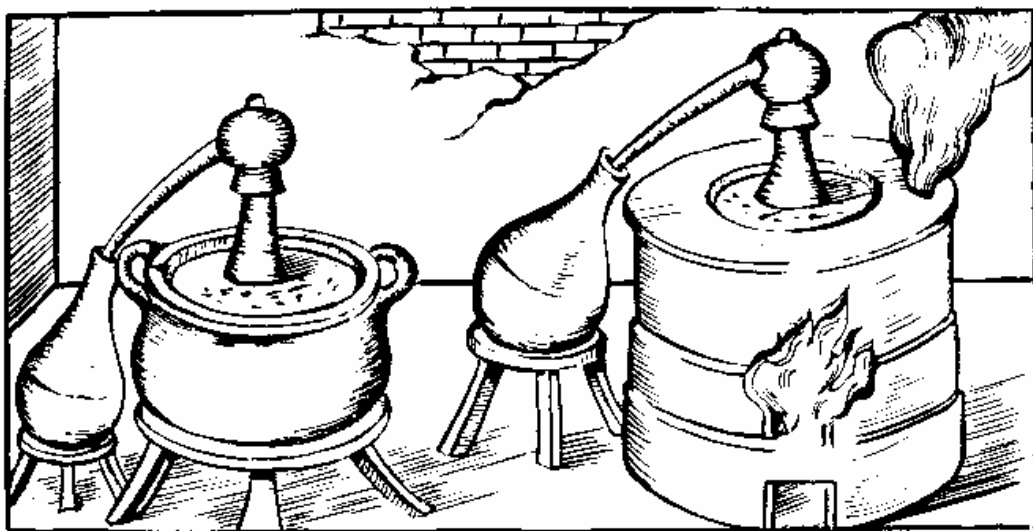


Кафедра процессов и аппаратов химической технологии

МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ. ДИСТИЛЛЯЦИЯ

Методические указания к лабораторной работе по курсу
«Процессы и аппараты»



Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный технологический университет
растительных полимеров»

В.С. Куров, Н.М. Мидуков, А.О. Никифоров

Массообменные процессы.

Дистилляция.

**Методические указания к лабораторной работе по курсу
«Процессы и аппараты».**

**Санкт-Петербург
2013**

УДК 621.184.64 (07)
ББК 31. 31р
К 492

Массообменные процессы. Дистилляция: методические указания к лабораторной работе по курсу «Процессы и аппараты»/ В.С.Куров, Н.П.Мидуков, А.О.Никифоров. СПбГТУРП.- СПб., 2013. – 23 с.: ил. 11.

В методических указаниях представлены историческая справка, теоретические основы и методы расчетов процесса дистилляции и свойства системы «этиловый спирт-вода».

Предназначены для студентов инженерно-экологического, технологического и механического факультетов, обучающихся по профилю «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» и «Химическое машино – аппаратостроение».

Рецензент:

профессор, декан инженерно-экологического факультета СПбГТУРП
Исянов Л.М.

Подготовлены и рекомендованы к печати кафедрой процессов и аппаратов химической технологии (протокол № 5 от 21.06.13г.)

Утверждены к изданию методической комиссией инженерно-экологического факультета (протокол № 2 от 10.10.13г.)

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом университета.

© Куров В.С., Мидуков Н.П., Никифоров А.О., 2013

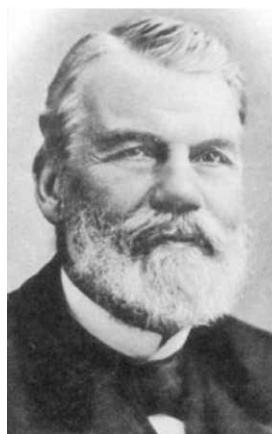
© Санкт-Петербургский государственный
технологический университет растительных
полимеров, 2013

Историческая справка

«... Теперь я перехожу к искусству. Я начну с перегонки, изобретения последнего времени, поразительного дела, хвала которому выше сил человеческих; не той перегонки, которой пользуются невежественные и неумелые люди, — они применяют ее, но только портят и разрушают добро; но той перегонки, которую выполняют искусные мастера... Внимай, любящий учение и желающий раскрыть секреты природы, проникнуть в них! Невежде никогда не познать искусства перегонки!».

Так писал в своей книге «Начала натуральной магии» знаменитый итальянский алхимик Делла Порта, живший на рубеже XVI и XVII веков.

И действительно, в 1589 г. процесс, которым сейчас владеет любой студент-химик, можно было считать искусством. Теории не существовало. Франсуа Мари Рауль еще не установил связь между парциальным давлением компонента и его мольной долей в жидкости. И профессор Санкт-Петербургского университета Дмитрий Петрович Коновалов тоже ещё не сформулировал свои законы, названные впоследствии его именем, и не создал теорию перегонки жидких смесей.



Франсуа Мари Рауль
(1830 - 1901)



Дмитрий Петрович Коновалов
(1856 - 1929)

Процесс перегонки, которую можно считать «бабушкой» современной ректификации (ректификация - от позднелат. *rectification* - прямление, исправление), имеет весьма солидный возраст. Древние греки умели отделять от вина спирт - *spiritus vini* - дух вина. В Поднебесной тоже были знакомы со спиртом, а значит, были знакомы с перегонкой.

Появление и развитие перегонки было связано с производством спирта и крепких алкогольных напитков.

На рис. 1 показана принципиальная схема процесса *простой* или, как её ещё называют, *фракционной*, перегонки. Исходная смесь (сырьё) загружается в перегонный куб и нагревается до *температуры начала кипения* $t_{нк}$. Образующиеся пары поступают в конденсатор-холодильник, где переходят в жидкое состояние, а затем охлаждаются. Образовавшийся *дистиллят* собирается порциями {*фракциями*) в сборники. Для квалифицирован-

ного управления процессом в куб вмонтирован термометр, с помощью которого можно отбирать фракции с заданными температурами выкипания. После завершения процесса в кубе остаётся продукт, который называют *кубовым остатком* или *кубовой жидкостью*. Итак, продуктами процесса простой перегонки являются дистиллят и кубовый остаток.

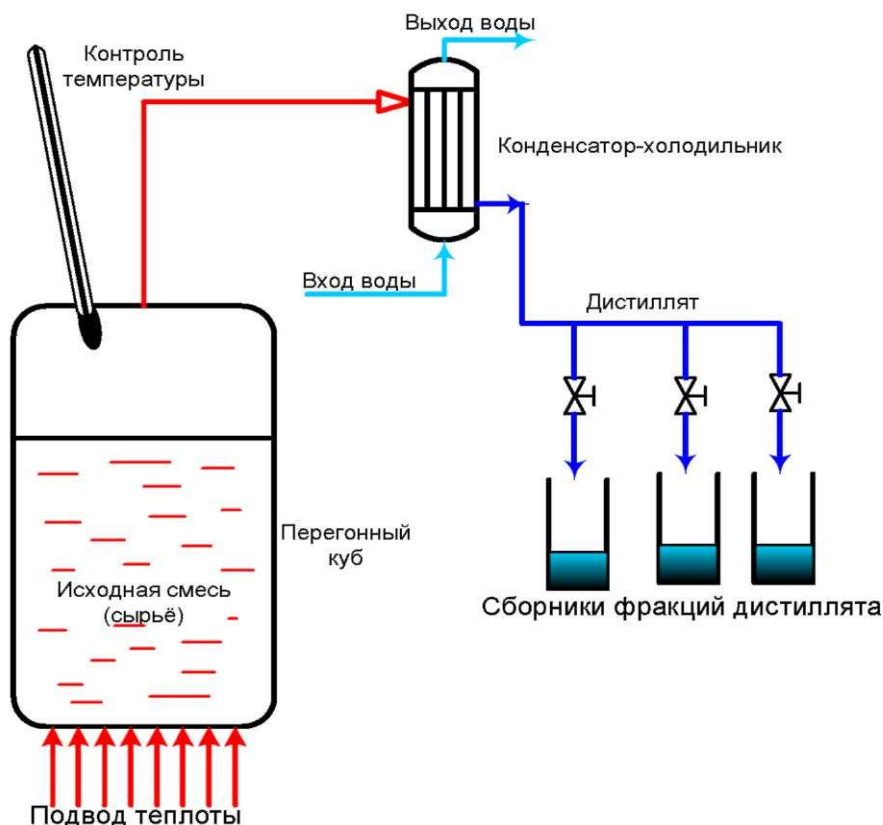


Рис.1. Схема установки для простой (фракционной) перегонки

Теоретическая справка

Прежде чем рассматривать теорию перегонки и ректификации, введём определения и обозначения.

