

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»**
Высшая школа технологии и энергетики
Кафедра процессов и аппаратов химической технологии

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ В ХИМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Выполнение лабораторных работ

Методические указания для студентов заочной формы обучения по
направлению подготовки
15.03.02 — Технологические машины и оборудование

Составители:
А. О. Никифоров
М. Е. Донова

Санкт-Петербург
2023

Утверждено
на заседании кафедры ПиАХТ
12.01.2023 г., протокол № 4

Рецензент А. Н. Евдокимов

Методические указания соответствуют программам и учебным планам дисциплины «Технологические процессы и аппараты в химической отрасли» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование». В методических указаниях представлен порядок выполнения и оформления лабораторных работ.

Методические указания предназначены для бакалавров заочной и заочно-ускоренной форм обучения.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД
в качестве методических указаний

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию: 07.03.2023 г. Рег.№ 5063/23

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. Экспериментальное определение напорных характеристик насоса при различных частотах вращения.....	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. Согласование характеристик насоса и сети.....	12
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. Исследование процесса выпаривания	15
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. Исследование работы ректификационной колонны периодического действия	21
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	30

ВВЕДЕНИЕ

На химических предприятиях сырье превращается в продукт в результате химического взаимодействия. Продукция химической промышленности крайне разнообразна. Химические производства включают ряд однотипных процессов, происходящих в машинах и аппаратах, аналогичных по конструкции.

Для перемещения жидкостей в химических производствах используются насосы самых разных конструкций. Это связано с различиями свойств перекачиваемых жидкостей, таких как плотность (вода, мазут), содержание твердых частиц (осадки, образовавшиеся в результате реакций, металлические отслоения) или газов. Тип насоса также зависит от рабочих условий: значений давления и температуры, скорости перекачивания и т. д. [1].

Выпаривание применяют для концентрирования растворов нелетучих веществ, выделения из раствора чистого растворителя (дистилляция) и кристаллизации растворенных веществ, т. е. выделения нелетучих веществ в твердом виде. В качестве примера выпаривания с выделением чистого растворителя из раствора можно привести опреснение морской воды, когда образующийся водной пар конденсируют, и полученную воду используют для различных целей [2].

В настоящее время ректификацию применяют в областях химической технологии, где выделение компонентов в чистом виде имеет весьма важное значение (в производствах органического синтеза, изотопов, полимеров, полупроводников и различных других веществ высокой чистоты). Ректификационные аппараты выполняются в виде колонн. Для улучшения массообмена в них используется насадка или тарелки с контактными элементами [3–5].

Таблица 1 – Условные обозначения

Обозначение	Наименование
Б1	Бак
Ф1, Ф2	Фильтр
Н1, Н2	Насос центробежный
Т1	Трубопровод исследуемый
Р1, Р2	Расходомер
КР1...КР6	Кран шаровой
КО1, КО2	Клапан обратный
ЗД1...ЗД3	Задвижка клиновая
ДД1...ДД5	Датчик давления

Стенд состоит из центробежных насосов, бака для хранения жидкости, запорной водопроводной арматуры, измерительных приборов и устройств, исследуемого трубопровода и соединительных трубопроводов, смонтированных на рамной конструкции и монтажной панели стенда.

Стенд предназначен для изучения методов испытания центробежных насосов и различных схем соединения.

Рабочая жидкость (вода) центробежными насосами Н1 и Н2 нагнетается из бака в систему. На всасывании насосов установлены задвижки ЗД1 и ЗД2, позволяющие создать дополнительное сопротивление на всасывании насосов. Запрещается включение насосов с закрытыми задвижками ЗД1 и ЗД2.

Для контроля давления в линиях всасывания и нагнетания насосов установлены датчики давления ДД1, ДД2, ДД3, ДД4. Датчик давления ДД5 измеряет давление на выходе насосной станции (на входе в исследуемый трубопровод).

Шаровые краны КР2...КР6 предназначены для изменения схемы подключения элементов и трубопроводов стенда. Краны КР3 и КР4 позволяют изменять схему подключения насосов (параллельно или последовательно). Для включения в схему исследуемого трубопровода служит кран КР2. Кран КР1 служит для слива жидкости из бака.

Группы расходомеров Р1 и Р2, состоящие каждый из двух счетчиков количества воды СГВ-20 с цифровым выходом, позволяют определять подачу насосов. Краны КР5 и КР6 позволяют отключать один из расходомеров, входящих в группы Р1 и Р2, для повышения точности измерений при малых расходах.

