# ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ «НОВОКУЙБЫШЕВСКИЙ НЕФТЕХИМИЧЕСКИЙ ТЕХНИКУМ»

<b>«</b>	<b>»</b>	2015 г.
		В. Б. Семисаженова
Замест	гитель диј	ректора по УР
УТВЕ	РЖДАЮ	

#### ОСНОВЫ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ

Методическое пособие для студентов и преподавателей

Новокуйбышевск 2015 г.

Рассматриваются теоретические основы процесса ректификации и даны пояснения к выполнению лабораторных работ по теме.

Методическое пособие имеет практическую значимость обучающихся по специальностям 18.02.09 Переработка нефти и газа и 18.02.06 Химическая технология органических веществ.

Предназначено для самостоятельной работы студентов ГАПОУ СО «ННХТ».

	СОГЛАСОВАНО	
	Предметно - цикловой комиссией	
	Председатель М. В. Коряковская	
	Протокол № от «» 2015 г.	
«ННХ	Составитель: Коряковская М. В. – преподаватель спец. дисциплин ГАПОУ СС Г» г. Новокуйбышевска	)
	Эксперты:	
	Внутренняя экспертиза:	

 $\mathit{Техническая}$  экспертиза: Ю. Н. Федотенкова — преподаватель спец. дисциплин ГАПОУ СО «ННХТ»

Содержательная экспертиза: О. Д. Щелкова — зам. директора по НМР ГАПОУ СО «ННХТ»

### Содержание

Введение	2
Пояснительная записка	3
1. Техника и методика выполнения лабораторных работ	6
2. Состав и работа лабораторного стенда	9
3. Порядок проведения эксперимента	17
4. Лабораторные работы	
Лабораторная работа №1 «Расчет минимального числа	
тарелок ректификационной колонны»	21
Лабораторная работа №2 «Определение минимального флегмового	
числа»	26
Лабораторная работа №3 «Определение оптимального числа	
тарелок, флегмового числа и диаметра колонны»	32
Лабораторная работа №4 «Ректификация смеси этилового спирта и	
воды»	39
Приложение	51
Литература	59

#### Введение

Рабочая программа профессионального модуля ПМ.05 «Химическая технология органических веществ» является частью основной образовательной программы в соответствии с ФГОС по специальностям СПО 240113 Химическая технология органических веществ, включенного за счет вариативного объема часов и СПО 240134 Переработка нефти и газа.

В рамках программы профессионального модуля проводится подготовка оборудование, специалиста, который выбирает на котором следует технологический осуществлять процесс, участвует проведении экспериментальных работ по освоению новых технологических процессов и внедрению их в производство в организационно-технических мероприятиях ПО своевременному освоению производственных мощностей. деятельности специалиста является разработка новых и совершенствование действующих технологических правил производства продукции.

С целью освоения профессионального модуля ПМ.05 студент должен уметь:

- устанавливать порядок выполнения работ и пооперационной маршрут обработки продукции;
- рассчитывать производственные мощности и загрузку оборудования;
- вносить изменения в техническую документацию в связи с корректировкой технологических процессов и режимов производства;
- осуществлять контроль за соблюдением технологической дисциплины в производстве и правильной эксплуатацией технологического оборудования;
- анализировать причины брака, принимать участие в разработке мероприятий по их предупреждению и устранению;
- правила техники электро- и пожаробезопасности при проведении всех видов работ.

#### Пояснительная записка

Принцип постоянной связи теории и практики получает непосредственное осуществление на лабораторных занятиях. Они активизируют познавательную деятельность студентов, так как требуют личного участия в проведении различного рода исследований. Студенты получают необходимые знания, навыки и умения.

При изучении профессионального модуля ПМ.05 обязательно проведение лабораторных работ. Рабочей программой предусмотрено выполнение 14-ти лабораторных работ. На каждую работу составлено задание: порядковый номер и название работы, её цель, оборудование, основные теоретические положения, порядок выполнения работы, задание в нескольких вариантах. Каждой лабораторной работе предшествует теоретическое занятие, на котором студентам необходимо изучить основные команды языка системы «МеаsLAB».

#### Цели и задачи лабораторных работ:

*Основная задача* — закрепление и углубление теоретических знаний студентов.

#### Основная цель работ:

- 1. связать теорию с практикой подтвердить теорию опытом;
- 2. привить навыки научно-исследовательской работы;
- 3. проверить уровень понимания вопросов, пройденных на уроках теоретического обучения.

В процессе выполнения лабораторных работ студент должен:

- 1. стремиться к самостоятельности в решении всех вопросов;
- 2. показать способность правильного применения теоретических положений;
- 3. организовывать свою работу так, чтобы с наименьшей затратой времени и труда найти наилучшее техническое решение.

При подготовке к лабораторным работам, студент должен знать какую именно работу он будет выполнять, повторить теоретический материал, ознакомиться с описание работы и порядком её выполнения.

Лабораторные работы рассчитаны на 2 часа и за это время студент должен: получить допуск к работе, выполнить задание, оформить отчёт.

Контролем в лабораторном практикуме является защита отчётов по лабораторным работам.

#### Оформление отчета:

- 1. отчёт оформляется на листе формата А4 черной пастой;
- 2. переписать в отчёт номер, тему, наименование и цели работы;
- 3. изучить пояснение к работе;
- 4. выполнить задание, написать выводы;
- 5. сдать отчёт на проверку преподавателю.

**Отичет по лабораторным работам** является техническим документом и оформляется в соответствии с ГОСТ 2,104-95 и 2,105-95 ЕСКД.

- Поясняющий текст и расчёты помещаются на одной стороне листа.
- Текст пишется аккуратно и разборчиво, сокращение слов не допускается.
- Каждый лист должен иметь рамку и основную надпись.
- При заполнении граф основной надписи указывается обозначение документа (ЛР лабораторная работа), шифр специальности (240113, 240134), далее через точку номер группы, номер работы, год выполнения работы, тип работы (О отчёт).

#### Например: ЛР 240113.111.1.14 О

• Рисунки и схемы должны выполняться карандашом с использованием чертёжных инструментов.

#### Отчёт должен содержать:

• Номер, тему и цель работы.

- Условия задачи по варианту, принятые обозначения переменных, логические функции для выходных и промежуточных переменных.
- Описание установки, все необходимые расчёты, графики, таблицы, рисунки.
- Выводы по работе.

#### 1. Техника и методика выполнения лабораторных работ

#### Основные задачи лабораторного практикума:

- Научиться рассчитывать минимальное число тарелок ректификационной колонны по методу Фенске-Андервуда (в режиме полного орошения).
- Научиться рассчитывать минимальное флегмовое число методом Андервуда. Освоить метод Львова – Серафимова для расчета флегмового числа и числа тарелок укрепляющей и исчерпывающей частей колонны.
- Научиться рассчитывать диаметр и определять основные конструктивные размеры колонны.
- Изучение принципов управления ректификационной установкой.
- Приобретение навыков вывода установки на рабочий режим.
- Проведение ректификации смеси этилового спирта и воды.
- Знакомство с устройством ректификационной установки.

#### Порядок допуска к лабораторным работам:

К выполнению работы допускаются студенты, выполнившие в полном объёме задание для домашней подготовки к лабораторной работе, знающие правила техники безопасности.

Степень подготовленности к выполнению лабораторной работы проверяется преподавателем в беседе со студентами.

В случае недостаточной подготовленности к лабораторной работе студент не допускается к её выполнению.

#### Проведение лабораторной работы:

Лабораторные работы студенты выполняют единолично или бригадами, состав которых определяется преподавателем.

После получения разрешения на выполнение лабораторной работы студенты:

- Изучить методические указания, заготовить форму отчета о проведенной работе.
- Подключить автоматизированный стенд к USB разъему компьютера.
- Вызвать программу сбора и обработки для данных лабораторной работы (Пуск  $\rightarrow$  Программы  $\rightarrow$  MeasLAB).
- Подготовить установку к испытаниям.
- Включить питание стенда кнопкой «Сеть»
- Провести необходимые работы и измерения.
- Результаты измерений и вычислений занести в таблицы.

Во время лабораторной работы запрещается покидать учебную лабораторию без разрешения преподавателя.

#### Работа считается выполненной, если студент:

- Предъявил преподавателю бланк отчёта с результатами работы.
- После разрешения преподавателя привёл в порядок рабочее место.

Если работа не закончена в предусмотренное расписанием время, то работа прекращается и подлежит повторению в назначенное преподавателем время.

При выполнении лабораторных работ предполагается индивидуализация обучения по принципу «каждому студенту (бригаде студентов) свой вариант задания». Поэтому в каждой лабораторной работе предусмотрено несколько вариантов индивидуальных заданий. По своему усмотрению преподаватель может упростить задачу варианта в зависимости от подготовки обучаемого.

Все лабораторные задания рассчитаны на 2 академических часа работы в лаборатории и 2 часа самостоятельной работы при домашней подготовке и оформлении отчёта по работе.

#### Правила техники безопасности:

• При эксплуатации и техническом обслуживании установки необходимо соблюдать требования ГОСТ 12.3.019-80, «Правил эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правил охраны труда при эксплуатации электроустановок потребителей».

- Любые подключения установки и работы по ее техническому обслуживанию производить только при отключенном питании и исполнительных механизмов.
- Не допускается попадание влаги на контакты разъемов и внутренних элементов установки.
- Подключение, регулировка и техобслуживание прибора должно производиться только квалифицированными специалистами.

**Категорически** запрещено выполнять или продолжать работу на неисправном оборудовании (при появлении искрения, специфического запаха нагретой изоляции и т.д.)

#### 2. Состав и работа лабораторного стенда

Установка ПАХП-РУМ, для изучения процесса ректификации (рис. 1), автоматизированного лабораторного входит состав комплекса теоретическим основам изучения работы ректификационной колонны и расчета основных параметров колонн. Она используется для проведения лабораторных занятий «Процессы ПО курсу И аппараты», профессиональных учебных заведениях. Работа на установке выполняется с использованием компьютерной измерительной системы MeasLAB.

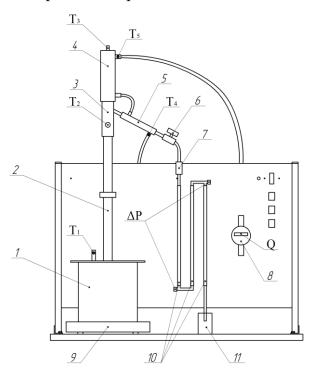


Рис. 1 — Принципиальная схема лабораторной ректификационной установки с электрическим нагревателем и периодической заправкой испарительной емкости водно-спиртовой смесью.

1 — испарительный куб, 2 и 3 — нижняя и верхняя ректификационную часть, 4 — конденсирующее устройство, 5 — охладитель, 6 — регулятор отбора спирта, 7 — смотровая вставка, 8 — счетчик расхода воды охлаждающего контура, 9 — электрический нагреватель, 10 — система связующих патрубков, 11 — емкость для сбора готового продукта.

Питание стенда, системного блока ПК и монитора или ноутбука осуществляется от сети 220В через свои шнуры питания. Для необходимых подключений стенда к компьютеру используются кабели USB.

#### Принцип работы стенда:

Основная часть установки представляет составную колонну, которая - делится на верхнюю (3) и нижнюю (2) ректификационную часть. Верхняя часть включает в себя конденсирующее устройство (4), охладитель (5), регулятор отбора спирта (6) и систему связывающих их патрубков (10). При ректификации в конденсатор (4) и теплообменник (5), выполненный по схеме «труба — в трубе», постоянно противотоком поступает охлаждающая вода. В верхней части испарительной емкости сделаны выводы манометрической трубки для измерения давления образующегося пара и перепада давления в колонне.