В целях упрощения будем рассматривать разделение двухкомпонентной (бинарной) смеси. Из двух компонентов один будет иметь меньшую температуру кипения и, следовательно, большее давление пара. Его мы назовём низкокипящим компонентом (НКК). Второй компонент, температура кипения которого выше, а давление пара меньше, назовём высококипящим компонентом (ВКК).

Состав бинарной смеси будем выражать в мольных долях **НКК** и обозначать через x его концентрацию в жидкой фазе, а через y – концентрацию в паровой фазе.

Понятно, что концентрация второго компонента, ВКК, в жидкой фазе будет $(1-x)$, а в паровой – $(1-y)$.

Количество взятой на разделение смеси обозначим F , количество полученного дистиллята D , количество кубового остатка W .

Концентрацию НКК в исходной смеси обозначим x_F , его концентрацию в общем количестве полученного дистиллята x_D , а в кубовом остатке – x_W .

Теперь нам необходимо вспомнить раздел физической химии, посвященный равновесию между жидкостью и паром в бинарных системах (смесях).

В 1882 г. уже упоминавшийся нами французский физик и химик Франсуа Мари Рауль установил зависимость парциального давления компонента над раствором от его концентрации в жидкой фазе. Эта зависимость известна сегодня как закон Рауля.

Системы, которые подчиняются закону Рауля, называют идеальными. К ним можно отнести смеси, образованные изомерами или гомологами, т.е. веществами одного класса. Например, нефть и её фракции (бензиновая, керосиновая и т.д.) неплохо описываются законом Рауля. Для таких смесей можно рассчитать температуры начала и конца кипения при известных давлении и составе жидкости, состав равновесного пара над кипящей жидкостью и некоторые другие параметры.

Хуже обстоит дело с системами, образованными веществами различных классов и особенно содержащими в своём составе воду. Их называют неидеальными. Такие смеси могут показывать положительные отклонения от закона Рауля (фактическое давление пара оказывается больше теоретического), отрицательные (давление пара меньше теоретического) и знакопеременные.

Рассчитать параметры равновесия для таких смесей нельзя, приходится обращаться к справочникам с экспериментальными данными (наиболее часто проектировщики пользуются справочником В.Б. Когана, В.М. Фридмана, В.В. Кафарова. Равновесие между жидкостью и паром. -М-Л., «Наука», 1966 в двух томах.

Из всего многообразия неидеальных систем следует выделить наиболее сложные смеси, которые называют азеотропными (от греч. а - приставка, означающая отрицание или отсутствие чего-либо, зео - киплю и тропе - поворот, изменение) или нераздельнокипящие. В современном понимании термин «азеотропная смесь» означает такую жидкую смесь, при кипении которой образуется пар того же состава, что и кипящая жидкость. А разделение жидких смесей перегонкой основано как раз на отличии состава образующегося пара от состава исходной кипящей смеси. Следовательно, разделение азеотропных смесей перегонкой невозможно.

На рис. 2 показана классификация жидких смесей с точки зрения равновесия жидкостью и паром.

В нашей лабораторной работе мы изучаем разделение смеси этилового спирта и воды, которая относится к классу азеотропных.

Теперь посмотрим на график зависимости температур кипения и

конденсации (график изобар), рис. 3.



Рис. 2. Классификация жидких смесей по их подчинению закону Рауля

Итак, взятая исходная смесь в количестве F *ас* концентрацией НКК x_F нагревается до температуры кипения t_{HK} . При кипении образуется пар состава y_D , который после конденсации превращается в жидкий дистиллят с концентрацией НКК x_D . По мере проведения процесса перегонки исходный раствор будет обедняться НКК, так как тот переходит в дистиллят. Поэтому точка М на линии кипения начнёт перемещаться (*мигрировать*) вверх и влево, температура кипения будет расти. Вслед за точкой состава кипящей жидкости М будет перемещаться точка состава пара. Концентрация НКК в нём будет уменьшаться.

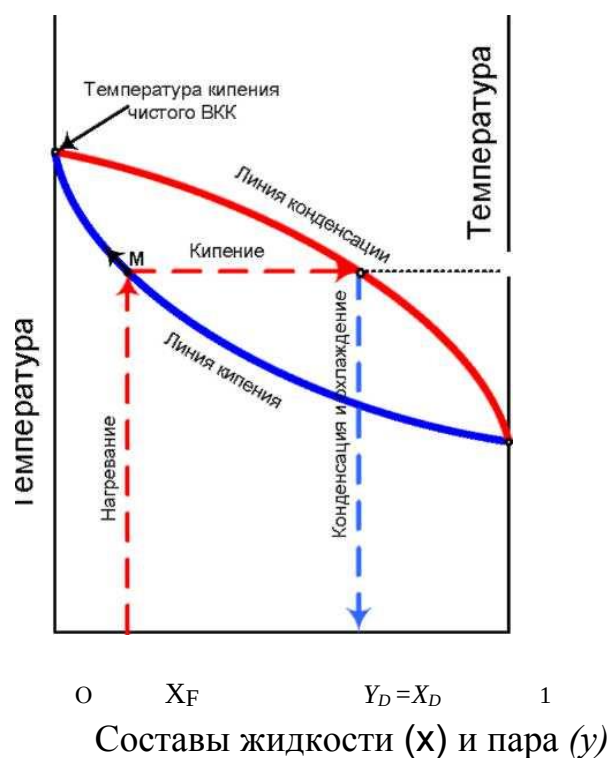


Рис. 3. Иллюстрация процесса простой перегонки на графике температур кипения и конденсации

Для простой перегонки можно записать два уравнения материального баланса, которые будут справедливы и для процесса ректификации: материальный баланс по всему сырью:

$$F = D + W \quad (1)$$

- материальный баланс по НКК

$$F x_F = D x_D + W x_W \quad (2)$$

Согласно первому уравнению всё взятое в процесс сырья разделилось на дистиллят и кубовый остаток.

Согласно второму уравнению весь низкокипящий компонент после проведения процесса разделился на две неравные части: основное его количество перешло в дистиллят и немного осталось в кубовой жидкости.

Простая перегонка не позволяет получить в дистилляте концентрацию НКК больше, чем это предписывается равновесием между жидкостью и паром (рис. 3). История умалчивает о том, кто впервые попытался «обмануть» закон и получить более «крепкий» дистиллят. Зато мы совершенно точно знаем, что для этих целей потребуется установка, изображенная на рис. 4.