Принцип работы и конструкция проточной части счетчика-расходомера с тангенциальной турбиной показаны на рис. 2. Принцип действия расходомера-счетчика основан на измерении скорости вращения потоком жидкости измерительной турбины. Для бесперебойной работы счетчиков необходимо отсутствие завихрений в потоке, поступающем на турбину.

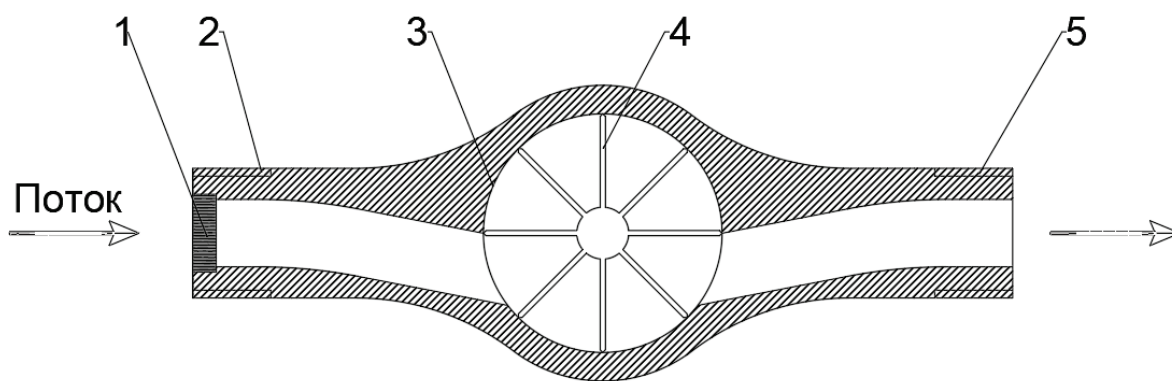


Рис. 2. Проточная часть счетчика-расходомера:
 1 – входной фильтр; 2 – входной патрубок; 3 – цилиндрическая полость;
 4 – турбина; 5 – патрубок

Поток жидкости поступает в проточную часть корпуса через входной фильтр (1), выполняющий также функцию выпрямителя потока, размещенный во входном патрубке (2). Далее поток по касательной входит в цилиндрическую полость (3), где размещена турбина (4), и по касательной выходит в патрубок (5). Таким образом, количество оборотов, совершенное турбиной (4), пропорционально пройденному объему жидкости, а частота вращения – объемному расходу. Корпус проточной части счетчика выполнен из магнитно-проницаемого сплава, а на турбине (4) установлен постоянный магнит. На счетном устройстве расположена вертушка с постоянным магнитом, таким образом, вращение турбины передается на вертушку за счет взаимодействия двух постоянных магнитов. Далее количество оборотов вертушки фиксируется многоразрядным цифровым барабанным счетчиком. Кроме того, в корпусе счетного устройства размещен датчик Холла, позволяющий фиксировать изменение магнитного поля от вращающегося постоянного магнита, что позволяет получать импульсный электрический выход для подсчета оборотов турбины. Затем количество оборотов турбины пересчитывается в значение расхода жидкости, проходящей через счетчик. Величина расхода при этом выводится на соответствующий электронный индикатор.

Обработка экспериментальных данных

Таблица 2 – Запись экспериментальных данных для первого насоса

Параметр	Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6
Частота питающего тока, Гц	50±1					
Давление на выходе насоса 1, кПа (изб.)	-	115	140	165	190	-