В отличие от промышленных ректификационных колонн с колпачковыми, ситчатыми и провальными тарелками в лабораторных колоннах сверхмалого диаметра (10 - 30 мм) в качестве контактных элементов наибольшее распространение получили насадки типа «Зульцер» из нержавеющей гофрированной сетки или спирально призматические пружинки нержавеющей стали. Процесс тепломассообмена на таких контактных элементах проходит непрерывно по всей высоте колонны, а состояние равновесия, эквивалентное одной теоретической тарелке, наступает после преодоления паром некоторого слоя, высоту которого ассоциируют с высотой теоретической тарелки (BTT) или высоты единицы переноса (BEII). Эту высоту обычно оценивают в миллиметрах, что позволяет легко оценивать эффективность той или иной насадки по  $BE\Pi$ . Так при внутреннем диаметре колонны 30 мм  $BE\Pi$  спирально-призматической насадки равна 15 -30, а у используемой в нашем случае насадки «Зульцер», 20 - 25 мм. Однако уже при диаметре колоны 40 мм их эффективность фактически одинакова и  $BE\Pi$  составляет 25 - 30 мм. Таким образом, у насадочных колонн высота единицы переноса сильно зависит от диаметра колонны и стремительно

возрастает при его увеличении. Поэтому одним из перспективных направлений повышения энергоэффективности промышленного оборудования является его миниатюризация и использование большого количества контактных элементов.

Процесс ректификации этилового спирта на учебной установке РУМ - 05 производительностью 0.5 л/ч (рис.2), осуществляется следующим образом:

- вначале кубовая жидкость с помощью электрического нагревателя, работающего в стартовом режиме с мощностью 1 кВт, доводится до кипения,
- образующийся в кубе пар поднимается по ректификационной колонне и попадает в конденсатор (8), где конденсируется, образуя дистиллят,
- часть дистиллята (флегма) возвращается в верхнюю царгу, а оставшаяся часть через охладитель (5) и поступает в приемную емкость (11). Соотношение между расходами флегмы и отбираемого дистиллята называется флегмовым числом и управляется вручную регулятором отбора дистиллята (6). При этом по всей высоте колонны происходит непрерывный процесс тепломассообмена между стекающей вниз флегмой и поднимающимся вверх паром. В результате в верхней части колонны накапливается в виде пара и флегмы самый легкокипящий компонент кубовой жидкости, а следом за ним по высоте колонны выстраивается «очередь» других веществ с большей температурой кипения,



Рис. 2 – Фотография лабораторной установки

- с помощью управляемого вручную регулятора отбора дистиллята организуется медленный и последовательный отбор этих веществ в приемную емкость №1, с последующей их идентификацией по компьютерным записям температуры паров, поступающих конденсатор и учетом фактического атмосферного давления. Таким образом, используя отдельные приемные емкости, процессе ректификации раздельно получают все значимые компоненты исходной смеси и проводят их качественный и количественный анализ
- после выхода легкокипящих компонентов И при достижении температуры паров 78,3°C начинается наиболее продолжительный период работы по ректификации самого этилового спирта. При этом схема работы колонны остается неизменной – флегма течет вниз, а пар вверх. Для такого встречного движения существует движется некоторая предельная скорость пара, при которой гравитационные силы, обеспечивающие стекание флегмы вниз, не в состоянии

преодолеть противодействующий им динамический напор пара. Тогда флегма сначала замедляет свою скорость течения вниз, затем просто останавливается, повисая в колонне, и начинает накапливаться в ее ректификационной части. Происходит захлебывание колонны,

- захлебывание является нерасчетным режимом работы ректификационной колонны и в таком состоянии она может находиться не более 30-60 с. За это время флегма заполняет ее внутреннюю полость и дефлегматор, а затем происходит аварийный выброс флегмы через верхний штуцер дефлегматора. Начало захлебывания можно определить по возникновению характерных пульсаций на записи перепада давления в колонне и появлению звуков «булькающего» шума при работе установки,
- предельная скорость пара зависит от конструкции контактных элементов, загромождения ими внутреннего сечения колонны. Обычно она находится в пределах 0,5 до 1,2 м/с. При этом максимальная эффективность разделения смеси реализуется как раз при работе колонны вблизи состояния захлебывания. Однако колонну с любыми контактными элементами можно нагружать и меньшими потоками пара, уменьшая мощность, выделяемую нагревателем. На установке для этого реализуются два режима работы нагревателя: стартовый для доведения кубовой смеси до кипения (1.0 кВт) и технологический (0,5 кВт) для ректификации,
- стоит обратить внимание, что захлебывание колонны может наступить и при правильно подведенной к нагревателю технологической мощности. Существует несколько причин такого явления: засорение нижней части колонны пеной за счет использования некачественного спиртосодержащего сырья, переполнения испарительной емкости перерабатываемой жидкостью, попытки использования колонны в высокогорной области. Необходимо также контролировать наличие

- повышенного напряжения в сети, приводящего к заметному увеличению мощности, выделяемой нагревателем,
- для получения высококачественного спирта-ректификата флегмовое число должно быть не менее трех. Это означает, что из 4 частей дистиллята в спирто-приёмник отбирается одна часть, а три остальные части должны быть отправлены обратно в ректификационную колонну для орошения ее контактных элементов. Отбор дистиллята установлен правильно, если через 5-15 мин после прекращения отбора температура паров в верхней части колонны не уменьшилась,
- полностью открытом отборе дистиллята флегмовое число нулю. становится равным При ЭТОМ контактные элементы ректификационной колонны полностью «иссушаются» ректификационная превращается В примитивный установка самогонный аппарат с низкой очисткой и недостаточно высокой концентрацией получаемого этилового спирта,
- в примесях, содержащихся в бражке, обнаруживается около 70 разнообразных компонентов. Это кислоты, ацетоны, эфиры, альдегиды, легкие и тяжелые спирты, сивушные масла и т.д. Они образуются в период приготовления сусла, накапливаются при брожении, а при перегонке полностью переходят в спирт-сырец. Количество примесей в обезвоженном дистилляте обычно не превышает 6%. С практически точки зрения их можно условно разделить на две группы по температуре их кипения в сравнении со спиртом ректификатом: головные, легкокипящие 2,5% и низкокипящие, хвостовые 3,5%,
- отбор пищевого спирта завершается при достижении температуры его паров на 0.1 выше 78,3°С. Условно считается, что количество низкокипящих примесей, находящихся в этот момент в получаемом спирте, соответствует допустимым нормам,
- выключение установки производится после отбора фракций примесей. Этот отбор не является ответственным этапом ректификации и не

предполагает изменение настройки колонны, а лишь замену приемной емкости №2 на №3. Отбор хвостовых фракций завершается при достижении температуры пара в конденсаторе порядка 82-85°C.

В ходе лабораторного эксперимента концентрацию получаемого спирта определяют по текущим значениям его плотности (статическому давлению тарированного столба жидкости, отводимой в спирто-приёмник с учетом ее температуры). Измерение перепадов давления пара на ректификационной колонне и гидростатическом ареометре, температур пара и жидкости по длине колонны и отводимого конденсата производится с помощью датчиков давления МХ 5010 и термопар, электрические выходы которых заведены на многоканальный измеритель МВА 8. Измерения основных параметров, характеризующих процесс, регистрируются компьютерной системой измерения и в режиме реального времени отображаются на экране, как и результаты машинной обработки полученных данных.

#### Требования безопасности

- К выполнению лабораторной работы студенты допускаются только после прохождения инструктажа по охране труда и пожарной безопасности в лаборатории и на рабочем месте.
- В соответствии с ними перед пуском установки нужно ознакомиться с ее устройством И наружным осмотром проверить исправность ректификационной колонны, испарительной емкости, трубопроводов, запорной арматуры, электрических приборов; наличие заземления, исправность защитного отключения, электрической тепловой И изоляции.
- Пуск установки проводить в присутствии учебного мастера и под его непосредственным руководством.
- Во избежание захлебывания ректификационной колонны и аварийного выбросы горячей флегмы четко следовать рекомендациям по порядку проведения лабораторной работы.

• При работе на установке проявлять осторожность и аккуратность. Помнить, что при работе некоторые из ее элементов и устройств имеют температуру около 100°C.

#### 3. Порядок проведения эксперимента

- 1. Ознакомиться со схемой лабораторной установки и расположением приборов. Составить ее описание и заготовить таблицы для регистрации результатов испытаний.
- 2. Заполнить испарительную емкость на 3/4 спиртом—сырцом с концентрацией не более 45%.
- 3. Полностью перекрыть отбор дистиллята регулятором его отбора.
- 4. Проверить правильность сборки и герметичность системы патрубков.
- 5. Подключить приток и отвод охлаждающей воды к водопроводной сети и убедиться в правильности последовательного подключения теплообменника отводимого конденсата и самого конденсатора для работы в режиме противотока охлаждающей жидкости.
  - \* Полное время подготовки установки к работе занимает от 5 до 20 мин в зависимости навыков работы, необходимости дозаправки испарительной емкости, ее очистки, длительности подключения к водопроводной сети и т.п.
- 6. Подключить стенд к сети 220В и включить питание сети.
- 7. Подключить автоматизированный стенд к USB разъему компьютера и запустить программу Пуск → Программы → MeasLAB → «Ректификация» (рис. 3). Для более подробного знакомства работы с программным обеспечением, откройте описание «Руководство по работе с программным обеспечением».
- 8. Включить ВК1 переключатель работы нагревателя на стартовый режим 1 кВт.
- 9. После стабилизации показаний измерительных приборов, запустить в работу компьютерную систему автоматического измерения (рис. 3) параметров процесса и включить нагрев испарительной емкости, и по показаниям приборов проследить изменения температуры жидкости и парогазовой среды.

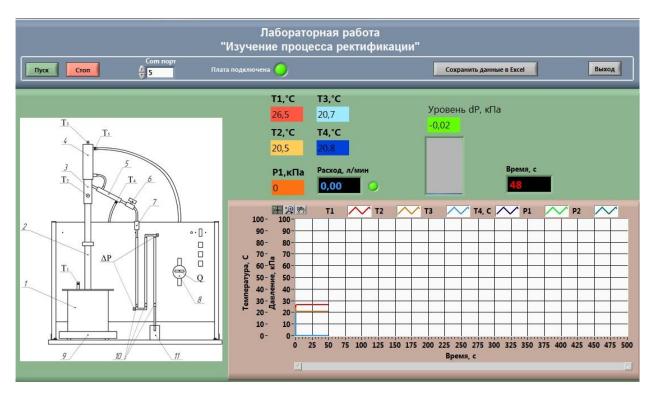


Рис. 3 – Внешний вид программы «Ректификация»

- 10. Проконтролировать последовательное поступление образующегося в испарительной ёмкости пара в ректификационную колонну и конденсатор; начало конденсации паров и образования дистиллята. Зафиксировать температуру кипения раствора, температуру и давление парогазовой среды в испарительной емкости, суммарное количество энергии, затраченное на нагрев жидкости, конструкции установки и потери тепла в окружающую среду и занести полученные данные в табл. 1.
- 11. Полностью открыть регулятор отбора дистиллята и сосчитать количество капель, поступающее в спиртоприемник за 20 секунд.
- 12. Установить флегмовое число не менее 4, установив регулятор отбора дистиллята на уменьшенное в 5 раз число капель за то же время.
- 13. При В верхней флегмы накоплении части колонны пара компонентов кубовой легкокипящих жидкости cпомощью управляемого вручную регулятора отбора дистиллята организуется медленный и последовательный отбор этих веществ в приемную

- емкость, с последующим их идентифицированием по компьютерным записям температуры паров, поступающих в конденсатор и учетом фактического атмосферного давления.
- 14. После выхода легкокипящих компонентов начинается наиболее продолжительный период работы по ректификации самого этилового спирта, который осуществляется при флегмовом числе не менее 3 и замене приемной емкости на новую. При этом важно не допустить захлебывания колонны, начало которого можно определить по возникновению характерных пульсаций на записи перепада давления в колонне и появлению звуков «булькающего» шума при работе установки. Отбор дистиллята установлен правильно, если через 5-15 мин после прекращения отбора температура паров в верхней части колонны не уменьшилась.
- 15. На этапе получения основного продукта измерить традиционными способами с помощью переносного термометра, мерной емкости и компьютерного секундомера и занести в таблицу значения медленно меняющихся параметров ректификации:
  - расхода воды, охлаждающей теплообменник и дефлегматор;
  - температуры воды, поступающей в теплообменник;
  - температуры воды, на выходе теплообменника;
  - температуры воды, поступающей в дефлегматор;
  - температуры воды на выходе из дефлегматора.
- 16. Завершить отбор пищевого спирта при превышении температуры его паров на 0.1 выше 78,3°C.
- 17. Произвести отбор хвостовых фракций примесей, содержавшихся в исходном сырье. Это не предполагает изменения настройки колонны, а лишь замену приемной емкости. Отбор хвостовых фракций завершается при достижении температуры пара в конденсаторе порядка 82-85°C.