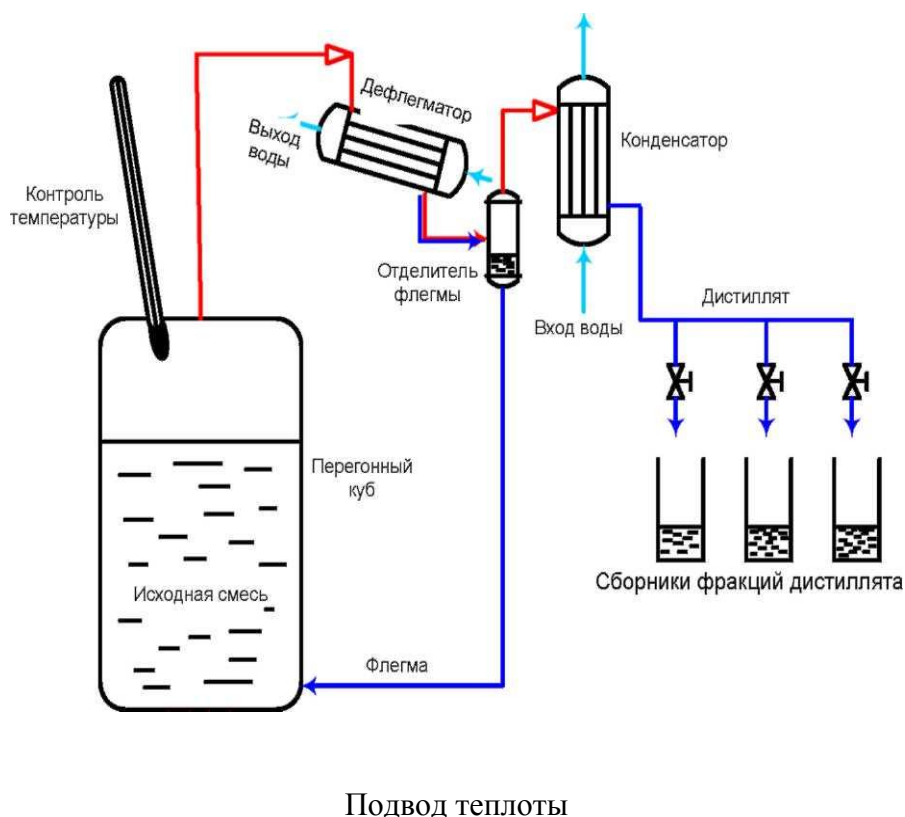
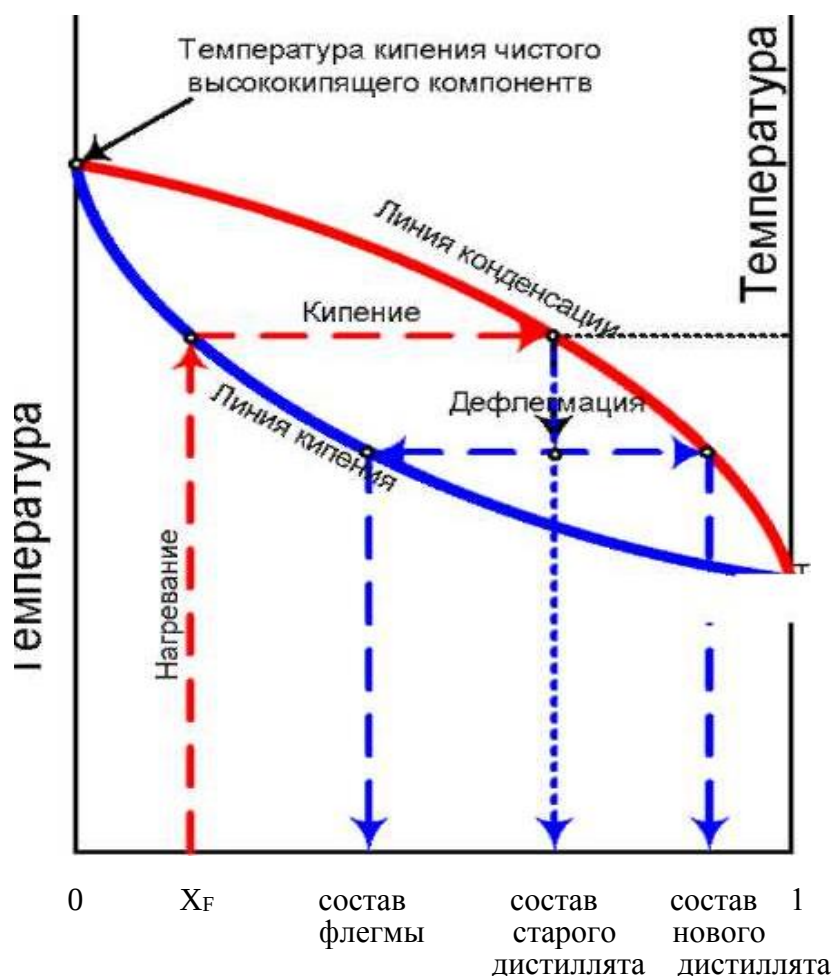


Рис. 4. Схема установки перегонки с дефлегмацией

Эта установка принципиально отличается от предыдущей: в ней появился новый аппарат - дефлегматор и новый поток – поток флегмы.

Принцип работы такой модернизированной установки заключается в следующем. Как и при простой перегонке, исходная смесь доводится до кипения. Образующийся пар поступает теперь не в обычный конденсатор, а специальный аппарат - дефлегматор. В дефлегматоре происходит частичная конденсация пара. Процесс, происходящий при этом, показан на рис. 5.

Поступивший в дефлегматор пар начинает переходить в жидкую фазу, но воды для его полной конденсации подаётся недостаточно. Происходит частичная (*парциальная*) конденсация. В результате из дефлегматора выходит парожидкостная смесь, которая поступает в аппарат, предназначенный для отделения образовавшейся жидкой фазы от пара. Эта жидкая фаза называется флегмой (от греческого греч. *phlegma* - жидкость, мокрота). В современном техническом толковании – это часть дистиллята, возвращаемая в процесс перегонки (ректификации). Она возвращается в перегонный куб. Самое главное, что в составе нового пара концентрация низкокипящего компонента стала существенно больше, чем при простой перегонке (см. рис. 5)



Состав жидкости (x) и пара (y).

Рис. 5. Иллюстрация процесса перегонки с дефлегмацией

Поставленная цель - получение более концентрированного дистиллята - достигнута. Однако, улучшение качества дистиллята потребует дополнительных затрат. Поток флегмы циркулирует по замкнутому контуру перегонный куб—>дефлегматор—>перегонный куб. Для перевода флегмы в пар требуется подвод тепловой энергии, а для конденсации пара в дефлегматоре потребуется отвод теплоты, т.е. дополнительный расход хладагента. Таким образом, улучшение качества дистиллята потребовало помимо усложнения конструкции установки дополнительных затрат на подвод и отвод теплоты. Это энергетические или эксплуатационные затраты.

В теории процесса вводится очень важное понятие - *флегмовое число* R

$$R = \phi / D \quad (3)$$

От значения флегмового числа зависит как качество получаемого продукта, так и энергетические затраты на его получение. Можно доказать, что чем больше флегмовое число, т.е. чем больше возвращается в аппарат флегмы на единицу отбираемого дистиллята, тем чище будет получаться товарный продукт. Но энергетические затраты при этом будут также возрастать.

И простая перегонка (рис. 1), и перегонка с дефлегмацией (рис. 4) не позволяют получить чистые НКК и ВКК. Полученные дистиллят и остаток надо снова и снова подвергать перегонке. Это потребует затрат времени и энергии, увеличит потери целевого продукта. Поэтому в промышленности для разделения жидких смесей на чистые компоненты применяется процесс *ректификации*.

Лабораторная работа

Цель работы: изучение процесса простой перегонки двухкомпонентной смеси в системе спирт-вода

Задачи работы:

1. Ознакомиться с устройством и принципом работы ротационного испарителя.
2. Изучить механизм процесса перегонки (в системе спирт-вода).

Экспериментальная установка:

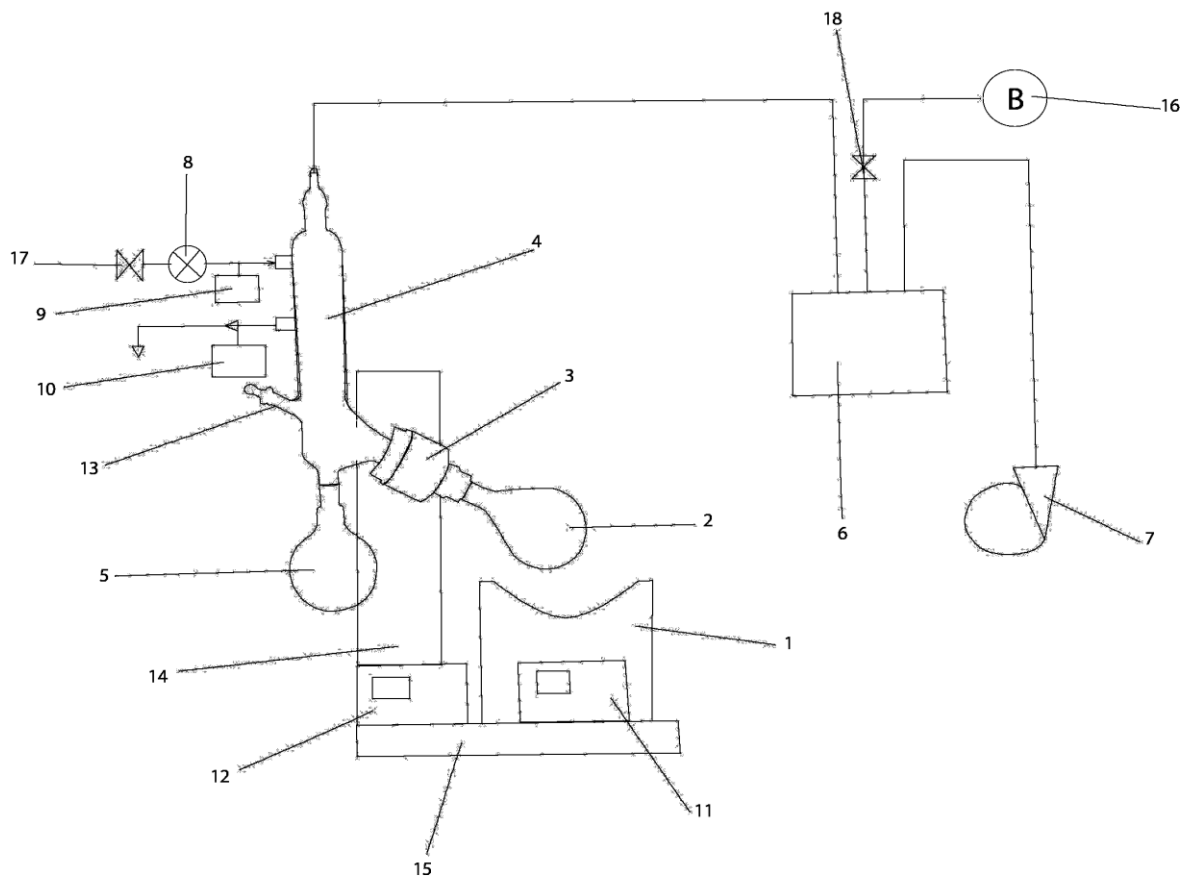


Рис. 6. Схема экспериментальной установки:

1 – нагревательная баня, 2 – испарительная колба, 3 – червячный редуктор, 4 – конденсатор-холодильник, 5 – колба для отбора конденсата, 6 – ловушка, 7 – вакуум-насос, 8 – расходомер, 9, 10 – термопары для определения температуры охлажденной жидкости, 11 – контроль за подогревом нагревательной бани, 12 – регулировка частоты вращения, 13 – загрузка исходной смеси, 14 – привод, 15 – станина, 16 – вакуумметр, 17 – вентиль, 18 – вентиль вращения насоса

Теоретическая часть

Разделение жидкой смеси путем простой перегонки основано на различной летучести компонентов, составляющих ее, и представляет собой однократное испарение части жидкости при кипении с последующей конденсацией паров. Пар, образующийся в процессе простой перегонки, обогащается легколетучим низкокипящим компонентом, а кубовый остаток – менее летучим (высококипящим) компонентом. При достаточно длительном соприкосновении между жидкой смесью и паром достигается равновесие; для бинарной смеси равновесный состав пара (y^*) может быть определен в соответствии с законами Рауля

$$p_A = P_A \cdot x_A; p_B = P_B \cdot x_B = P_B(1 - x_A) \quad (4)$$

и Дальтона:

$$p_A = \Pi \cdot y_A, \quad (5)$$

где p_A и p_B – парциальные давления низкокипящего (A) и высококипящего (B) компонентов; P_A и P_B – давление насыщенных паров чистых компонентов A и B при данной температуре; x_A и x_B – мольные доли низкокипящего и высококипящего компонентов в жидкой смеси; Π – полное (общее) давление смеси паров ($\Pi = p_A + p_B$); y_A – концентрация (мольная доля) легколетучего компонента в паровой фазе.

При равновесии ($y_A = y_A^*$)

$$y_A^* = \frac{P_A}{\Pi} = \frac{P_A}{P_A + P_B} = \frac{P_A \cdot x_A}{P_A \cdot x_A + P_B \cdot (1 - x_A)} = \frac{\alpha \cdot x_A}{\alpha \cdot x_A + (1 - x_A)}, \quad (6)$$

Простая перегонка применяется в том случае, если компоненты достаточно сильно отличаются по летучести, т. е. для очистки веществ от мало-летучих и нелетучих примесей или когда не требуется большого обогащения дистиллята низкокипящим компонентом.

При периодическом ведении процесса перегонки концентрация низкокипящего компонента в дистилляте постепенно уменьшается и приближается к его содержанию в первоначальной смеси. Расчет простой перегонки обычно заключается в том, чтобы определить, какое количество жидкости надо отогнать с целью получения требуемого среднего состава дистиллята и кубового остатка.

Уравнение материального баланса простой перегонки по низкокипящему компоненту имеет вид

$$Lx = (L - dL)(x - dx) + dLy^*, \quad (7)$$

где L – количество исходной смеси в некоторый момент времени; x – текущая концентрация смеси по низкокипящему компоненту; dL – количество жидкости, испарившееся за бесконечно малый промежуток времени dx ; y^* – равновесная концентрация легколетучего компонента в паре.

Раскрывая скобки и пренебрегая произведением $dL \cdot dx$, как бесконечно малой величиной второго порядка, получим

$$dL \cdot dx = dL \cdot (y^* - x) \text{ или } \frac{dL}{L} = \frac{dx}{y^* - x} \quad (8)$$

Интегрируем уравнение (8) в пределах изменения количества жидкости в кубе от начального $L = F$ до конечного $L = W$ и соответствующего падения ее концентрации от x_F до x_W за весь цикл перегонки:

$$\int_F^W \frac{dL}{L} = \int_{x_F}^{x_W} \frac{dx}{y^* - x} \text{ или } \int_W^F \frac{dL}{L} = \int_{x_W}^{x_F} \frac{dx}{y^* - x} \quad (9)$$

После интегрирования получим:

$$\ln \frac{F}{W} = \int_{x_F}^{x_W} \frac{dx}{y^* - x} \quad (10)$$

Вид функции $y^* = \varphi(x)$ определяется формой кривой равновесия и обычно не может быть установлен аналитически. Поэтому интегрирование правой части уравнения (10) проводят графически – путем построения зависимости $\frac{1}{(y^* - x)}$ от x .

При графическом вычислении интеграла берут последовательно различные значения x в пределах от x_W до x_F , находят по таблице (приложения) или диаграмме $y^* = \varphi(x)$ (приложения) соответствующие им значения y^* , вычисляют $\frac{1}{(y^* - x)}$ и строят кривую (рис.7).

Размер площади, ограниченной кривой и осью абсцисс в пределах от x_W до x_F , представляет собой величину искомого интеграла.

Среднюю концентрацию легколетучего компонента в дистилляте (x_{dcp}) рассчитывают из уравнения материального баланса:

$$F x_F = W x_W + (F - W) \cdot x_{dcp} = W x_W + D x_{dcp} \quad (11)$$

Откуда

$$x_{dcp} = \frac{F \cdot x_F - W \cdot x_W}{D}, \quad (12)$$

где $D = F - W$ – количество перегнанной жидкости (дистиллята).