Параметр	Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6
Давление $p_{вх1}$ на входе насоса 1, кПа (изб.)	-	-	-	-	-	-
Перепад давления $p_{Н1}$ на насосе 1, кПа	-	-	-	-	-	-
Подача Q_H насоса 1, л/мин	-	-	-	-	-	-
Полезная мощность N_n , Вт	-	-	-	-	-	-
Частота питающего тока, Гц	40±1					
Давление на выходе насоса 1, кПа (изб.)	-	80	95	110	125	-
Давление $p_{вх1}$ на входе насоса 1, кПа (изб.)	-	-	-	-	-	-
Перепад давления $p_{Н1}$ на насосе 1, кПа	-	-	-	-	-	-
Подача Q_H насоса 1, л/мин	-	-	-	-	-	-
Полезная мощность N_n , Вт	-	-	-	-	-	-
Частота питающего тока, Гц	30±1					
Давление на выходе насоса 1, кПа (изб.)	-	50	60	70	80	-
Давление $p_{вх1}$ на входе насоса 1, кПа (изб.)	-	-	-	-	-	-
Перепад давления $p_{Н1}$ на насосе 1, кПа	-	-	-	-	-	-
Подача Q_H насоса 1, л/мин	-	-	-	-	-	-
Полезная мощность N_n , Вт	-	-	-	-	-	-
Частота питающего тока, Гц	20±1					
Давление на выходе насоса 1, кПа (изб.)	-	28	32	36	40	-
Давление $p_{вх1}$ на входе насоса 1, кПа (изб.)	-	-	-	-	-	-
Перепад давления $p_{Н1}$ на насосе 1, кПа	-	-	-	-	-	-
Подача Q_H насоса 1, л/мин	-	-	-	-	-	-
Полезная мощность N_n , Вт	-	-	-	-	-	-

Таблица 3 – Запись экспериментальных данных для второго насоса

Параметр	Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6
Частота питающего тока, Гц	50±1					
Давление на выходе насоса 2, кПа (изб.)	-	115	140	165	190	-
Давление $p_{вх1}$ на входе насоса 2, кПа (изб.)	-	-	-	-	-	-
Перепад давления p_{H2} на насосе 2, кПа	-	-	-	-	-	-
Подача Q_H насоса 2, л/мин	-	-	-	-	-	-
Полезная мощность N_n , Вт	-	-	-	-	-	-
Частота питающего тока, Гц	40±1					
Давление на выходе насоса 2, кПа (изб.)	-	80	95	110	125	-
Давление $p_{вх2}$ на входе насоса 2, кПа (изб.)	-	-	-	-	-	-
Перепад давления p_{H2} на насосе 2, кПа	-	-	-	-	-	-
Подача Q_H насоса 2, л/мин	-	-	-	-	-	-
Полезная мощность N_n , Вт	-	-	-	-	-	-
Частота питающего тока, Гц	30±1					
Давление на выходе насоса 2, кПа(изб.)	-	50	60	70	80	-
Давление $p_{вх1}$ на входе насоса 2, кПа (изб.)	-	-	-	-	-	-
Перепад давления p_{H2} на насосе 2, кПа	-	-	-	-	-	-
Подача Q_H насоса 2, л/мин	-	-	-	-	-	-
Полезная мощность N_n , Вт	-	-	-	-	-	-
Частота питающего тока, Гц	20±1					
Давление на выходе насоса 2, кПа(изб.)	-	28	32	36	40	-
Давление $p_{вх2}$ на входе насоса 2, кПа (изб.)	-	-	-	-	-	-
Перепад давления p_{H2} на насосе 2, кПа	-	-	-	-	-	-
Подача Q_H насоса 2, л/мин	-	-	-	-	-	-
Полезная мощность N_n , Вт	-	-	-	-	-	-

По записанным в таблицу данным строятся рабочие характеристики насосов в программе «Excel» либо вручную на миллиметровке (рис. 3).