- 18. После окончания работы выключить нагреватель испарительной ёмкости (кнопка ВК1). После того, как колона остынет, прекратить подачу воды на конденсатор и теплообменник. Выключиться систему измерения и цифровые измерительные приборы на лицевой панели установки.
- 19. Отключить установку от электрической сети.
- 20. После слива кубового остатка и очистки испарительной ёмкости, привести установку в исходное состояние.
- 21. Произвести обработку полученных данных и занести ее результаты в табл. 1.
- 22. Определить число теоретических тарелок ректификационной колоны и сравнить суммарную высоту 3 царг с полученным результатом.
- 23. Ответить на контрольные вопросы и сделать самостоятельные выводы по выполненной работе.

## Лабораторная работа 1. «Расчет минимального числа тарелок ректификационной колонны»

**Цель работы:** Научиться рассчитывать минимальное число тарелок ректификационной колонны по методу Фенске-Андервуда (в режиме полного орошения).

#### Задачи работы:

- 1. Рассчитать минимальное число тарелок колонны.
- 2. Рассчитать составы и расходы ректификата и кубового остатка.

#### Основные сведения

Режим полного орошения Минимальное число тарелок колонны определяется обычно по уравнению Фенске-Андервуда:

$$N_{\min} = \frac{\lg\left(\frac{x_{iD}}{x_{iW}} \cdot \frac{x_{kW}}{x_{kD}}\right)}{\lg\left(\frac{\alpha_{i}}{\alpha_{k}}\right)},\tag{1}$$

где  $\pmb{i}$  и  $\pmb{k}$  – любые два компонента смеси,  $\alpha_{i},\alpha_{k}$  - относительные летучести этих компонентов.

Из этого уравнения видно, что для определения минимального числа теоретических тарелок надо иметь данные о содержании двух компонентов в продуктах разделения. В этом случае обычно расчет ведут по ключевым компонентам, концентрации которых в кубовом остатке и дистилляте задаются с учетом практической необходимости. Концентрации обоих компонентов должны быть отличны от нуля в каждом из продуктов разделения, причем, чем выше значения концентраций, тем точнее расчет. Это требование необходимо учитывать при выборе ключевых компонентов.

Относительные летучести определяем как для идеального раствора, паровая фаза которого близка к идеальному газу. Это допущение уже было использовано ранее при расчете парциальных давлений узких фракций.

$$\alpha_i = \frac{P_i^0}{P_2^0} \qquad \alpha_k = \frac{P_k^0}{P_2^0} \tag{2}$$

 $P_{\rm i},\ P_{\rm k}$  — давления насыщенных паров ключевых компонентов ,  $P_{\scriptscriptstyle 9}$  — давление насыщенных паров эталонного компонента.

Ориентировочное распределение каждого компонента исходной смеси между продуктами разделения можно рассчитать, используя понятие температурной границы деления смеси (ТГДС). Для решения этой задачи надо знать состав смеси или иметь кривую ИТК.

Предположим, что в дистиллят желательно перевести максимум компонента k. Определим коэффициент обогащения по этому компоненту

$$\Psi_k = \frac{x_{kD}}{x_{kW}}. (3)$$

Тогда доля отгона будет равна

$$\varepsilon = \frac{x_{iF} - x_{iW}}{x_{iD} - x_{iW}} \tag{4}$$

Допустим, что некоторый гипотетический компонент, присутствующий в смеси в бесконечно малом количестве, кипит при температуре границы деления смеси *t*. Очевидно, что летучесть этого условного компонента равна единице, так как упругость его паров равна давлению смеси; равным единице можно считать и его коэффициент распределения.

Уравнение Фенске-Андервуда для любого компонента i тогда можно записать:

$$N_{\min} = \frac{\ln \frac{x_{iD}}{x_{iW}}}{\ln \alpha_{i,t}} = \frac{\ln \Psi_i}{\ln \alpha_{i,t}} = \frac{\ln \Psi_k}{\ln \alpha_{k,t}},$$
(5)

откуда

$$\ln \Psi_i = \ln \Psi_k \left( \frac{\ln \alpha_{i,t}}{\ln \alpha_{k,t}} \right) \tag{6}$$

В уравнениях (5,6)  $\alpha_{i,t}$ ,  $\alpha_{k,t}$  - коэффициенты относительной летучести i —го и k-го компонентов при температуре t. Компоненты или фракции, температуры кипения которых при давлении в системе меньше t, будут преимущественно переходить в дистиллят, а компоненты или фракции с большими температурами кипения — в куб.

Решая совместно уравнения (3), (4) и (6), получим выражения для составов кубового остатка и дистиллята.

$$x_{iD} = \frac{x_{iF} \psi_i}{1 + \varepsilon (\psi_i - 1)}; \tag{7}$$

$$x_{iW} = x_{iD} / \psi_i \tag{8}$$

Методом последовательных приближений можно найти температуру t, удовлетворяющую уравнению

$$\sum_{i=1}^{n} x_{iD} = 1 \qquad \sum_{i=1}^{n} x_{iW} = 1 \tag{9}$$

Использование понятия ТГДС позволяет задаваться содержанием в кубе и дистилляте только одного ключевого компонента, приняв в качестве второго псевдокомпонент с температурой кипения при давлении в колонне, равной ТГДС. Этот компонент поровну распределяется между кубом и дистиллятом.

Пример расчета минимального числа тарелок, выполненный в приложении Microsoft Excel, приведен в табл. 1 и 2.

Табл. 1

No	Ткип	% мс	Xi,	f	f	Pi,	ki=Pi/P	بخ	na.	Nmin	XiW	XiD
710	cp.,C	фр.	мольн	(Ткип)	(ТГДС)	кПа	K1—1 1/1	ک	ψ1	1111111	Alvv	AID
1	22,57	4,67	0,11	8,30	3,065	4811,9	47,643		13549218		1,27E-08	0,1720437
2	67,71	6,31	0,14	6,54	3,065	2607,5	25,817		1002189		2,06E-07	0,2069074
3	112,85	7,12	0,13	5,27	3,065	1303,8	12,909		52673,98		3,75E-06	0,1977456
4	158,00	7,71	0,12	4,33	3,065	600,1	5,942		1946,706		9,03E-05	0,1758646
5	203,14	8,17	0,10	3,61	3,065	253,5	2,510	0,76	50	4,25	0,003	0,15
6	248,28	8,57	0,09	3,05	3,065	98,4	0,974		0,895071	4,25	0,104627	0,0936483
7	293,42	8,91	0,07	2,60	3,065	35,7	0,353		0,012002		0,315566	0,0037873
8	338,56	9,21	0,06	2,23	3,065	13,0	0,129		0,000164		0,249759	4,099E-05
9	383,70	9,48	0,05	1,93	3,065	5,8	0,057		5,14E-06		0,166699	8,564E-07
10	428,85	9,73	0,05	1,67	3,065	3,7	0,037		8,26E-07		0,090934	7,513E-08
11	473,99	9,96	0,04	1,46	3,065	3,3	0,032		4,64E-07		0,044357	2,059E-08
12	519,13	10,18	0,04	1,27	3,065	3,2	0,031		4,11E-07		0,025313	1,039E-08
13	$\Sigma\Sigma$	100	1								1,000349	1,0000388

Метод Фенске - Андервуда

ſ							ТГДС,	Рои,
	кк№5	ψкк =	50		ТГДС №6	ψтгдс≈ 1	C	КПа
	XiW =	0,003	XiD=	0,15	ХтгдсW= 0,105	ХтгдсD = 0,094	247	101

#### Порядок выполнения работы

- 1. Ввести исходные данные, используя свой вариант фракционного состава нефти или газового конденсата (см. Приложение 1).
- 2. Рассчитать среднюю  $T_{\text{кип}}$  и мольную долю каждой фракции.
- 3. Вычислить константу фазового равновесия каждой фракции по уравнению Ашворта, приняв среднее давление в колонне в интервале 0,13 0,18МПа.
- 4. Исходя ИЗ технологических соображений, выбрать ключевой компонент и задать его концентрации в кубе и дистилляте или одну из концентраций и коэффициент обогащения по этому компоненту. Рекомендуется ключевого выбирать В качестве компонент с температурой кипения ниже предполагаемой ТГДС, следовательно, коэффициент обогащения для него будет больше единицы.
- 5. Итерациями найти ТГДС при которой выполняется условие (9). По полученным мольным составам продуктовых потоков найти их массовые составы.
- 6. Проверить соответствие фракционных составов продуктовых потоков колонны требованиям ГОСТ.
- 7. В случае соответствия, для своего варианта нагрузки колонны (Табл. 3) определить расходы дистиллята и кубового остатка, в противном случае повторить расчет с пп.4.
- 8. Оформить и защитить отчет.

Табл. 3

No	Расход	No	Расход
варианта	нефти/конденсата, кг/час	варианта	нефти/конденсата,
			кг/час
1	4000	7	5500
2	6500	8	4800
3	5000	9	6200
4	3500	10	5400
5	7000	11	3900
6	4500	12	5100

#### Контрольные вопросы

- 1. Как рассчитывается число тарелок и высота ректификационной колонны?
- 2. Верно ли, что при проведении процесса ректификации непрерывным способом при расчете числа ступеней изменения концентрации НК необходимо построение двух рабочих линий на фазовой диаграмме у-х?

## Лабораторная работа 2. «Определение минимального флегмового числа»

**Цель работы**: Научиться рассчитывать минимальное флегмовое число методом Андервуда. Освоить метод Львова — Серафимова для расчета флегмового числа и числа тарелок укрепляющей и исчерпывающей частей колонны.

#### Задачи работы:

- 1. Рассчитать минимальное флегмовое число колонны.
- 2. Определить место ввода сырья по уравнению Керкбрайда.

#### Основные сведения

Минимальное флегмовое число определяется по методу Андервуда. При этом сначала находится промежуточная характеристическая величина ω по уравнению

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{\alpha_{i/v} X_{iF}}{\alpha_{i/v} - \omega} = \varepsilon \tag{10}$$

где  $\alpha_{i/v}$  – относительная летучесть по высококипящему ключевому компоненту;

є- доля отгона питания ректификационной колонны. Рекомендации по определению температуры ввода питания приведены ниже. После определения данной температуры необходимо рассчитать соответствующую ей долю отгона.

Уравнение (10) решается методом последовательных приближений. Вычислив ω, находим минимальное флегмовое число из уравнения Андервуда

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{\alpha_{i/v} x_D}{\alpha_{i/v} - \omega} = R_{\min}$$
 (11)

Относительные летучести компонентов определяются при средней температуре по колонне. Для расчета средней температуры необходимо определить температуры верха и низа колонны.

Примем давление на верху колонны на 0,01МПа ниже давления в зоне тарелки питания. Температуру  $T_{верха}$  колонны определяем итерациями по уравнению:

$$\sum_{i=1}^{n} y_{iD} / k_i = 1 \tag{12}$$

при фиксированном составе (  $y_{iD} = x_{iD}$  ) и давлении.

Давление низа колонны выше давления в зоне тарелки питания на суммарное гидравлическое сопротивление тарелок. Если с выбором тарелок пока не определились, можно принять его на 0,03 – 0,05МПа выше давления на верху колонны. Температуру Т<sub>низа</sub> низа колонны определяем итерациями по уравнению (13) при фиксированном составе куба и фиксированном давлении:

$$\sum_{i=1}^{n} k_i x_{iW} = 1 \tag{13}$$

Если полученная температура выше температуры питания и не предусмотрен обогрев куба, принимаем температуру куба равной температуре питания. В противном случае принимаем среднюю температуру по колонне и температуру питания примерно равными. Высококипящий ключевой компонент следует выбирать вблизи ТГДС, хотя можно проверить и все компоненты смеси.