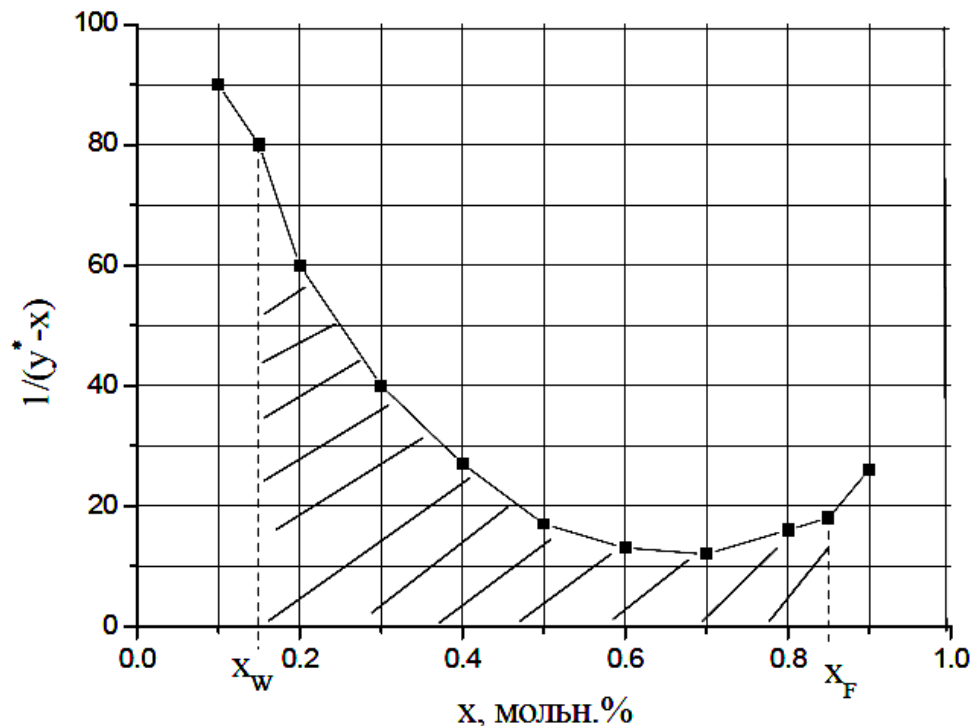


Рис. 7. Графическое решение интеграла $\int \frac{dx}{y^* - x}$

Описание экспериментальной установки.

Исходную смесь спирт-вода загружаем через вентиль загрузки исходной смеси 13 в испарительную колбу 2. Подогрев смеси осуществляется с помощью нагревательной бани 1. Регулировка и контроль температуры нагрева в нагревательной бане 1 осуществляется с пульта контроля за подогревом нагревательной бани 11. Интенсификация процесса испарения смеси в ротационном испарителе достигается за счет вращения испарительной колбы 2. Регулировка частоты вращения испарительной колбы 2 осуществляется через регулировку частоты вращения 12. При вращении центробежные силы и силы связи между жидкостью и поверхностью колбы создают плёнку, в связи с этим увеличивается поверхность испарения, за счет чего интенсифицируется процесс. Вращение осуществляется с помощью привода 14 через червячный редуктор. Вакуум в системе создаётся за счет вакуум-насоса 7, который контролируется с помощью вакуумметра 16. Для улавливания не сконденсировавшихся паров предусмотрена ловушка 6. После открытия вентилей 17 холодная вода подаётся в конденсатор-холодильник 4. В процессе охлаждения контролируется расход воды расходомером 8. Контроль температуры на входе и на выходе осуществляется термодарами 9, 10, конденсат собирается в колбу для отбора конденсата 5. Установка смонтирована на станине 15.

Методика проведения работы:

1. Ознакомиться с t - x , y диаграммой для исходной смеси (приложения)

2. С помощью ареометра измерить плотность исходной смеси, определить его концентрацию x_f , в масс. % (приложения) и температуру кипения.

3. Зная количество исходной смеси, ее концентрацию по легколетучему компоненту и задавшись концентрацией кубового остатка после перегонки, теоретически по уравнению 10 или методом графического интегрирования рассчитать количество кубового остатка W и дистиллята D ; получаемых после окончания перегонки ($D = F - W$, где F – количество исходной смеси). По уравнению 12 рассчитать среднюю концентрацию легколетучего компонента x_{Dcp} в дистилляте.

При графическом интегрировании необходимо:

а) выписать данные по равновесию и заполнить табл.1 в пределах изменения концентрации исходной смеси от x_F до x_W . Вторая графа табл.1 (x^2) заполняется при расчете на ЭВМ;

б) на миллиметровой бумаге, в масштабе построить график зависимости $1/(y^*-x) = \varphi(x)$. Площадь под кривой в пределах изменения dx от x_W до x_F представляет собой искомый интеграл, т. е. величину $\ln F/W$;

- в) определить количество кубового остатка W и дистиллята D ;
 г) по уравнению 9 рассчитать средний состав дистиллята x_{Dcp} .

Для расчета интеграла на ЭВМ надо табличную зависимость $y^* = f(x)$ аппроксимировать кривой, например, квадратным трехчленом вида $y^* = a + bx + cx^2$. Найдя коэффициенты a , b и c , по стандартной программе вычислить определенный интеграл уравнения 10. Теоретически рассчитав количество и среднюю концентрацию дистиллята, приступают к выполнению, экспериментальной части работы.

Таблица 1.

Расчетные данные

x , масс. доля	x^2	y^* , масс. доля	$y^* - x$, масс. доля	$\frac{1}{(y^* - x)}$
1	2	3	4	5

4. Измерить начальную температуру исходной смеси и налить ее в заданном количестве F в испарительную колбу 2.

5. Закрепить испарительную колбу 2 на червячном редукторе 3, отрегулировать колбу относительно бани по высоте и установить частоту вращения 12

6. Наполнить водой нагревательную баню примерно на $\frac{3}{4}$ и задать температуру на панели контроля за подогревом нагревательной бани 11.

7. Погрузить испарительную колбу 2 в нагревательную баню 1 и установить значения необходимые для проведения работы

8. Открыть вентиль 17 и подать водопроводную воду в холодильник-конденсатор 4. На пульте регулировки частоты вращения 12 установить длительность вращения соответствующую длительности эксперимента и частоту вращения и включить вакуум-насос 7.

9. По окончании работы отключить нагрев бани и подачу вакуума через пульт 12.

10. Отобрать пробы дистиллята и кубового остатка в мерные цилиндры, охладить их до комнатной температуры, замерить ареометром плотность, и по таблице определить концентрацию легколетучего компонента в дистилляте и в кубовом остатке (в масс. %).

11. Не ранее чем через 10 мин после окончания перегонки отключить подачу воды в холодильник.

Обработка опытных данных

1. Найденный экспериментально средний состав дистиллята x_3 сравнивают с расчетным x_{Dcp} и рассчитывают ошибку ϵ , %:

$$\varepsilon = \frac{x_{Dcc} - x_{Dэ}}{x_{Dcc}} \cdot 100, \% \quad (13)$$

2. Определяют расход тепла на перегонку. Он складывается из трех величин:

а) расхода тепла на подогрев исходной смеси:

$$Q_1 = F \cdot c_F \cdot (t_{кF} - t_n) \quad (14)$$

где c_F – удельная, теплоемкость исходной смеси, кДж/(кг · К); c_c, c_b – удельная теплоемкость компонентов в смеси (спирта и воды), кДж/(кг · К); $t_{кF}$ – температура кипения исходной смеси, °С; t_n – начальная температура исходной смеси, °С;

Удельная теплоемкость исходной смеси определяется по формуле:

$$c_F = c_c \cdot x_F + c_b \cdot (1 - x_F) \quad (15)$$

где x_F – концентрация исходной смеси, масс. доли.

б) расхода тепла на испарение дистиллята:

$$Q_2 = D \cdot r_D \quad (16)$$

где r_D – теплота парообразования дистиллята, кДж/кг; r_c, r_b – теплота парообразования компонентов смеси, кДж/кг; $x_{Dэ}$ – концентрация дистиллята, масс. доли.

Теплота парообразования дистиллята определяется по формуле:

$$r_D = r_c \cdot x_{Dэ} + r_b \cdot (1 - x_{Dэ}) \quad (17)$$

в) расхода тепла на нагрев кубового остатка:

$$Q_3 = W \cdot c_W \cdot (t_{кW} - t_{кF}) \quad (18)$$

где c_W – удельная теплоемкость кубового остатка, кДж/(кг · К); $t_{кW}$ – температура кипения кубового остатка в конце процесса перегонки, °С.

Удельная теплоемкость кубового остатка определяется по формуле

$$c_W = c_c \cdot x_W + c_b \cdot (1 - x_W) \quad (19)$$

где x_W – концентрация кубового остатка, масс. доли.