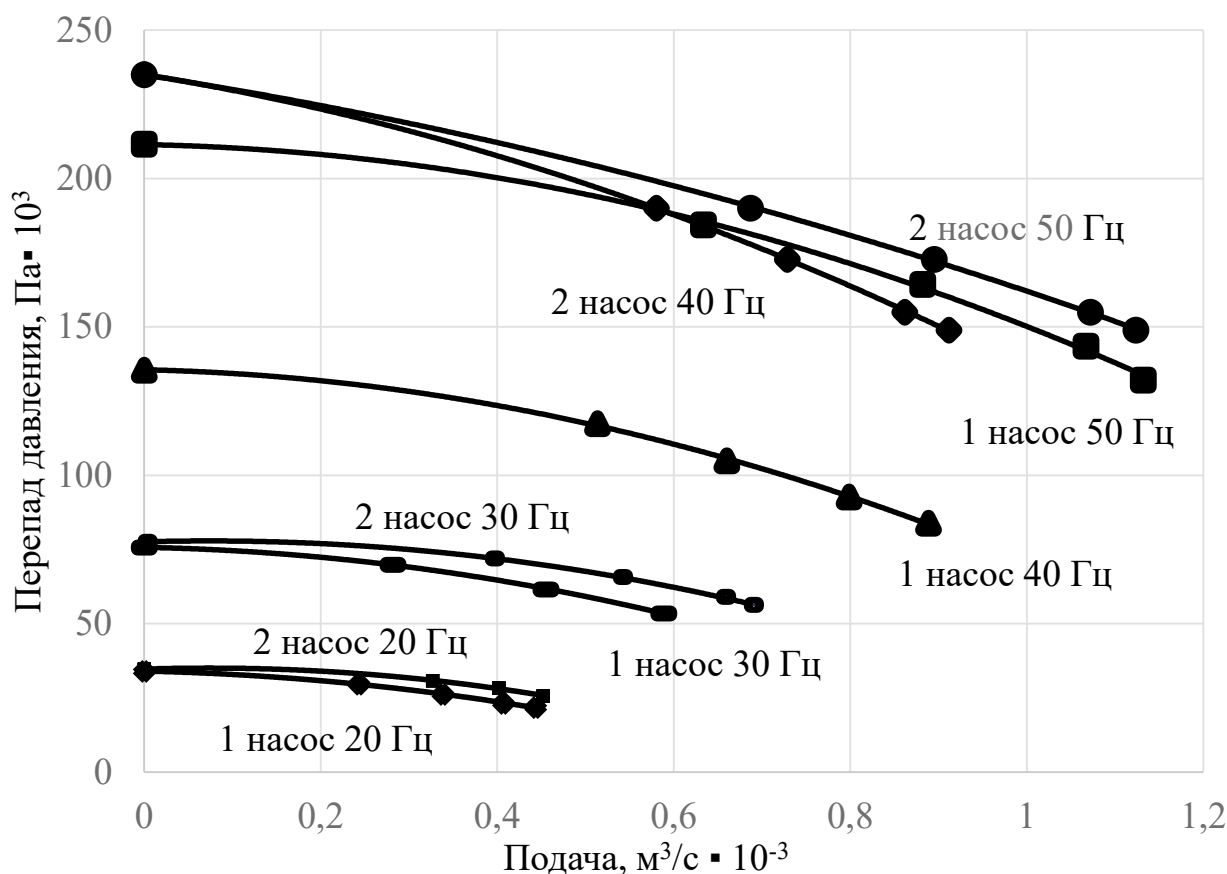


Рис. 3. График зависимости перепада давления от подачи

Закончив обработку экспериментальных данных, следует определить напор и КПД насоса, перекачивающего кислоту плотностью ρ , кг/м³. Производительность насоса Q , м³/ч. Мощность на валу электродвигателя N , кВт. Показания манометра на нагнетательном трубопроводе p_m , кПа, вакуумметра на всасывающем трубопроводе p_v , кПа. Вертикальное расстояние между точками установки измерительных приборов h , м.

Таблица 4 – Индивидуальные задания к лабораторной работе № 1

№ вар.	Плотность жидкости ρ , кг/м ³	Производительность насоса Q , м ³ /ч	Мощность на валу N , кВт	Показания манометра p_m , кПа	Показания вакуумметра p_v , кПа	Вертикальное расстояние h , м
1	1000	150	7,5	150	10	0,25
2	1020	175	11	175	20	0,30
3	1040	200	15	200	30	0,35
4	1060	225	18,5	225	40	0,40
5	1080	250	22	250	50	0,45
6	1100	275	30	275	60	0,50
7	1120	300	37	300	70	0,55
8	1140	325	45	325	80	0,60
9	1160	350	45	350	90	0,65
0	1180	375	55	375	100	0,70

Расчет выполняется в следующей последовательности:

1. По формуле (102) [3] рассчитывается полный напор насоса.
2. По формуле (103) [3] рассчитывается полезная мощность на валу насоса.
3. По формуле (104) [3] определяется коэффициент полезного действия (КПД). Принять мощность на валу электродвигателя равной действительной мощности на валу насоса.

Отчет о выполненной работе должен содержать:

1. Краткое содержание и цель работы.
2. Схему установки и ее описание.
3. Последовательный расчет искомых величин.
4. Таблицы с опытными и расчетными данными.
5. Выводы о работе.

Вопросы для коллоквиума

1. Сравнить экспериментальные рабочие характеристики центробежного насоса с графическими зависимостями по литературным данным и графически определить возможность работы исследуемого вентилятора на заданную гидравлическую сеть.
2. Основные характеристики насоса.
3. На что затрачивается напор насоса?
4. Какими параметрами определяется высота всасывания насоса?
5. Что такое кавитация? В каких средах она возникает?
6. Как определить фактический напор центробежного насоса?
7. Как устроен и работает центробежный насос?
8. Чем отличается универсальная характеристика насоса от его рабочих характеристик?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Согласование характеристик насоса и сети

Целью работы является получение характеристики гидравлической системы, ее согласование с характеристикой центробежного насоса и получение рабочей точки, которая соответствует текущему режиму работы насоса.