Для определения тарелки питания используют уравнение Керкбрайда:

$$\frac{N_1}{N_2} = \left[ \frac{W}{D} \left( \frac{x_{iF} x_{kW}}{x_{iD} x_{kF}} \right)^2 \right]^{0.206}$$
 (14)

где  $N_I$  ,  $N_2$  — число тарелок укрепляющей и исчерпывающей частей колонны, соответственно; i — индекс тяжелого ключевого компонента, k — индекс легкого ключевого компонента.

Еще один метод расчета минимального орошения - Львова-Серафимова.

В этом случае рассчитывают так называемое «псевдоминимальное» флегмовое число для каждой из разделяемых пар по уравнению

$$(z^{+}R_{\min}) = \frac{x_{i-k,D} - y_{i-k,F}}{y_{i-k,F} - x_{i-k,F}}$$
(15)

где

$$x_{i-k,D} = \frac{x_{iD}}{x_{iD} + x_{kD}} \qquad x_{i-k,F} = \frac{x_{iF}}{x_{iF} + x_{kF}}$$
$$y_{i-k,F} = \frac{\alpha_{i/k} x_{i-k,F}}{(\alpha_{i/k} - 1) x_{i-k,F} + 1}$$

Определяющей паре будет соответствовать максимальное значение произведения  $(z^+ \mathbf{R})$ . Далее расчет ведется по компонентам определяющей пары

Находят числа тарелок в укрепляющей  $N^+$  и исчерпывающей  $N^-$  частях колонны. Пусть определяющей, например, является пара c-d:

$$N^{+} = \frac{Ln\left(\frac{x_{c-d,D}}{1 - x_{c-d,D}} \cdot \frac{1 - x_{c-d,F}}{x_{c-d,F}}\right)}{Ln\alpha_{c/d}}$$
(16)

$$N^{-} = \frac{Ln \left( \frac{x_{c-d,F}}{1 - x_{c-d,F}} \cdot \frac{1 - x_{c-d,W}}{x_{c-d,W}} \right)}{Ln\alpha_{c/d}}$$
(17)

Далее находятся значения величин  $z^+$  и  $z^-$  на уровне тарелки питания по уравнениям:

$$z^{+} = \frac{1}{x_{cD} + x_{dD}} \cdot \frac{\alpha_{a/c}^{N+} x_{cD} + \alpha_{a/d}^{N+} x_{dD}}{x_{aD} + \sum_{i=2}^{n} \alpha_{a/i}^{N+} x_{iD}}$$
(18)

$$z^{-} = \frac{1}{x_{cW} + x_{dW}} \cdot \frac{\alpha_{c/a}^{N-} x_{cW} + \alpha_{d/a}^{N-} x_{dW}}{x_{aW} + \sum_{i=2}^{n} \alpha_{i/a}^{N-} x_{iW}}$$
(19)

Индекс a относится к наиболее легколетучему компоненту.

Находится истинное значение минимального флегмового числа, соответствующего заданному разделению рассматриваемой смеси:

$$R_{\min} = \frac{x_{c-d,D} - y_{c-d,F}}{y_{c-d,F} - x_{c-d,F}} \cdot \frac{1}{z^{+}}$$
 (20)

Очевидно, что метод Львова — Серафимова позволяет определять не только минимальное флегмовое число, но и число тарелок, соответствующее заданному разделению смеси в условиях минимального орошения. Кроме того, использование метода позволяет сразу определить номер тарелки питания сложной ректификационной колонны. Однако результаты, полученные данным методом для ректификации непрерывных смесей, как правило, существенно отклоняются от экспериментальных показателей работы колонн. Число тарелок, рассчитанное этим методом, несколько завышено.

Существует еще ряд довольно широко используемых методов расчета минимального орошения и минимального парового числа, например, метод инвариантных составов, который дает результаты, близкие к результатам, полученным методом Андервуда.

Пример расчета минимального флегмового числа методом Андервуда, выполненный в приложении Microsoft Excel, приведен в табл. 4 – 6.

Табл. 4

	Ткип	% мс	Xi,	f	f	f				
№	cp.,C	фр.	мольн	(Ткип)	(Тверха)	(Тниза)	Ріверх	Ріниз	ківерх	кіниз
1	22,57	4,67	0,11	8,301	3,716	2,197	2966,0	9170,8	19,77367	50,9487
2	67,71	6,31	0,14	6,540	3,716	2,197	1411,7	5909,9	9,41131	32,83279
3	112,85	7,12	0,13	5,274	3,716	2,197	610,1	3594,1	4,067277	19,96729
4	158,00	7,71	0,12	4,333	3,716	2,197	239,2	2058,0	1,59477	11,43307
5	203,14	8,17	0,10	3,614	3,716	2,197	85,5	1105,5	0,569832	6,14148
6	248,28	8,57	0,09	3,050	3,716	2,197	28,7	554,5	0,191028	3,080429
7	293,42	8,91	0,07	2,600	3,716	2,197	10,1	258,4	0,06724	1,435365
8	338,56	9,21	0,06	2,233	3,716	2,197	4,8	111,5	0,031891	0,619339
9	383,70	9,48	0,05	1,929	3,716	2,197	3,5	44,8	0,023206	0,249023
10	428,85	9,73	0,05	1,675	3,716	2,197	3,2	17,5	0,021406	0,097053
11	473,99	9,96	0,04	1,458	3,716	2,197	3,2	7,5	0,0211	0,041486
12	519,13	10,18	0,04	1,273	3,716	2,197	3,2	4,3	0,021058	0,023719
13	$\Sigma\Sigma$	100	1							

					αi -		
XiW	XiD	Bepx	Низ	kicредн.	т.к.№8	расчет ω	Rmin
1,41E-08	0,172044	0,008701	7,18E-07	38,104	94,31683	0,132836	0,002467
2,24E-07	0,206907	0,021985	7,35E-06	21,675	53,65099	0,16151	0,005273
3,97E-06	0,197746	0,048619	7,93E-05	11,448	28,33663	0,157956	0,009764
9,28E-05	0,175864	0,110275	1,06E-03	5,6	13,86139	0,148138	0,018717
0,003	0,15	0,263236	1,84E-02	2,528	6,257426	0,146007	0,040618
0,103711	0,093936	0,491738	3,19E-01	1,051	2,601485	0,197494	0,098769
0,315981	0,003657	0,054389	4,54E-01	0,404	1	-0,2347	-0,01463
0,249791	3,08E-05	0,000966	1,55E-01	0,148	0,366337	-0,02261	-4,2E-05
0,166701	3,20E-07	1,38E-05	4,15E-02	0,058	0,143564	-0,0048	-3,6E-07
0,090934	1,07E-08	4,98E-07	8,83E-03	0,03	0,074257	-0,00128	-1,1E-08
0,044358	1,65E-09	7,82E-08	1,84E-03	0,023	0,056931	-0,00047	-1,7E-09
0,025313	7,00E-10	3,32E-08	6,00E-04	0,021	0,05198	-0,00025	-7,3E-10
0,999886	1,000184	0,999922	1,00E+00			0,67983	0,16094

Табл. 6

Рверха	Рниза			фактор Ф
150	180			1,333372
Тверха	Тниза	Тср.=Твх.	є сырья	
195,9655	343,5025	269,734	0,68	

#### Порядок выполнения работы

- 1. Определить Тверха
- 2. Определить  $T_{\text{низа}}$
- 3. Определить  $T_{cp}$
- 4. Если необходимо, рассчитать долю отгона питания
- 5. Определить коэффициенты относительной летучести
- 6. Определить ω
- 7. Определить  $R_{min}$  методом Андервуда
- 8. Определить место ввода сырья
- 9. Определить  $R_{min}$ , число тарелок и номер тарелки питания методом Львова Серафимова
- 10. Оформить и защитить отчет

### Контрольные вопросы

- 1. Что такое флегма и флегмовое число?
- 2. В чем суть метода Андервуда?
- 3. Как определяется рабочее флегмовое число и как его значение влияет на энергетические затраты и размеры ректификационной колонны?

### Лабораторная работа 3. «Определение оптимального числа тарелок, флегмового числа и диаметра колонны»

**Цель работы:** Научиться рассчитывать диаметр и определять основные конструктивные размеры колонны.

#### Задачи работы:

- 1. Экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи при течении в трубах и внешней свободной конвекции
- 2. Сравнение интенсивности конвективного теплообмена тел при ламинарном и турбулентном движении окружающей среды.
- 3. Изучение особенностей конвективного теплообмена при поперечном обтекании пучка труб.

#### Основные сведения

Оптимальное число тарелок рассчитывается по эмпирическому соотношению, связывающему оптимальное и минимальное число тарелок:

$$N_{opt} = 1,70N_{\min} + 0,70 \tag{21}$$

Оптимальное орошение рассчитывается по эмпирическому уравнению, связывающему минимальное и оптимальное орошение:

$$R_{ont} = 1,35R_{\min} + 0,35 \tag{22}$$

Диаметр ректификационной колонны определяется из уравнения расхода:

$$D_k = \sqrt{\frac{4V_0}{\pi w_0}} \tag{23}$$

где  $D_k$  – внутренний диаметр колонны, м;

 $V_0$  – объемный расход пара в колонне, м<sup>3</sup>/с;

 $w_0$  — допустимая скорость пара, м/с.

Допустимая скорость пара в свободном сечении колонны рассчитывается таким образом, чтобы минимизировать унос флегмы паровым потоком на вышерасположенную тарелку:

$$\omega_0 = 8,47 \cdot 10^{-4} C1 \left( \frac{\rho_{xc} - \rho_n}{\rho_n} \right)^{\frac{1}{2}}$$
 (24)

где  $\rho_{\rm ж}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

 $\rho_{\pi}$  – плотность пара, кг/м<sup>3</sup>;

С1 — эмпирический коэффициент, зависящий от расстояния между тарелками и поверхностного натяжения жидкости.

Плотность паров рассчитывается по уравнению, выведенному из уравнения состояния идеального газа Менделеева-Клапейрона с учетом коэффициента сжимаемости:

$$\rho = \frac{PM}{zRT} \tag{25}$$

где  $\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>;

P – среднее давление в колонне, Па;

M — молекулярная масса, кг/моль;

R — универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К;

T – средняя температура в колонне, K;

z — коэффициент (фактор) сжимаемости газа.

Фактор сжимаемости является функцией приведенных параметров:

$$z = 1 - (0.73\tau_{np} - 0.18)\pi_{np} \tag{26}$$

где  $au_{np}$ ,  $\pi_{np}$  - приведенные температура и давление, соответственно.

Для соединений, нормальная температура которых не превышает 235K, используют выражение для расчета критической температуры:

$$T_{_{KD}} = 1.7T_{_{KUD}} - 2 \tag{27}$$

Для соединений с более высокими нормальными температурами кипения:

$$T_{\kappa p} = 1.027 T_{\kappa un} + 159 \tag{28}$$

Критическое давление (Па) рассчитывается по уравнению Льюиса:

$$\pi_{\kappa p} = K \frac{T_{\kappa p} 10^5}{M} \tag{29}$$

где M – средняя молекулярная масса;

K — константа, которая для продуктов прямой перегонки нефти равна 6.3-6.4

Рассчитываем коэффициент сжимаемости для каждой фракции. Рассчитываем плотность каждой фракции по уравнению (25). Для расчета плотности смеси газов используем принцип аддитивности.

$$\rho_{\scriptscriptstyle CM} = \sum y_i \cdot \rho_i \tag{30}$$

где  $\rho_{c_{M}}$  - плотность смеси газов, кг/м<sup>3</sup>;

 $\rho_i$  - плотность i-го компонента, кг/м<sup>3</sup>;

 $y_i$  — объемная доля i-го компонента в смеси.