Тогда общий расход тепла:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3. \quad (20)$$

Таблица 2

Опытные и расчетные данные

№ п/п	Наименование	Обозначение	Единицы измерения	Значение величины
1. Опытные данные				
1	Количество исходной смеси	F	Кг	
2	Концентрация исходной смеси по низкокипящему компоненту	x_F	Масс. доли	
3	Средняя концентрация дистиллята	$x_{D_{\text{ср}}}$	Масс. доли	
4	Концентрация кубового остатка	x_W	Масс. доли	
5	Начальная температура исходной смеси	t_n	°С	
6	Температура кипения исходной смеси	t_{KF}	°С	
7	Температура кипения кубового остатка	t_{KW}	°С	
8	Время нагрева исходной смеси	τ_n	Мин (с)	
9	Время перегонки	τ_n	Мин (с)	
10	Количество кубового остатка	W	Кг	
11	Количество дистиллята	D	Кг	
12	Давление	P	Па	
2. Расчетные данные				
1	Количество кубового осадка	W_p	Кг	
2	Количество дистиллята	D_p	Кг	
3	Средняя концентрация дистиллята	$x_{D_{\text{ср}}}$	Масс. доли	
4	Процент ошибки в определении концентрации дистиллята	ε	%	

Библиографический список

Касаткин А.Г.. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов.-11-е изд., стереотипное, доработанное; перепеч. с изд. 1973 г.-М.: ООО ТИД «Альянс», 2005.-753 с.

Фролов В.Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии». -СПб.: Химиздат, 2003.-608 с.

Ректификация смеси этилового спирта и воды: метод. указ. к лабораторной работе по курсу «Основные процессы и аппараты химической технологии». сост. В.В.Филиппов, А.А.Скорород. –Самара: Самарский гос. тех. ун-т ;. 2012. -31 с.

www.xumuk.ru/encyklopedia/2097.html Коновалова законы.

<http://www.izobretatel.msk.ru/ideas/rectif/tarelki/process.php#l>

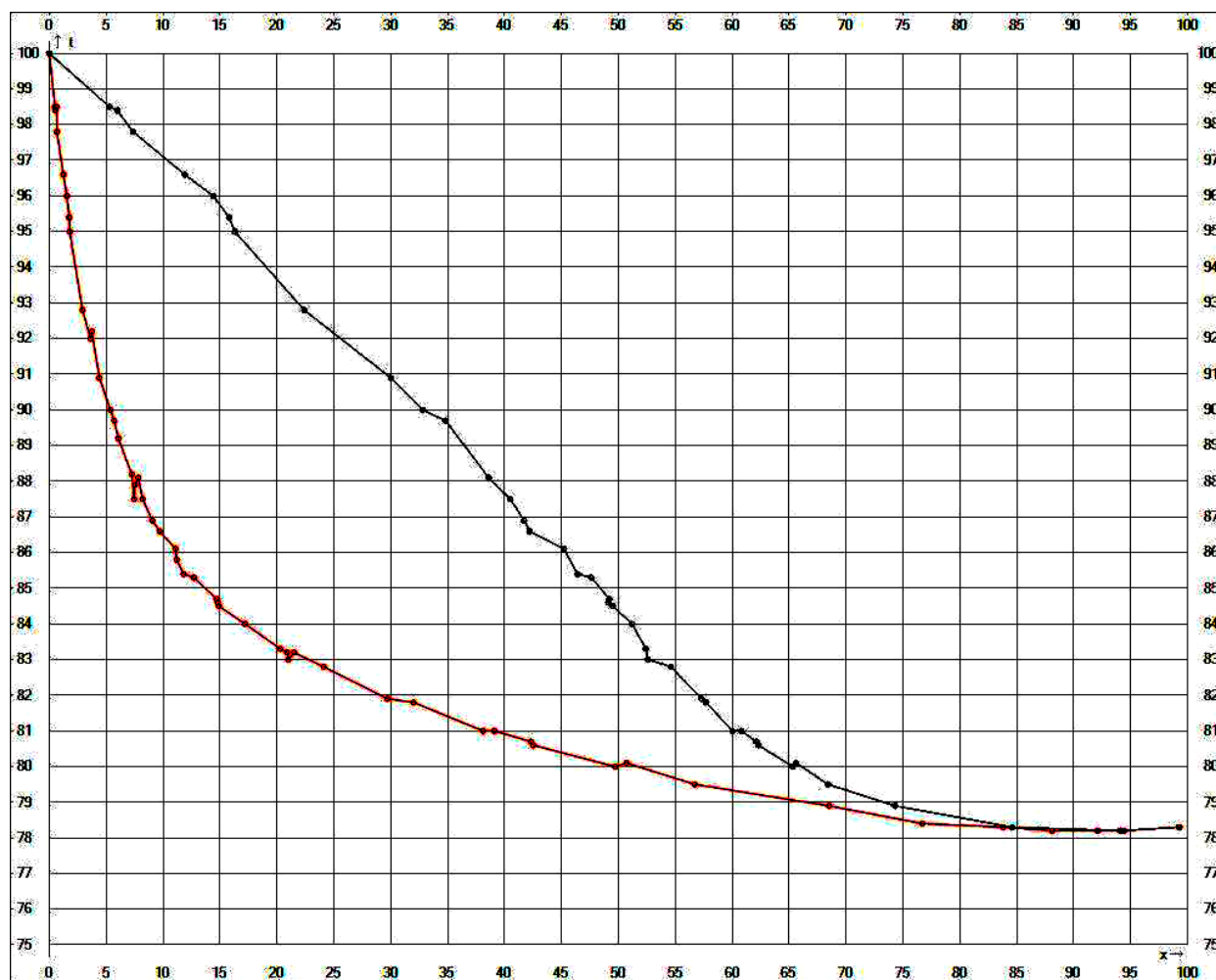
<http://www.physchem.chimfak.rsu.ru>

Приложения

Данные по равновесию для смесей этилового спирта и воды

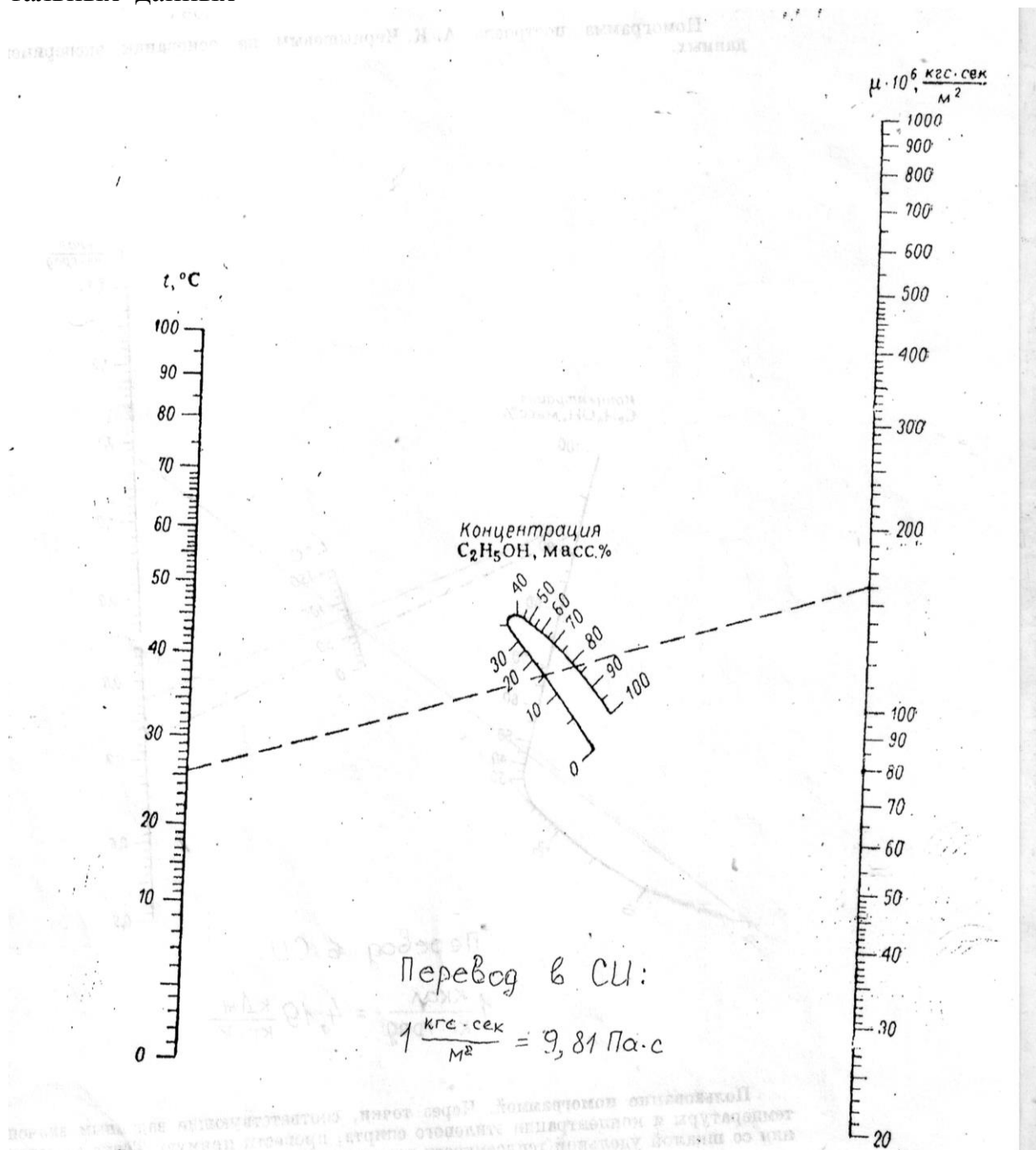
Содержание спирта в жидкой фазе		Температура кипения, °C	Содержание спирта в паровой фазе	
% массо- вый	% моль- ный		% массо- вый	% моль- ный
1.00	0.39	98.75	10.75	4.51
2.00	0.79	97.65	19.7	8.76
3.00	1.19	96.65	27.2	12.75
4.00	1.61	95.8	33.3	16.34
5.00	2.01	95.95	37.0	18.68
6.00	2.43	94.15	41.1	21.45
10.00	4.16	91.3	52.2	29.92
15.00	6.46	89.0	60.0	36.98
20.00	8.92	87.0	65.0	42.09
25.00	11.53	85.7	68.6	46.08
30.00	14.35	84.7	71.3	49.30
35.00	17.41	83.75	73.2	51.67
40.00	20.68	83.1	74.6	53.46
45.00	24.25	82.45	75.9	55.22
50.00	28.12	81.9	77.00	56.71
55.00	32.34	81.4	78.2	58.39
60.00	36.98	81.0	79.5	60.29
65.00	42.09	80.6	80.8	62.22
70.00	47.72	80.2	82.1	64.21
75.00	54.00	79.75	83.8	66.93
80.00	61.02	79.5	85.8	70.29
85.00	68.92	78.95	88.3	74.70
90.00	77.88	78.5	91.3	80.42
95.00	88.15	78.18	95.05	88.25
95.57	89.41	78.15 ⁸	95.57	89.41

