается соотношение $\gamma_{эi} / \gamma_{Bi}$ для каждого опыта.

– строится кривая¹ зависимости $\lg \gamma_{эi} / \gamma_{Bi}$ от x_{wi} и путем графического интегрирования определяется величина отклонения ΔI от нуля интеграла (18).

7. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. – Москва: Альянс, 2014. – 753 с.

2. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – Москва: Альянс, 2005. – 576 с.

¹ Примечание: Значения коэффициентов активности в области высоких концентраций этанола ($x > 0,4$) рекомендуется принять по данным Приложения А.

8. ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ

При проведении экспериментальных исследований необходимо соблюдать правила пожаро- и электробезопасности. Экспериментальная установка должна находиться в исправном состоянии. Все токоведущие элементы должны иметь надежную электроизоляцию. В случае любой неисправности или возгорания установку необходимо отключить от электросети.

9. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет оформляется на листах бумаги формата А4 и должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) краткое изложение теоретических положений;
- 3) принципиальную схему экспериментальной установки;
- 4) порядок выполнения работы;
- 5) таблицы измеренных и рассчитанных величин;
- 6) изобары равновесных составов $y - x$, $x(y) - t$;
- 7) оценку погрешности результатов исследований по методу Редлиха – Кистера;
- 8) анализ результатов и выводы.

10. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что означает понятие «парожидкостное равновесие»?
2. В чем заключается отличие идеальных систем от неидеальных?
3. При каких определяющих параметрах производится построение диаграмм равновесных составов?
4. Как осуществляется построение изобары равновесных составов $x(y) - t$?
5. Дать определение понятиям «относительная летучесть», «коэффициент активности».
6. Какие существуют количественные соотношения между компонентами в паре и жидкости в состоянии равновесия?
7. Как можно оценить погрешность в определении составов равновесных фаз?

8. Назовите основные операции, выполняемые при проведении экспериментальных исследований.
9. Выполните преобразование формулы (7) в формулу (8).
10. Как изменяется коэффициент активности при изменении состава раствора?
11. Какие параметры при исследовании парожидкостного равновесия определяются расчетным путем?

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

Экспериментальные данные по фазовому равновесию в системе
этиловый спирт – вода (по данным [2]); $P = 760$ мм рт. ст.

Молярная доля этанола в жидкой фазе $x_{\text{Э}}$	Молярная доля этанола в паровой фазе $y_{\text{Э}}$	Температура кипения жидкой сме- си этанол- вода t , °C	Коэффици- ент актив- ности этило- вого спирта в жидкой фазе $\gamma_{\text{Э}}$	Коэффици- ент активно- сти воды в жидкой фазе $\gamma_{\text{В}}$
0,00	0,00	100,0	-	1,0
0,0028	0,032	99,3	5,34	1,0
0,0144	0,135	96,0	4,91	1,01
0,0222	0,186	94,8	4,55	1,01
0,0302	0,231	93,5	4,30	1,01
0,0519	0,318	90,5	3,90	1,02
0,0871	0,406	87,2	3,32	1,05
0,126	0,468	85,4	2,86	1,05
0,172	0,505	84,0	2,34	1,09
0,206	0,530	83,4	2,12	1,10
0,255	0,552	82,3	1,88	1,16
0,321	0,586	81,4	1,72	1,2
0,405	0,614	80,9	1,38	1,33
0,449	0,633	80,2	1,31	1,41
0,506	0,661	80,0	1,23	1,46
0,545	0,673	79,5	1,18	1,58
0,663	0,733	78,8	1,09	1,78
0,735	0,776	78,5	1,06	1,91
0,804	0,815	78,4	1,02	2,16
0,917	0,906	78,3	0,99	2,64

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Журнал наблюдений

Дата и время начала эксперимента _____

Температура в помещении t , °C _____

Барометрическое давление, мм рт. ст. _____

Объем смеси, загруженной в кипятильник, V_0 , м³ _____

Массовая концентрация этилового спирта

в исходной смеси \bar{x}_{w0} _____

Время начала поступления конденсата в сборник _____

Таблица 1

№ пробы конденсата	Температура кипящей смеси в кипятильнике t_{wi} , °C	Объем пробы конденсата V_i м ³	Угол преломле- ния по рефрак- тометру, m_i	Массовая концен- трация спирта в про- бе конденсата \bar{x}_{ki} , %
1				
i				
n				

Таблица 2

Расчетные значения параметров

	Определяемые параметры и их размерности	Обо- значе- ние пара- метров	Численные значения параметров в i -м опыте					
			1	2	...	i	...	n
1.	Плотность воды при температуре в помещении лаборатории, кг/м ³	ρ_v						
2.	Плотность этилового спирта при температуре в помещении лаборатории, кг/м ³ , кг/м ³	ρ_{ε}						
3.	Плотность смеси этанол+вода в пробе конденсата, кг/м ³	$\rho_{см}$						
4.	Масса i -й пробы конденсата, кг	G_{ki}						
5.	Масса смеси этанол+вода, загружаемой в куб, кг	G_{w0}						
6.	Массовая концентрация этилового спирта в кубе после отбора i -й пробы конденсата, %	\bar{x}_{wi}						
7.	Молярная концентрация этилового спирта в кубовой жидкости после отбо-	x_{wi}						