Плотность фракций при T=293К приведена в исходных данных. Для пересчета плотности нефтяных фракций и нефтепродуктов с одной температуры на другую пользуются уравнением:

$$\rho_T = \rho_{277}^{293} - \gamma (T - 293)$$

$$\gamma = 0.001828 - 0.00132 \rho_{277}^{293}$$
(31)

где  $ho_T$  – плотность нефтепродукта при температуре T, кг/м $^3$ ;

 $ho_{277}^{293}$  – относительная плотность нефтепродукта;

T – средняя температура в колонне, К.

Поверхностное натяжение флегмы рассчитывается в зависимости от плотности жидкости при средней температуре в колонне:

$$\sigma = 0.515 \rho_T - 0.0166 \tag{32}$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение, H/M.

При значениях  $\sigma \ge 2*10^{-2}$  H/м коэффициент C1 определяется из графика, приведенного на рис.1 При  $\sigma < 2*10^{-2}$  H/м вводят поправку по следующему уравнению:

$$C1 = C1_2 \sqrt[4]{\frac{\sigma}{2 \cdot 10^{-2}}} \tag{33}$$

где  $C1_2$  – значение коэффициента C1, найденное из графика (рис.4).

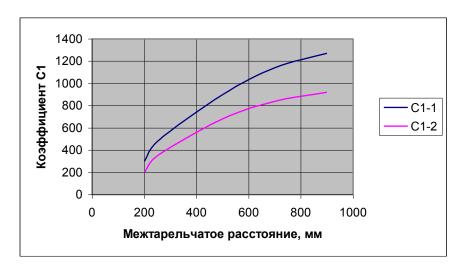


Рис. 4Зависимость коэффициента С1 от межтарельчатого расстояния.

C1-1 – кривая максимальных нагрузок для колпачковых тарелок и нормальных нагрузок для провальных, ситчатых и других типов тарелок;

С1-2 – кривая нормальных нагрузок для колпачковых тарелок.

Предварительно зададимся межтарельчатым расстоянием  $h_{\scriptscriptstyle T}=300$  - 500мм.

Объемный расход пара считается из массового расхода:

$$V_0 = \frac{G_{\text{\tiny Macc}}}{\rho_{\text{\tiny napa}}} \tag{34}$$

Массовый расход рассчитываем, исходя из массовой доли отгона, которая связана с мольной долей отгона соотношением:

$$\varepsilon_m M_F = \varepsilon M_G \tag{35}$$

где  $\varepsilon_{m}, M_{F}, M_{G}$  - массовая доля отгона, средняя мольная масса сырья и средняя мольная масса пара, соответственно.

Средние мольные массы потоков находятся по правилу аддитивности:

$$M_{cp} = \sum M_i x_i \tag{36}$$

Массовый расход пара равен:

$$G_{\text{\tiny MACC}} = \varepsilon_{\text{\tiny m}} G_{\text{\tiny MOJBH}} \tag{37}$$

Рассчитав минимальный диаметр колонны, выбираем ближайший больший стандартный диаметр, используя ГОСТ 21944-76 (см. приложение 3).

Выбор конструкции тарелки проводят по следующим показатеям:

- производительность,
- эффективность при разных рабочих нагрузках,
- гидравлическое сопротивление
- диапазон нагрузок в условиях высокой эффективности,
- механические и конструкционные характеристики (металлоемкость, простота изготовления, монтажа и ремонта и пр.)

Сравнительная характеристика тарелок различных типов представлена в табл.7.

Табл. 7

					1 W	031. /
Тарелка	Относи- тельная паровая нагрузка (G <sub>n</sub> /L <sub>ж)</sub>	к.п.д. тарелк и, %	рабочий диапазон $(G_{max}/G_{min})$	сопротивление тарелки, мм. вод. ст.	возможное расстояние между тарелками, мм	масса, кг/м <sup>2</sup>
колпачковая	1	80	4-5	45-80	400-800	105
туннельная (желобчатая)	0.7- 0.8	65	3-4	50-85	400-600	110
из S- образных элементов	1.1 -1.2	85	4-5	45-80	400-800	55
клапанная	1.2 -1.3	80	5-8	45-60	300-600	55
ситчатая	1.2 -1.3	80	4-5	40-60	400-800	35
струйная	1 1.35	80	3-4.5	40-70	400-600	65
решетчатая провальная	1.5 -2.0	70	1.5-2.5	25-40	200-400	40

Очевидно, что для выбора типа контактного устройства необходимо знать расход жидкости по колонне. Для зоны выше тарелки питания (укрепляющая секция) расход жидкости будет равен расходу флегмы, а для исчерпывающей части: Ф+ L, где L – расход жидкости после однократного испарения сырья, определенный ранее.

Высота тарельчатой части колонны H (мм) рассчитывается по уравнению:

$$H = N \cdot h + s \cdot N \tag{38}$$

где N – число тарелок;

h – расстояние между тарелками, мм;

s – толщина тарелки, мм.

Колонна эллиптические имеет днища, ограничивающие ee цилиндрическую часть сверху и снизу. Длина цилиндрической обечайки от верхнего днища до первой тарелки колонны должна составлять не менее 500 мм, т.к. в этой части обечайки необходимо разместить штуцеры для ввода флегмы и термометра, измеряющего температуру в верхней части колонны. Кроме τογο, В этой части колонны должно быть размещено распределительное устройство для создания равномерного потока орошения.

Длина цилиндрической обечайки от нижнего днища до последней тарелки колонны должна составлять не менее 1000 мм, т.к. в этой части обечайки необходимо разместить штуцеры для ввода питания, отбора жидкости из куба, измерителя уровня.

Общая высота колонны (без опоры) рассчитывается с учетом вышеприведенных замечаний. Для колонн данного типа, как правило, применяется юбочная опора, стандартная высота который зависит от рассчитанной общей высоты колонны и ее диаметра. Определение высоты и типа опоры требует расчета колонны на ветровую и сейсмические нагрузки. Рекомендуется принять цилиндрическую опору высотой 500 – 1000 мм.

#### Порядок выполнения работы

- 1. Рассчитать оптимальное число тарелок.
- 2. Рассчитать оптимальное флегмовое число.
- 3. Рассчитать плотность парового потока.
- 4. Рассчитать плотность потока жидкости.
- 5. Рассчитать вязкость жидкости.
- 6. Определить коэффициент С1.
- 7. Рассчитать допустимую скорость пара в колонне.
- 8. Определить диаметр колонны.
- 9. Выбрать тип тарелок ректификационной колонны.
- 10. Подобрать крышку, днице и опору аппарата.
- 11. Определить общую высоту, выполнить схематическое изображение аппарата с основными размерами.
- 12. Оформить и защитить отчет.

#### Контрольные вопросы

- 1. Верно ли, что определение числа ступеней изменения концентрации НК необходимо для расчета диаметра колонны?
- 2. Флегмовое число и его влияние на качество разделения исходной смеси ректификационной колонны?
- 3. Как изменяются эксплуатационные расходы с увеличением флегмового числа?

# Лабораторная работа 4. «Ректификация смеси этилового спирта и воды»

**Цель работы:** Знакомство с устройством ректификационной установки периодического действия.

#### Задачи работы:

- 1. Изучение принципов управления ректификационной установкой.
- 2. Приобретение навыков вывода установки на рабочий режим.
- 3. Проведение ректификации смеси этилового спирта и воды.
- 4. Изучение работы клапанной тарелки.
- 5. Составление материального и теплового балансов процесса ректификации.
- 6. Определение коэффициента полезного действия клапанной тарелки.

#### Основные сведения

Ректификация — процесс разделения жидких гомогенных смесей путем взаимного обмена компонентами между жидкостью и паром, получаемым испарением разделяемой смеси. Этот процесс основан на различной летучести компонентов, составляющих смесь, т.е. на различии температур их кипения при одном и том же давлении.

Процесс ректификации осуществляют в колоннах, представляющих собой вертикальные цилиндрические аппараты с контактными устройствами. Наибольшее распространение в промышленности получили ректификационные колонны, в которых в качестве контактных устройств используются колпачковые, ситчатые и провальные тарелки [1, 2]. В ректификационной колонне навстречу друг другу проходят неравновесные по составу потоки пара и жидкости. Пар в колонне идет снизу вверх, а жидкость стекает сверху вниз. В результате контактного взаимодействия пар обогащается более летучим (низкокипящим) компонентом, а жидкость – менее летучим (высококипящим). Развитая поверхность контакта фаз на

тарелках образуется пузырьками и струями пара при многократном его прохождении (барботаже) через слои жидкости.

Основной задачей ректификационных установок В пищевой промышленности является получение спирта - ректификата с концентрацией спирта не менее 96% при минимальном содержании посторонних примесей 40%-ного спирта-сырца. Известно, что этиловый спирт хорошо ИЗ растворяется в воде, образуя бинарную водно-спиртовую смесь с различным 100% содержанием спирта. Температура кипения ЭТИЛОВОГО (t<sub>кип</sub>=73,8°C при давлении 760 мм рт. ст.) значительно отличается от свойств дистиллированной воды и это различие используется при разделении компонентов различных спиртосодержащих материалов для получения спирта высокой концентрации. Различают молярную, массовую и объемную Традиционно В пищевой химической концентрации спирта. И промышленности используется понятие объемной концентрации, отношения объема растворенной жидкости к объему всего раствора. Эта величина выражается в процентах и обозначается как % об. или в долях  $M^3/M^3$ , л/л, мл/мл. Из-за различий в плотности спирта ( $\rho = 0.790 \text{ г/мл}$ ) и воды  $(\rho = 1,000 \text{ г/мл})$  и характеристик их температурного расширения объемные и весовые концентрации не всегда корректно переводятся друг в друга.

Выделение из водно-спиртовой смеси спирта должно осуществляться кипения, соответствующей концентрации смеси, при температуре постоянному давлению паров над смесью. При давлении 760 мм рт. ст. температура кипения различных по концентрации водно-спиртовых смесей практически непрерывно уменьшается от 100°C при концентрации спирта 0% 78.3°C при 100%. Исключение составляет некоторая концентраций близи точки азеотропы (94,6%), где температура кипения становится несколько ниже температуры кипения 100%-ного спирта (рис.5). Азеотропными или нераздельно кипящими называют смеси, у которых пар, находящийся в равновесии с жидкостью и имеющий тот же состав, что и кипящая смесь.

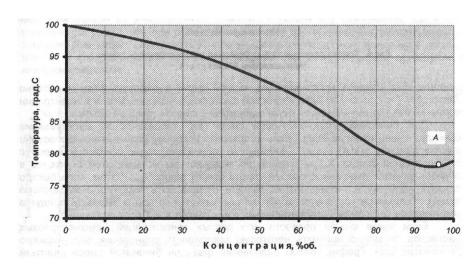


Рис.5— Зависимость температуры насыщенного водно-спиртового пара при давлении 760 мм рт.ст.

Разделение таких смесей ректификацией невозможно, так как при конденсации паров получается жидкость такого же состава, что и исходная смесь, которую называют «этиловый спирт - ректификат». Температура его кипения равна 78,15°C, а концентрация спирта, устанавливаемая Государственным стандартом РФ - от 96 до 96,4 %. При этом плотность конденсированной жидкости при 20 °C равна 8.12 г/мл, плотность паров при 760 мм рт.ст. - 1, 601 г/мл, а удельная теплота парообразования - 925 Дж/г.

Для получения спирта-ректификата применяются установки непрерывного действия (рис. 6). В них спирт-сырец и перегретый водяной пар смешиваются в нижней части ректификационной колонны и превращаются водно-спиртовой пар с температурой 94°C.

Исходная смесь хранится в баке-хранилище 3, из которого насосом 9 через фильтр 11 подается в напорный бак 4. Из напорного бака 4 исходная смесь самотеком через ротаметр поступает в подогреватель, расположенный в кубе 2, где она нагревается кубовым остатком. Температуру исходной смеси после подогрева определяют по показанию термометра. В ректификационную колонну 1 подогретая исходная смесь поступает на 7, 9 или 11 тарелки, считая сверху. Колонна имеет 12 ситчатых тарелок с сегментными сливными устройствами. Внутренний диаметр колонны 200мм.