Диаграмма t-x,y



НОМОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЯЗКОСТИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ЭТИЛОВОГО СПИРТА

Номограмма построена А.К.Чернышевым на основании экспериментальных данных

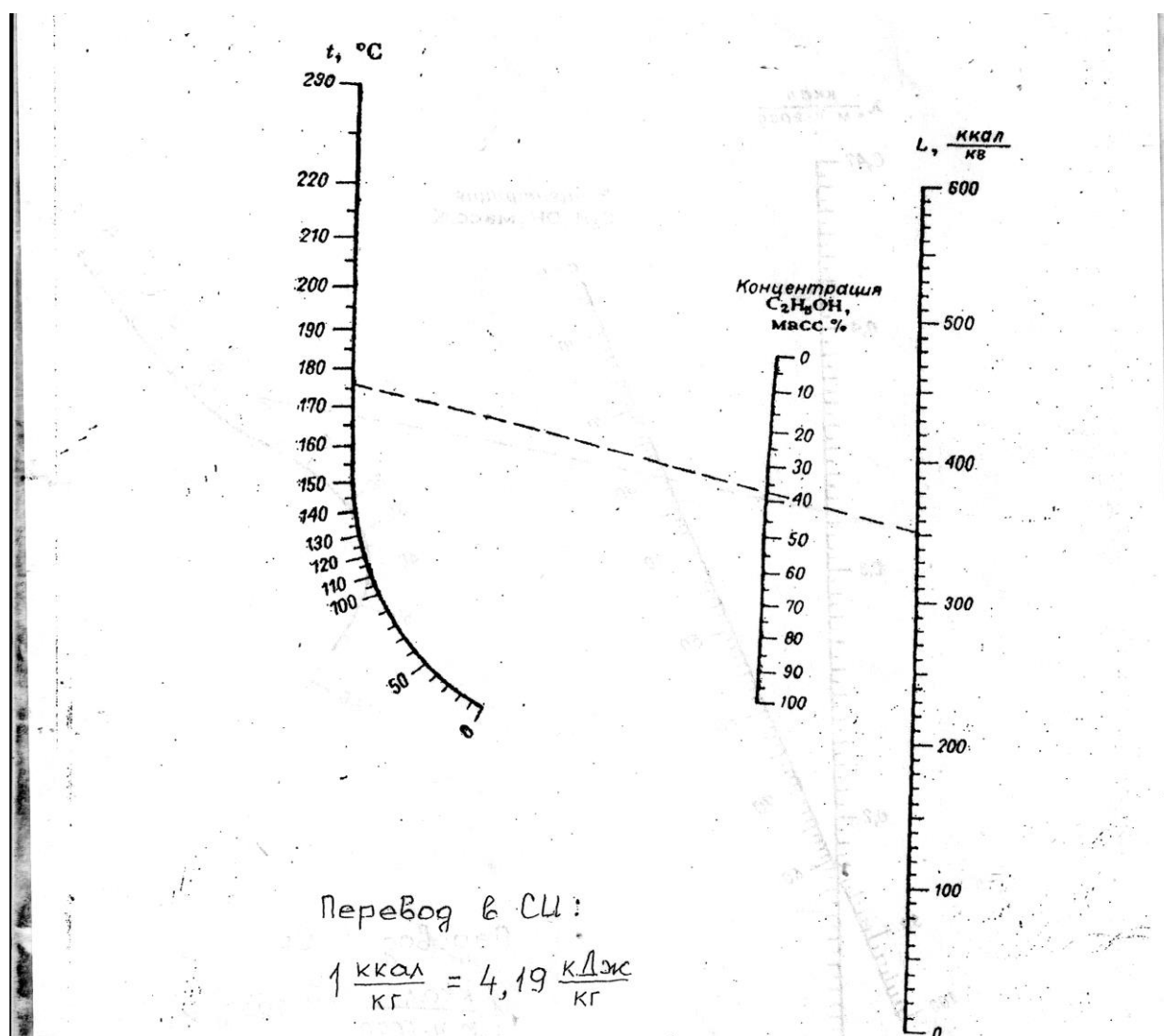


Пользование номограммой. Через точки, соответствующие заданным значениям температуры и концентрации этилового спирта, провести прямую. Точка ее пересечения со шкалой коэффициентов вязкости дает искомое значение.

НОМОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОТЫ ИСПАРЕНИЯ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ЭТИЛОВОГО СПИРТА

L или r - скрытая теплота конденсации (испарения)