	Определяемые параметры и их размерности	Обо- значе- ние пара- метров	Численные значения параметров в i -м опыте					
			1	2	...	i	...	n
	ра i -й пробы конденсата, %							
8.	Молярная концентрация этилового спирта в паре, равновесная составу жидкости в кубе \bar{x}_{wi} , %	y_{ki}						
9.	Давление насыщенного пара воды при температуре кипения смеси в момент отбора i -й пробы, мм рт. ст.	P_{Bi}						
10.	Давление насыщенного пара этилового спирта при температуре кипения смеси в момент отбора i -й пробы, мм рт. ст.	$P_{Эi}$						
11.	Коэффициент активности для этанола в жидкости, соответствующий составу x_{wi}	$\gamma_{Эi}$						
12.	Коэффициент активности для воды в жидкости, соответствующий составу $(1 - x_{wi})$	γ_{Bi}						
13.	Соотношение коэффициентов активности $\gamma_{Эi} / \gamma_{Bi}$							
14.	Коэффициент относительной летучести этанола и воды в смеси состава x_{wi}	α_i						

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(справочное)

Плотности чистого этилового спирта и воды
в зависимости от температуры

Компонент	Плотность вещества в жидком состоянии в зависимости от температуры (t , °C), кг/м ³					
	10	15	20	25	30	35
Этиловый спирт	797,9	793,7	789,5	785,0	781,0	776,7
Вода	999,7	999,1	998,2	997,0	995,6	994,0

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

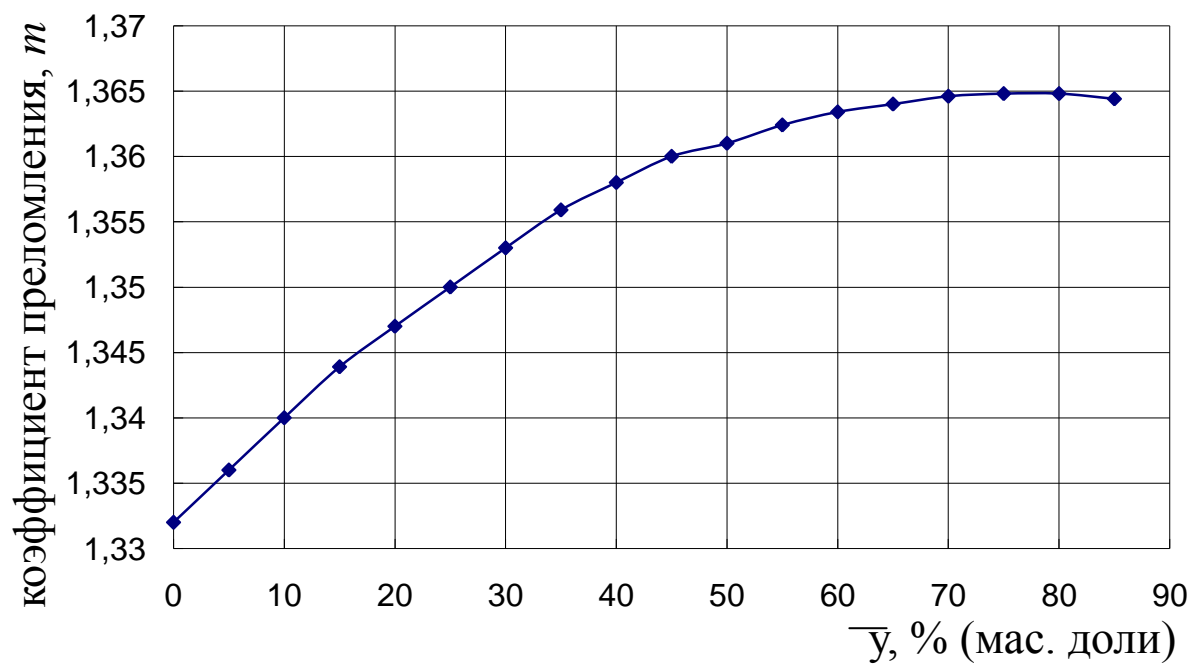
(справочное)

Давление насыщенного пара воды в зависимости от температуры

Температура t , °C	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
Давление, Па	38544	47343	57809	70101	84513	101325

ПРИЛОЖЕНИЕ С

Тарировочная кривая для определения массовой доли этанола в жидкой смеси этанол-вода по коэффициенту преломления ($t = 20 \pm 2$ °C)



Составители
Тиунова Наталья Владимировна
Изотов Николай Николаевич
Петрик Павел Трофимович
Михайлов Геннадий Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО РАВНОВЕСИЯ
В СИСТЕМЕ «ПАР – ЖИДКОСТЬ» БИНАРНОЙ СМЕСИ**

Методические указания к лабораторной работе № 3 по дисциплине

«Процессы и аппараты химической технологии»

для обучающихся направлений

18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы
в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии,

18.03.01 Химическая технология,

20.03.01 Техносферная безопасность
всех форм обучения

Печатается в авторской редакции

Рецензент Старикова Елена Юрьевна

Подписано в печать 06.11.2018. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Уч-изд. л. 1,0.

Тираж 35 экз. Заказ

КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Издательский центр УИП КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Бедного, 4а.