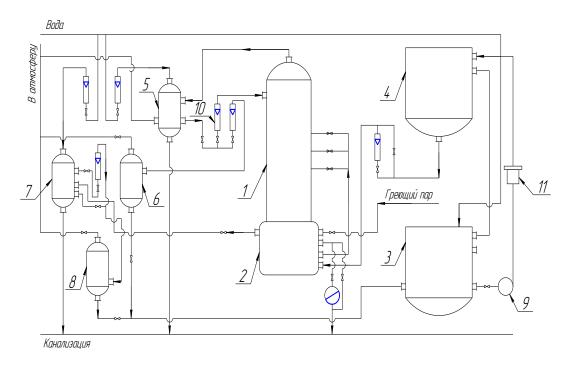


Рис.6— Принципиальная схема промышленной установки непрерывного действия с использованием греющего пара

1 — Ректификационная колонна; 2 — куб; 3 — бак-хранилище; 4 — напорный бак; 5 — дефлегматор; 6 — сборник дистиллята; 7 — холодильник кубового остатка; 8 — сборник кубового остатка; 9 — насос; 10 — ротаметр; 11 — фильтр

С нижней тарелки жидкость стекает в куб-испаритель 2, имеющий внутри змеевик, обогреваемый паром. Конденсат греющего пара из змеевика отводится в канализацию через конденсационный горшок. Расход греющего пара регулируется вентилем, а давление определяется по манометру. В кубе-испарителе часть жидкости превращается в пар, а другая отводится в качестве кубового остатка. Кубовый остаток проходит холодильник 7, где охлаждается водой, и поступает в сборник 8. Из сборника 8 кубовый остаток возвращается в бак-хранилище 3. Сборники 6, 8 и межтрубное пространство дефлегматора 5 сообщены с атмосферой, что обеспечивает работу колонны под атмосферным давлением. С верхней тарелки колонны пар, обогащенный низкокипящим компонентом, поступает в дефлегматор 5, который также охлаждается водой. Расход воды измеряется ротаметром, а температура ее на входе и выходе — термометрами. Жидкость, образовавшаяся в дефлегматоре

после полной конденсации пара, делится на две части. Одна в виде флегмы подается на орошение колонны, а другая отбирается в виде дистиллята, который поступает в сборник 6 и далее направляется в бак-хранилище 3. Количество флегмы и дистиллята измеряется ротаметрами.

Колонна оборудована пробоотборниками жидкости с тарелок, флегмы, дистиллята, жидкости в кубе, а также пробоотборниками пара, поступающего на тарелку, и покидающего пенный слой. Пробоотборники пара снабжены теплообменниками типа «труба в трубе», в которых пробы пара конденсируются, и конденсат собирается в отдельные ёмкости. На каждой тарелке колонны установлены датчики температуры, работающие в комплекте с вторичным прибором. Знание температуры жидкости на тарелках позволяет определить профиль температуры по высоте колонны.

#### Порядок выполнения работы

- 1. Ознакомиться со схемой лабораторной установки и расположением приборов. Составить ее описание и заготовить таблицы для регистрации результатов испытаний.
- 2. Заполнить испарительную емкость на 3/4 спиртом—сырцом с концентрацией не более 45%.
- 3. Проверить правильность сборки и герметичность системы патрубков.
- 4. Подключить приток и отвод охлаждающей воды к водопроводной сети и убедиться в правильности последовательного подключения теплообменника отводимого конденсата и самого конденсатора для работы в режиме противотока охлаждающей жидкости.
- 5. Подключить стенд к сети 220 В и включить питание сети.
- 6. Подключить автоматизированный стенд к USB разъему компьютера и запустить программу Пуск  $\rightarrow$  Программы  $\rightarrow$  MeasLAB  $\rightarrow$  «Ректификация» (рис.3).

- 7. Включить ВК1 переключатель работы нагревателя на стартовый режим 1 кВт.
- 8. После стабилизации показаний измерительных приборов, запустить в работу компьютерную систему автоматического измерения (рис.3) параметров процесса и включить нагрев испарительной емкости, и по показаниям приборов проследить изменения температуры жидкости и парогазовой среды.
- 9. Проконтролировать последовательное поступление образующегося в испарительной ёмкости пара в ректификационную колонну и конденсатор; начало конденсации паров и образования дистиллята. Зафиксировать температуру кипения раствора, температуру и давление парогазовой среды в испарительной емкости, суммарное количество энергии, затраченное на нагрев жидкости, конструкции установки и потери тепла в окружающую среду и занести полученные данные в табл.8.
- 10.Полностью открыть регулятор отбора дистиллята и сосчитать количество капель, поступающее в спиртоприемник за 20 секунд.
- 11. Установить флегмовое число не менее 4, установив регулятор отбора дистиллята на уменьшенное в 5 раз число капель за то же время.
- 12.При накоплении верхней части колонны пара флегмы легкокипящих компонентов кубовой cжидкости помощью управляемого вручную регулятора отбора дистиллята организуется медленный и последовательный отбор этих веществ в приемную емкость, с последующим их идентифицированием по компьютерным записям температуры паров, поступающих в конденсатор и учетом фактического атмосферного давления.
- 13.После выхода легкокипящих компонентов начинается наиболее продолжительный период работы по ректификации самого этилового спирта, который осуществляется при флегмовом числе не менее 3 и замене приемной емкости на новую. При этом важно не допустить

захлебывания колонны, начало которого можно определить по возникновению характерных пульсаций на записи перепада давления в колонне и появлению звуков «булькающего» шума при работе установки. Отбор дистиллята установлен правильно, если через 5-15 мин после прекращения отбора температура паров в верхней части колонны не уменьшилась.

- 14.На этапе получения основного продукта измерить традиционными способами с помощью переносного термометра, мерной емкости и компьютерного секундомера и занести в таблицу значения медленно меняющихся параметров ректификации:
  - расхода воды, охлаждающей теплообменник и дефлегматор;
  - температуры воды, поступающей в теплообменник;
  - температуры воды, на выходе теплообменника;
  - температуры воды, поступающей в дефлегматор;
  - температуры воды на выходе из дефлегматора.
- 15.Завершить отбор пищевого спирта при превышении температуры его паров на 0.1 выше 78,3°C.
- 16.Произвести отбор хвостовых фракций примесей, содержавшихся в исходном сырье. Это не предполагает изменения настройки колонны, а лишь замену приемной емкости. Отбор хвостовых фракций завершается при достижении температуры пара в конденсаторе порядка 82-85°C.
- 17.После окончания работы выключить нагреватель испарительной ёмкости (кнопка ВК1). После того, как колона остынет, прекратить подачу воды на конденсатор и теплообменник. Выключиться систему измерения и цифровые измерительные приборы на лицевой панели установки.
- 18.Отключить установку от электрической сети.
- 19.После слива кубового остатка и очистки испарительной ёмкости, привести установку в исходное состояние.

- 20.Произвести обработку полученных данных и занести ее результаты в табл.8.
- 21.Определить число теоретических тарелок ректификационной колоны и сравнить суммарную высоту 3 царг с полученным результатом.

#### Медленноменяющиеся параметры процесса

Расход воды, охлаждающей теплообменник и дефлегматор	л/c
Температура воды, поступающей в теплообменник	0C
Температура воды, на выходе теплообменника	0C
Температура воды, поступающей в дефлегматор	0C
Температура воды на выходе из дефлегматора	0

Табл. 8. Результаты измерений и вычислений.

$N_0N_0$		Te	екущие	значени	ИЯ	Среднее
$\Pi/\Pi$	Наименование параметров и	К	онтрол	ируемы	X	значение
	единицы их измерения		парам	етров		
		ιο,	ւլ,	<b>l</b> 2,	ικ,	
	1 11					
1 1	1. Нагрев исходного сырья до тем					
1. 1	Время нагрева до начала кипения жидкости, мин	0	10	20		
1.2	Температура исходной смеси после подогрева, <sup>0</sup> C,					
1.3	Давление парогазовой смеси на входе в колонну, кПа					
1.4	Температура пара и флегмы в конденсаторе, кПа					
1.5	Электрическая энергия, выделяемая нагревателем, кол-					
	во импульсов счетчика					
	2. Начальный период ректифика	ции. О	тбор го	ловны	х фран	сций
2.1	Время испарения легкокипящих фракций, мин					
2.2	Температура кипения жидкости, °С					
2.3	Температура пара и флегмы в колонне, кПа					
2.4	Температура пара в конденсаторе , кПа					
2.5	Давление парогазовой смеси на входе в колонну, кПа					

2.6	П	I	I	1	I	
2.6	Давление столба дистиллята в					
	гидростатическом плотномере,					
	кПа					
2.7	Расход отбираемого					
	дистиллята, кол-во капель за 20					
	секунд					
2.8	Электрическая энергия,					
2.0	1 1					
	выделяемая нагревателем, кол-					
	во импульсов счетчика					
	3. Основной период ректификаци	и этил	ового (	спирта	1	
3.1	Время испарения легкокипящих					
	фракций, мин					
3.2	Температура кипения					
	жидкости, °С					
3.3	Температура пара и флегмы в					
	колонне, кПа					
3.4	Температура пара в					
3.1	конденсаторе, кПа					
3.5						
3.3	Давление парогазовой смеси на					
2.6	входе в колонну, кПа					
3.6	Давление столба дистиллята в					
	гидростатическом плотномере,					
	кПа					
3.7	Расход отбираемого					
	дистиллята, кол-тво капель за					
	20 секунд					
3.8	Электрическая энергия,					
	выделяемая нагревателем, кол-					
	во импульсов счетчика					
1 201	<sub>т во импульсов с тет ижа</sub> вершающий период ректифика		Οπδου	VDOO	FODI IV	
	= = = = =	ции .	Oroop	ABUC	IUBBIA	
фракц		I	I	1	I	
4.1	Время испарения легкокипящих					
	фракций, мин					
4.2	Температура кипения					
	жидкости, °С					
4.3	Температура пара и флегмы в					
	колонне, кПа					
4.4	Температура пара в					
	конденсаторе, кПа					
4.5	Давление парогазовой смеси на					
	входе в колонну, кПа					
4.6	Давление столба дистиллята в					
4.0						
	гидростатическом плотномере,					
4.5	кПа					
4.7	Расход отбираемого					
	дистиллята, кол-тво капель за					
	20 секунд					
4.8	Электрическая энергия,					
	выделяемая нагревателем, кол-					
	во импульсов счетчика					
4.9	Концентрация кубового остатка	_	_	_		
1	1 realitation badding reality of the little	Ī	Ī	l	ĺ	1

	X <sub>w</sub> , %			
4.10	Концентрация дистиллята X <sub>w.</sub> %			

#### Обработка данных

Для средних значений параметров основного этапа ректификации по объемным вычисляют мольные концентрации спирта в исходной смеси  $X_F$  и дистилляте  $X_p$ . Пересчитывают расходы исходной смеси F и дистиллята P в мольные. Из уравнений материального баланса колонны находят расход и концентрацию кубового остатка по уравнениям

$$W=F-P,$$

$$X_{w}=(FX_{F}-PX_{p})/W,$$

Где F, P, W-расходы исходной смеси, дистиллята, кубового остатка, кмоль/с;

 $X_{\rm f}$ .  $X_{\rm p}$ .  $X_{\rm w}$ -составы исходной смеси, дистиллята, кубового остатка, мол. доли.

Определяют флегмовое число R – отношение расхода флегмы к расходу дистиллята и рассчитывают количество пара G, поднимающегося по колонне. Зная величину G и диаметр колонны ( $\mathcal{L}_y$ = 20 мм), определяют скорость пара в свободном сечении колонны w. Скорость пара в колонне можно также рассчитать, определив количество пара из уравнения теплового баланса дефлегматора [1, 2] (этот расчет может быть использован как проверочный).

По справочным данным строят на миллиметровой бумаге кривую равновесия y=f(x) на диаграмме y-x (рис.3) и отмечают на оси абсцисс значения концентраций исходной смеси  $X_F$  дистиллята  $X_p$  и кубового остатка  $X_w$ .