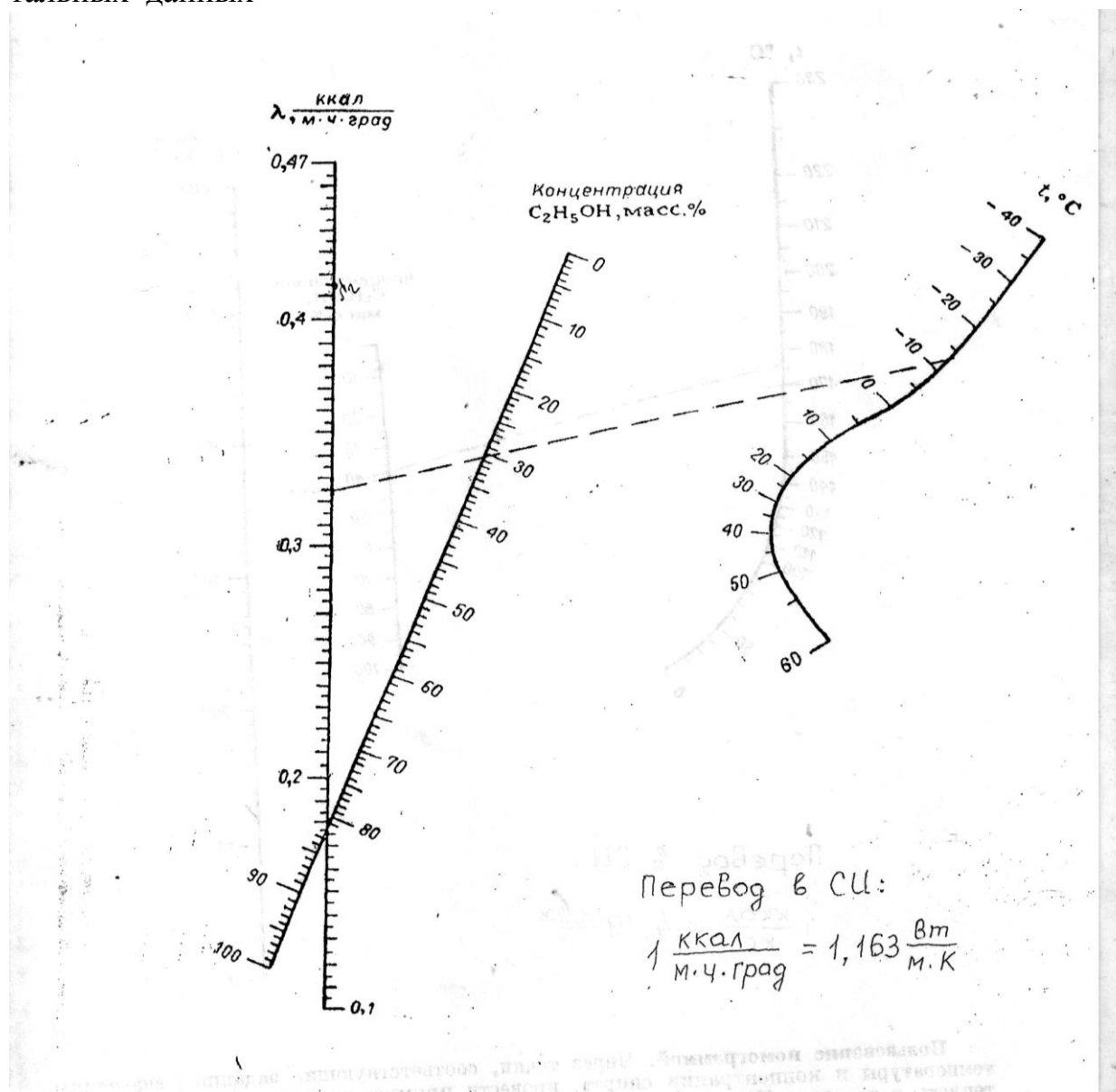
Номограмма составлена А.К.Чернышевым на основании экспериментальных данных



Пользование номограммой. Через точки, соответствующие заданным значениям температуры и концентрации спирта, провести прямую до пересечения со шкалой теплоты испарения. Точка пересечения дает искомое значение.

НОМОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ЭТИЛОВОГО СПИРТА

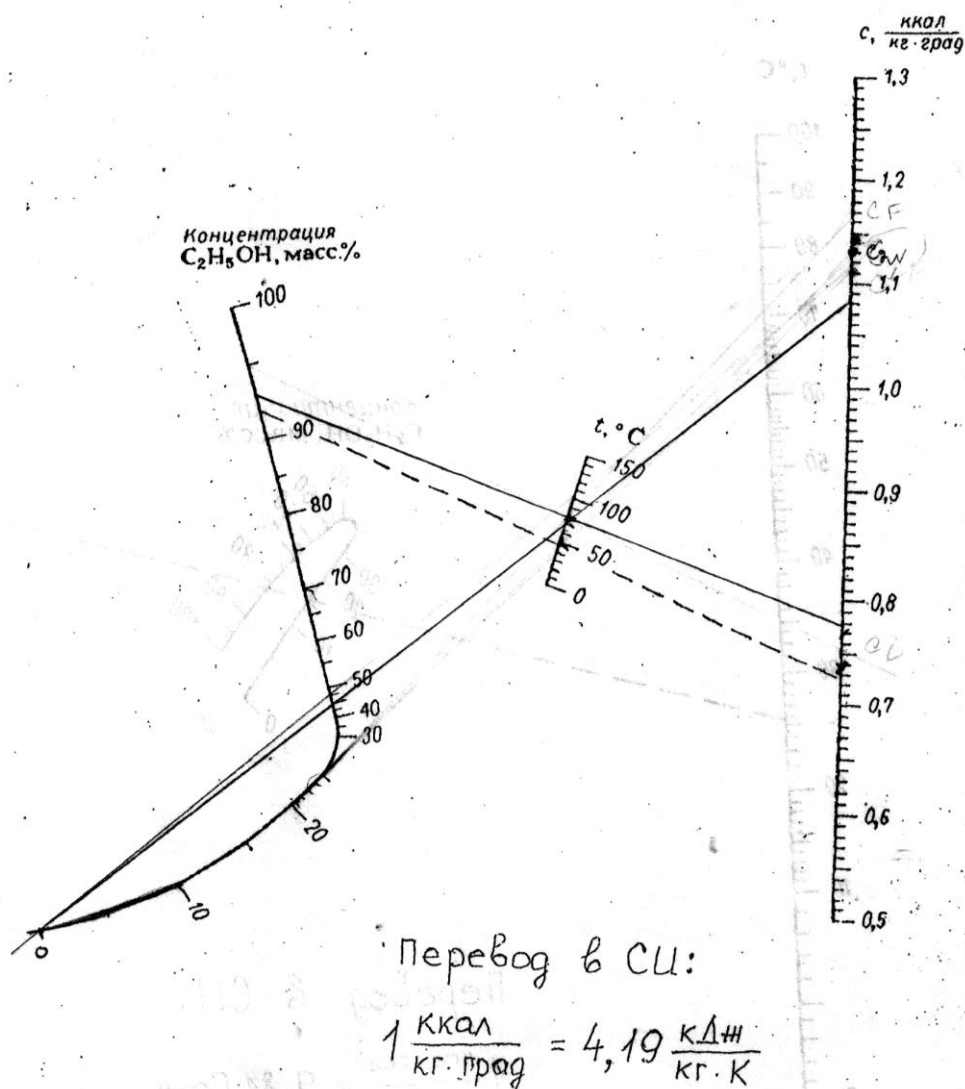
Программа построена А.К.Чернышевым на основании экспериментальных данных



Пользование номограммой. Через точки, соответствующие заданным значениям температуры и концентрации спирта, провести прямую до пересечения со шкалой коэффициентов теплопроводности. Точка пересечения дает искомое значение.

НОМОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ЭТИЛОВОГО СПИРТА

Программа построена А.К.Чернышевым на основании экспериментальных данных



Пользование номограммой. Через точки, соответствующие заданным значениям температуры и концентрации спирта, провести прямую. Точка ее пересечения со шкалой удельной теплоемкости дает искомое значение.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Что такое дистилляция?
2. Чем отличается дистилляция от ректификации?
3. Иллюстрация процесса простой перегонки на графике температур кипения и конденсации.
4. Классификация жидких смесей по их подчинению закону Рауля.
5. Закон Рауля для двухкомпонентной смеси.
6. Уравнения материального баланса для процесса дистилляции.
7. Схема установки дистилляции с дефлегмацией.
8. Иллюстрация процесса перегонки с дефлегмацией на графике температур кипения и конденсации.
9. Что такое флегмовое число?
10. Схема лабораторной установки.
11. Методика проведения опыта.
12. Обработка экспериментальных данных.

Содержание

Историческая справка.....	3
Теоретическая справка.....	4
Лабораторная работа.....	9
Библиографический список	16
Приложения.....	17

Учебное издание

Виктор Сергеевич Куров
Николай Петрович Мидуков
Аркадий Олегович Никифоров

**Массообменные процессы
Дистилляция**

Методические указания к лабораторным работам по курсу
«Процессы и аппараты»

Редактор и корректор Т.А. Смирнова
Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2013г., поз.83

Подп. к печати 02.12.13г. Формат 60х84/16. Бумага тип.№ 1.
Печать офсетная. Печ.л. 1,5. Уч.-изд.л. 1,5. Тираж 50 экз.
Изд.№ 83. Цена «С». Заказ

Ризограф Санкт-Петербургского государственного технологического
университета растительных полимеров, 198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4