Методика проведения работы

Данная лабораторная работа может выполняться с использованием ноутбука или без него, измеряемые данные дублируются на электронных табло. В качестве характеристики насоса использовать характеристику, полученную в лабораторной работе № 1.

1. Закрыть краны КР3, КР4 и задвижку ЗД3.
2. Открыть задвижку ЗД1 и кран КР2.
3. Включить питание системы управления.
4. Включить питание ПЧ насоса 1 тумблером «Насос 1».
5. На панели частотного преобразователя 1 нажать кнопку «Auto On».
6. Повернуть потенциометр, расположенный на панели блока управления и соответствующий насосу 1, по часовой стрелке до упора.
7. Дождаться установившихся значений параметров насоса 1.
8. Записать в табл. 5 следующие значения: давление на выходе насосной станции, подачу насоса 1.
9. Вращая ручку потенциометра, соответствующего насосу 1, уменьшить величину частоты на 5 Гц. При этом изменится подача насоса 1.
10. Записать в табл. 5 следующие значения: давление на выходе насосной станции, подачу насоса 1.

Повторить действия по пунктам 9–10 до прекращения подачи насоса 1.

11. Нажать кнопку «Off/Reset» на панели управления частотного преобразователя 1.

12. Выключить питание ПЧ насоса 1.

13. Выключить питание системы управления.

14. Построить график зависимости давления на выходе насосной станции от подачи насоса $P_{НС} = f(Q_{НС})$ (рис. 4).

15. Изобразить в одной координатной плоскости характеристику насоса 1 (см. лабораторную работу № 1) и полученную характеристику системы. Режим работы насоса будет соответствовать давлению и подаче в точке пересечения этих характеристик. Сделать вывод.

Обработка экспериментальных данных

Таблица 5 – Запись экспериментальных данных по лабораторной работе № 2

Параметр	Номер опыта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Давление на выходе насосной станции, кПа										
Подача насоса 1, л/мин										