Затем на диаграмму у-х наносят рабочие линии для укрепляющей и исчерпывающей частей колонны. Уравнения рабочих линий, получают из уравнений материального баланса. Они имеют следующий вид: для укрепляющей части колонны

$$y = \frac{R}{R+1}x + \frac{x_p}{R+1}$$

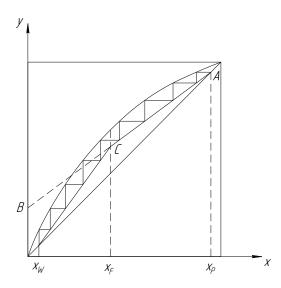


Рис.7 – Определение числа теоретических тарелок

для исчерпывающей части колонны

$$y = \frac{R+f}{R+1}x + \frac{1-f}{R+1}x_{w}$$

где x, y-концентрация жидкости и пара в любом сечении колонны, мол. доли;

f – отношение расхода исходной смеси к расходу дистиллята.

Вычисляют отрезок  $^{B=x_p/(R+1)}$ , который отсекает рабочая линия верхней части колонны на оси ординат (рисунок 6). Через точку А ( $x_p=y_p$ ) и полученный отрезок проводят рабочую линию верхней части колонны. Через точку Д ( $x_w=y_w$ ) и точку С проводят рабочую линию нижней части колонны. Между равновесной и рабочими линиями строят ступени изменения концентраций (рис.7). Каждая ступень соответствует одной теоретической тарелке. Определив число теоретических ступеней  $n_T$ , и, зная число реальных тарелок в колонне  $n_T$ , находят среднее значение КПД тарелки по уравнению

$$\eta = \frac{n_{\delta}}{n}$$

Величина КПД тарелки зависит от гидродинамических условий и физико-химических свойств пара и жидкости.

При работе колонны «на себя» дистиллят не отбирается, т.е. флегмовое число равно бесконечности  $^{R=R_{\infty}}$ . В этом случае рабочая линия колонны совпадает с диагональю.

#### Контрольные вопросы

- 1. Какой процесс разделения веществ называется ректификацией? Какие при этом используются отличия физических свойствах разделяемых веществ?
- 2. Какие смеси называют смеси азеотропными или нераздельно кипящими? Почему их нельзя разделить с помощью ректификации?
- 3. Почему стандарт устанавливает концентрацию спирта-ректификата, равную %. Какие дополнительные требования предъявляются к этому продукту?
- 4. Как устроена ректификационная колонна? Какие устройства используются в ней в качестве элементов для увеличения контактного взаимодействия движущихся в колонне фаз?
- 5. С чем связано захлебывание ректификационной колонны? Как можно его обнаружить и предотвратить?
- 6. Как работает ректификационная колонна при равенстве флегмового числа нулю? Как меняется степень очистки и концентрация получаемого этилового спирта?

# Приложение 1

## Вариант 1

№	Температура	Выход на не	ефть, % масс.	Плотность	Показатель	Молекул.
фракции	выкипания	отдельных	суммарный	г/см <sup>3</sup>	преломлен.	Macca,
	фракции, °С	фракций			$n_B^{20}$	M
	10.10	0.21	0.05	0.5011		
1	10-40	8,31	8,35	0,6311	1.3615	67
2	40-70	3,88	12,32	0,6664	1,3772	76
3	70-90	3,08	15,31	0,7138	1,4000	97
4	90-100	3,27	18,58	0,7248	1,4060	102
5	100-120	3,46	22,04	0,7415	1,4145	107
6	120-140	4,30	26,34	0,7537	1,4220	117
7	140-160	4,44	30,78	0,7714	1,4315	128
8	160-180	3,92	34,70	0,7861	1,4402	138
9	180-200	3,04	37,74	0,8074	1,4510	150
10	200-220	3,90	41,64	0,8154	1,4560	166
11	220-240	3,75	45,39	0,8309	1,4670	180
12	240-260	3,95	49,34	0,8427	1.4735	196
13	260-280	3,92	53,26	0,8507	1,4780	215
14	280-300	4,15	57,41	0,8564	1,4810	234
15	300-320	3,95	61,36	0,8652	1,4850	255
16	320-350	4,58	65,94	0,8802	1,4940	277
17	474	34,06	100	0,921		471

№	Температура	Выход на не	ефть, % масс.	Плотность	Показатель	Молекул.
фракции	выкипания	отдельных	суммарный	г/см <sup>3</sup>	преломлен.,	масса
	фракции, °С	фракций			n <u>20</u>	
					D	
1	10-70	4,39	4,39	0,6605	1,3820	67
2	70-100	4,91	9,30	0,7246	1,4050	92
3	100-120	4,01	13,31	0,7355	1,4145	110
4	120-150	3,46	16,77	0,7646	1,4280	117
5	150-170	3,67	20,44	0,7752	1,4342	129
6	170-190	3,80	24,24	0,7888	1,4418	144
7	190-210	3,12	27,36	0,8098	1,4552	157
8	210-230	4,14	31,50	0,8201	1,4598	176
9	230-250	4,95	36,45	0,8338	1,4680	190
10	250-270	3,42	39,87	0,8433	1,4740	208
11	270-290	2,22	42,09	0,8490	1,4762	221
12	290-320	6,49	48,58	0,8548	1,4790	242
13	320-350	7,17	55,75	0,8753	1,4905	277
14	474	44,25	100	0,9514	-	421

## Вариант 3

No	Температура	Выход на не	ефть, % масс.	Плотность	Показатель	Молекул.
фракции	выкипания	отдельных	суммарный	г/см <sup>3</sup>	преломлен.,	масса
	фракции, °С	фракций			$n\frac{20}{8}$	
	20.40	2.00	2.00	0.6267	D	4.5
1	20-40	3,98	3,98	0,6267	1,3665	45
2	40-70	3,18	7,16	0,6712	1,3805	67
3	70-90	2,64	9,80	0,7155	1,3990	97
4	90-100	2,64	12,44	0,7286	1,4070	101
5	100-120	3,10	15,54	0,7410	1,4139	107
6	120-140	3,93	19,47	0,7560	1,4228	115
7	140-160	3,56	23,03	0,7726	1,4310	128
8	160-180	3,06	26,09	0,7900	1,4411	138
9	180-200	3,43	29,52	0,8016	1,4480	151
10	200-220	3,26	32,78	0,8134	1,4548	167
11	220-240	3,77	36,55	0,8245	1,4631	181
12	240-260	4,10	40,65	0,8397	1,4709	198
13	260-280	3,93	44,58	0,8479	1,4750	214
14	280-300	4,86	49,44	0,8531	1,4770	236
15	300-320	3,89	53,33	0,8663	1,4830	256
16	320-350	5,27	58,60	0,8779	1,4921	282
17	474	41,40	100,00	0,9479	-	421

№	Температура	Выход на не	ефть, % масс.	Плотность	Показатель	Молекул.
фракции	выкипания	отдельных	суммарный	г/см <sup>3</sup>	преломлен.	Macca,
	фракции, °С	фракций			$n_{B}^{20}$	M
1	2890	1,956	1,95	0,6319	1,3970	92
2	90-110	1,42	3,37	0,7352	1,4119	110
3	110-130	1,57	4,94	0,7461	1,4190	116
4	130-150	2,36	7,30	0,7590	1,4258	130
5	150-160	1,53	8,83	0,7688	1,4304	138
6	160-170	1,84	10,67	0,7738	1,4331	143
7	170-200	2,99	13,66	0,7822	1,4382	154
8	200-220	2,74	16,40	0,7912	1,4429	168
9	220-240	3,28	19,68	0,7992	1,4471	181
10	240-260	4,18	23,86	0,8058	1,4519	196
11	260-270	2,16	26,02	0,8128	1,4555	208
12	270-280	3,35	29,37	0,8133	1,4559	215
13	280-290	3,95	33,32	0,8137	1,4570	226
14	290-300	2,47	35,79	0,8153	1,4580	235
15	300-310	2,20	37,99	0,8170	1,4587	240
16	310-320	2,65	40,64	0,8192	1,4595	245
17	320-330	3,82	44,46	0,8229	1,4630	250
18	330-340	4,58	49,04	0,8332	-	253
19	340-350	3,91	52,92	0,8375	-	272
20	474	47,05	100.00	0,921		471

# Вариант 5

№	Температура	Выход на	конденсат,	Плотность	Показатель	Молекул.
фракции	выкипания	% N	иасс.	г/ <b>с</b> м <sup>3</sup>	преломлен.,	масса
	фракции, °С	отдельных	суммарный		n <u>20</u>	
		фракций			D	
1	12-28	18,55	18,55	0,6353	1,3680	45
2	28-40	4,86	23,41	0,6259	1,3630	67
3	40-60	5,41	28,82	0,6540	1,3725	71
4	60-70	9,16	37,98	0,6827	1,3845	82
5	70-80	2,14	40,12	0,7242	1,4030	102
6	80-90	6,31	46,43	0,7228	1,4030	104
7	90-100	9,22	55,65	0,7368	1,4100	107
8	100-110	2,65	58,30	0,7413	1,4125	111
9	110-120	7,03	65,33	0,7417	1,4133	113
10	120-130	2,95	68,28	0,7542	1,4210	117
11	130-140	3,72	72,00	0,7566	1,4225	124
12	140-160	5,45	77,45	0,7672	1,4280	134
13	160-180	4,28	81,73	0,7824	1,4350	142
14	180-200	3,26	84,99	0,7884	1,4400	158
15	200-220	4,08	89,07	0,7959	1,4440	174
16	220-250	3,21	93,28	0,8071	1,4500	196
17	250-290	3,11	95,39	0,8153	1,4550	232
18	320	4,61	100	0,8675	-	255

$N_{\underline{0}}$	Температура	Выход на не	ефть, % масс.	Плотность	Показатель	Молекул.
фракции	выкипания	отдельных	суммарный	г/см <sup>3</sup>	преломлен.,	масса
	фракции, °С	фракций			n <u>20</u>	
					D	
1	28-40	7,96	7,96	0,6195	1,3580	67
2	40-60	2,68	10,64	0,6462	1,3680	75
3	60-70	6,27	16,91	0,6744	1,3805	82
4	70-80	1,67	18,58	0,7025	1,3930	92
5	80-90	3,59	22,17	0,7120	1,3980	98
6	90-100	7,23	29,40	0,7171	1,4010	101
7	100-110	2,73	32,13	0,7307	1,4078	106
8	110-120	5,01	37,14	0,7315	1,4080	109
9	120-130	4,10	41,44	0,7357	1,4115	113
10	130-140	2,96	44,40	0,7470	1,4170	121
11	140-150	4,04	48,44	0,7505	1,4190	127
12	150-160	3,49	51,93	0,7585	1,4238	133
13	160-170	3,24	55,17	0,7662	1,4270	138
14	170-180	3,06	58,23	0,7722	1,4308	144
15	180-200	4,95	63,18	0,7879	1,4385	154
16	200-220	5,86	69,04	0,7984	1,4450	171
17	220-240	4,30	73,34	0,8139	1,4535	191
18	240-260	2,73	76,07	0,8248	1,4600	206
19	260-290	4,70	80,77	0,8349	1,4660	222
20	290-320	4,04	84,81	0,8479	1,4735	248
21	320-350	3,01	87,82	0,8676	1,4855	280
22	474	12,18	100,00	0,9324	-	421

№ фракции	Температура выкипания		конденсат, масс.	Плотность, $\Gamma/\text{см}^3$	Показатель преломления	Вариа Молекул масса
11	фракции <sup>0</sup> С	отдельных фракций	суммарный		$n\frac{20}{D}$	
1	10-28	4,82	4,82	0,3567	-	23
2	28-40	7,18	12,00	0,5830	1,3630	45
3	40-50	4,02	16,02	0,6431	1,3700	68
4	50-60	9,77	25,79	0,6663	1,3780	78
5	60-70	4,12	29,91	0,6974	1,3920	88
6	70-80	2,78	32,69	0,7077	1,3970	96
7	80-90	3,45	36,14	0,7151	1,4020	98
8	90-100	5,70	41,84	0,7240	1,4050	101
9	100-110	3,83	45,67	0,7313	1,4090	105
10	110-120	4,65	50,32	0,7333	1,4105	109
11	120-130	4,21	54,53	0,7431	1,4155	113
12	130-140	2,68	57,21	0,7523	1,4210	118
13	140-150	3,35	60,56	0,7554	1,4230	124
14	150-160	3,54	64,10	0,7671	1,4280	130
15	160-170	3,54	67,64	0,7748	1,4330	136
16	170-180	3,64	71,28	0,7823	1,4370	144
17	180-190	1,55	72,83	0,7882	1,4408	154
18	190-200	1,42	74,25	0,7923	1,4433	160
19	200-210	1,84	76,09	0,7974	1,4462	166
20	210-220	2,14	78,23	0,8038	1,4495	172
21	220-230	1,80	80,03	0,8099	1,4525	178
22	230-240	1,74	81,77	0,8155	1,4556	185
23	240-250	1,79	83,56	0,8216	1,4594	194
24	250-260	1,38	84,94	0,8281	1,4633	203
25	260-270	1,07	86,01	0,8326	1,4660	210
26	270-280	1,23	87,24	0,8348	1,4676	215
27	280-290	1,59	88,83	0,8391	1,4705	224
28	290-300	0,66	89,49	0,8509	1,4773	240
29	300-310	0,43	89,92	0,8585	1,4815	250
30	310-320	0,41	90,33	0,8640	1,4845	258
31	320-330	0,47	90,80	0,8693	1,4873	266
32	330-340	0,58	91,39	0,8753	1,4904	275
33	340-350	0,68	92,07	0,8826	1,4943	286

№	Температура	Выход на конденсат,		Плотность,	Показатель	Молекул.
фракции	выкипания	% масс.		г/см <sup>3</sup>	преломления	масса
	$\phi$ ракции $^0$ С	отдельных	суммарный		$n\frac{20}{}$	
		фракций	_		D D	
34	474	7,93	100,00	0,9404	-	471

Вариант 8

						Бариа
№	Температура	Выход на не	ефть, % масс.	Плотность	Показатель	Молекул.
фракции	выкипания	отдельных	суммарный	г/см <sup>3</sup>	преломлен.	Macca,
	фракции, °С	фракций			$n_{B}^{20}$	M
1	24-40	4.9810	4.98	0,6276	1.3600	43
2	40-60	2.12	7.10	0.6592	1.3755	67
3	60-90	3.64	10.74	0.6980	1.3928	90
4	90-100	3.92	14.66	0.7182	1.4026	100
5	100-110	2.18	16.84	0.7343	1.4100	110
6	110-130	4.95	21.79	0.7353	1.4118	116
7	130-150	5.61	27.40	0.7520	1.4218	127
8	150-160	2.63	30.03	0.7687	1.4305	138
9	160-180	3.90	33.93	0.7757	1.4350	146
10	180-200	2.51	36.44	0.7982	1.4442	155
11	200-220	3.76	40.20	0.8056	1.4494	168
12	220-240	4.07	44.27	0.8129	1.4545	180
13	240-260	4.50	48.77	0.8239	1.4618	194
14	260-280	4.09	52.86	0.8349	1.4680	211
15	280-300	4.27	57.13	0.8422	1.4728	230
16	300-320	4.54	61.67	0.8495	1.4760	247
17	320-350	6.00	67.67	0.8689	1.4863	270
18	474	32.33	100.00	0,921		471

No	Температура	Выход на конденсат,		Плотность	Показатель	Молекул.
фракции	выкипания	% масс.		г/см <sup>3</sup>	преломлен.,	масса
	фракции, °С	отдельных	суммарный		n <u>20</u>	
		фракций			D	
1	14-28	4,49	4,29	0,5861	-	43
2	28-40	3,57	7,86	0,6240	1,3600	65
3	40-50	1,22	9,08	0,6470	1,3695	69
4	50-60	1,22	10,30	0,6560	1,3735	72
5	60-70	6,06	16,36	0,6767	1,3835	84
6	70-80	3,76	20,12	0,7010	1,3940	96
7	80-90	3,75	23,87	0,7140	1,4000	100
8	90-100	6,11	29,98	0,7217	1,4040	106
9	100-110	3,17	33,15	0,7288	1,4080	110
10	110-120	6,33	39,48	0,7321	1,4100	113
11	120-130	3,30	42,78	0,7433	1,4160	116
12	130-140	3,53	46,31	0,7476	1,4190	122
13	140-150	4,34	50,65	0,7568	1,4235	129
14	150-160	4,43	55,08	0,7649	1,4280	134
15	160-170	1,81	56,89	0,7746	1,4320	137
16	170-180	2,89	59,78	0,7767	1,4335	140

№	Температура	Выход на	Выход на конденсат,		Показатель	Молекул.
Фракции	выкипания	% N	% масс.		преломлен.,	масса
	фракции, °С	отдельных	суммарный		n 20	
		фракций			D	
17	180-190	2,67	62,45	0,7830	1,4375	151
18	190-200	2,67	65,12	0,7890	1,4410	160
19	200-210	2,85	67,97	0,7950	1,4445	167
20	210-220	2,85	70,82	0,8010	1,4480	175
21	220-230	2,04	72,86	0,8080	1,4515	183
22	230-240	2,03	74,89	0,8140	1,4545	191
23	240-250	1,97	76,86	0,8190	1,4580	199
24	250-260	1,96	78,82	0,8250	1,4610	208
25	260-270	1,51	80,33	0,8300	1,4640	216
26	270-280	1,51	81,84	0,8340	1,4660	224
27	280-290	1,50	83,34	0,8400	1,4695	232
28	290-300	1,48	84,82	0,8470	1,4720	240
29	300-310	1,48	86,30	0,8497	1,4750	248
30	310-320	1,47	87,77	0,8590	1,4805	262
31	320-330	0,47	88,24	0,8640	1,4850	272
32	330-340	0,47	88,71	0,8689	1,4860	276
33	340-350	0,46	89,17	0,8739	1,4870	280
34	474	10,83	100,00	0,9210		471

№	Температура	Выход на нефть,		Плотность	Показатель	Молекул.
фракции	выкипания	% N	% масс.		преломлен.,	масса
	фракции, °С	отдельных	суммарный		n <u>20</u>	
		фракций			D	
1	12-28	0,46	0,46	0,589	-	45
2	28-40	2,00	2,46	0,6261	1,3590	67
3	40-50	1,58	4,04	0,6565	1,3750	72
4	50-60	1,58	5,62	0,6800	1,3840	86
5	60-70	1,96	7,58	0,7038	1,3940	91
6	70-80	1,65	9,23	0,7126	1,3980	95
7	80-90	1,64	10,87	0,7214	1,4020	99
8	90-100	1,56	12,43	0,7270	1,4060	102
9	100-110	1,57	14,00	0,7310	1,4085	105
10	110-120	2,42	16,42	0,7327	1,4100	108
11	120-130	2,98	19,40	0,7375	1,4130	113
12	130-140	2,29	21,69	0,7488	1,4190	117
13	140-150	2,80	24,49	0,7512	1,4210	123
14	150-160	2,49	26,98	0,7598	1,4240	129
15	160-170	2,03	29,01	0,7680	1,4285	136
16	170-180	2,02	31,03	0,7735	1,4315	143
17	180-190	1,98	33,01	0,7780	1,4340	149
18	190-200	1,98	34,99	0,7828	1,4365	156
19	200-210	2,03	37,02	0,7885	1,4405	163
20	210-220	2,04	39,06	0,7940	1,4435	171
21	220-230	1,96	41,02	0,8000	1,4460	179

№	Температура	Выход і	Выход на нефть,		Показатель	Молекул.
Фракции	выкипания	% N	% масс.		преломлен.,	масса
	фракции, °С	отдельных	суммарный		n <u>20</u>	
		фракций			D	
22	230-240	1,95	42,97	0,8055	1,4500	188
23	240-250	1,76	44,73	0,8115	1,4530	196
24	250-260	1,75	46,48	0,8170	1,4555	204
25	260-270	1,63	48,11	0,8220	1,4585	211
26	270-280	1,62	49,73	0,8255	1,4605	218
27	280-290	2,02	51,75	0,8290	1,4625	226
28	290-300	2,03	53,78	0,8330	1,4650	238
29	300-310	1,65	55,43	0,8370	1,4670	246
30	310-320	1,64	57,07	0,8415	1,4695	255
31	320-330	1,80	58,87	0,8470	1,4720	266
32	330-340	1,79	60,66	0,8522	1,4750	276
33	340-350	1,79	62,45	0,8874	1,4780	286
34	474	37,55	100,00	0,9336	-	471

№ фракции	Температура выкипания	Выход на нефть, % масс.		Плотность, г/см <sup>3</sup>	Показатель преломления	Молекул. масса
Tr	фракции <sup>0</sup> С	отдельных фракций	суммарный		$n\frac{20}{D}$	
1	24-40	4,52	4,61	0,6430	1,3670	68
2	40-50	1,01	5,62	0,6646	1,3767	74
3	50-60	0,83	6,45	0,6817	1,3847	81
4	60-70	0,86	7,31	0,6991	1,3929	88
5	70-80	1,02	8,33	0,7118	1,3994	93
6	80-90	1,57	9,90	0,7180	1,4023	96
7	90-100	1,95	11,85	0,7217	1,4044	99
8	100-110	1,37	13,22	0,7317	1,4094	106
9	110-120	1,29	14,51	0,7402	1,4137	110
10	120-130	1,58	16,09	0,7477	1,4177	113
11	130-140	1,82	17,91	0,7555	1,4219	118
12	140-150	1,70	19,61	0,7633	1,4261	124
13	150-160	1,62	21,23	0,7711	1,4301	129
14	160-170	1,62	22,85	0,7794	1,4345	133
15	170-180	1,66	24,51	0,7885	1,4395	138

<b>№</b> фракции	Температура выкипания	Выход на нефть, % масс.		Плотность, г/см <sup>3</sup>	Показатель преломления	Молекул. масса
TI	фракции <sup>0</sup> С	отдельных фракций	суммарный		$n\frac{20}{D}$	
16	180-190	1,77	26,23	0,7978	1,4449	145
17	190-200	1,84	28,07	0,8062	1,4497	153
18	200-210	2,01	30,08	0,8134	1,4537	163
19	210-220	1,94	32,02	0,8196	1,4573	171
20	220-230	1,71	33,73	0,8251	1,4605	178
21	230-240	1,65	35,38	0,8302	1,4635	184
22	240-250	1,75	37,13	0,8351	1,4665	191
23	250-260	1,92	39,05	0,8399	1,4693	198
24	260-270	2,04	41,09	0,8444	1,4718	205
25	270-280	1,87	42,96	0,8486	1,4743	214
26	280-290	1,61	44,57	0,8518	1,4763	223
27	290-300	1,71	46,28	0,8538	1,4775	231
28	300-310	2,46	48,74	0,8556	1,4786	239
29	310-320	2,85	51,59	0,8614	1,4821	251
30	320-330	2,11	53,70	0,8706	1,4877	263
31	330-340	2,07	55,77	0,8778	1,4921	273
32	340-350	2,70	58,47	0,8841	1,4960	285
33	474	41,53	100,00	0,9361		466

#### Литература

- 1. Танатаров М.А., и др. Технологические расчеты установок переработки нефти. М.:Химия, 1987. 352с.
- 2. Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки. Справочник/Под ред. Судакова Н.А., М.:Химия, 1979. 566с.
- 3. Левинтер М.Е., Чак Р.О. Оборудование и основы проектирования нефтеперерабатывающих заводов. Учебное пособие, М: Химия, 1993. 208 с.
- 4. Гринберг Я.И. Проектирование химических производств. Учебное пособие, М: Химия, 1970. 268 с.
- 5. Кузнецов А.А., Кагерманов С.М., Судаков Е.Н. Расчеты процессов и аппаратов нефтеперерабатывающей промышленности. М:Химия, 1974. 342c.
- 6. Богданов Ю.П., Зотов В. Н., Колосков С.П. и др. Справочник по производству спирта. Оборудование, средства механизации и автоматизации. М: Легкая и пищевая промышленность, 1983, 343 с.
- 7. Девятых Г.Г., Еллиев Ю.Е. Введение в теорию глубокой очистки веществ. М. Наука, 1981. 320с.