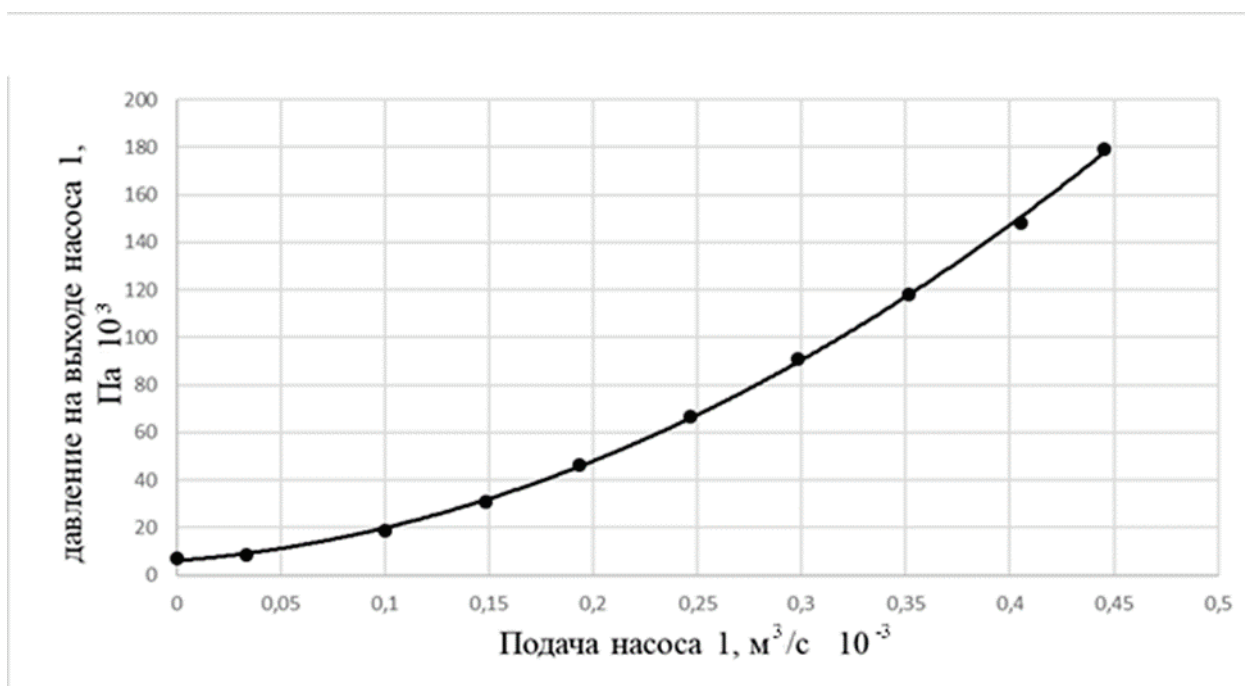


Рис. 4. График зависимости давления на выходе насосной станции от подачи

Отчет о выполненной работе должен содержать:

1. Краткое содержание и цель работы.
2. Схему установки и ее описание.
3. Последовательный расчет искомых величин.
4. Таблицы с опытными и расчетными данными.
5. Выводы о работе.

Вопросы к коллоквиуму

1. На что затрачивается напор насоса?
2. Как высота всасывания насоса зависит от температуры перекачиваемой жидкости?
3. Каков принцип устройства и работы поршневых и плунжерных насосов? Каковы их достоинства и недостатки?
4. В каких конструкциях насосов применяются воздушные колпаки? В чем смысл их работы?
5. Как осуществляется выбор насоса при работе на заданную сеть?
6. Как устроена трубка Пито-Прандтля? Как с ее помощью измерить динамическое и полное давление, создаваемые при работе вентилятора?
7. Можно ли, зная рабочие характеристики вентилятора при одной частоте вращения колеса, построить рабочие характеристики при другой частоте вращения колеса?
8. Как устроены и работают одноступенчатые поршневые компрессоры? В чем их конструктивное отличие от поршневых насосов? Что представляет собой индикаторная диаграмма работы компрессора?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Исследование процесса выпаривания

Целью работы является ознакомление с основными особенностями работы и расчета процесса выпаривания.

Выпаривание – процесс повышения концентрации растворов нелетучих веществ в жидких летучих растворителях.

Сущность процесса выпаривания заключается в переводе растворителя в парообразное состояние и отводе полученного пара от оставшегося сконцентрированного раствора.

Выпариванию подвергают растворы твердых веществ (солей, щелочей и др.), а также высококипящие жидкости, обладающие при температуре выпаривания весьма малым давлением пара. Процесс выпаривания достаточно широко используется в химической промышленности и в производстве химических волокон.

Материальный баланс. Общий материальный баланс простого выпаривания выражается уравнением:

$$G_H = G_K + W. \quad (3.1)$$

Уравнение баланса по абсолютно сухому веществу, находящемуся в растворе, выражается уравнением:

$$\frac{G_H \cdot X_H}{100} = \frac{G_K \cdot X_K}{100}, \quad (3.2)$$

где G_H – количество поступившего в аппарат раствора, кг;

G_K – количество упаренного раствора, кг;

W – количество выпаренной воды; X_H , X_K – начальная и конечная концентрация раствора, % мас.

Совместным решением уравнений (3.1) и (3.2) можно определить количество упаренного раствора:

$$G_K = G_H \cdot \frac{X_H}{X_{K(\text{опыт})}}, \quad (3.3)$$

и количество выпаренной влаги:

$$W = G_H - G_K = G_H \cdot \left(1 - \frac{X_H}{X_{K(\text{опыт})}}\right). \quad (3.4)$$

Конечная концентрация по заданному количеству выпаренной воды вычисляется по уравнению:

$$X_{K(\text{расч.})} = G_H \cdot \frac{X_H}{G_H - W_{(\text{конд.})}}. \quad (3.5)$$

Тепловой баланс. При выпаривании раствора в однокорпусной выпарной установке тепло Q , подводимое с теплоносителем, расходуется:

- а) на нагревание исходного раствора от начальной температуры до температуры кипения – Q_1 ;
- б) на выпаривание раствора – Q_2 ;
- в) на компенсацию потерь тепла в окружающую среду – Q_3 .

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (3.6)$$

Количество тепла, затрачиваемое на подогрев раствора, рассчитывается по уравнению:

$$Q_1 = G_H \cdot C_H \cdot (t_K - t_H), \quad (3.7)$$

где C_H – теплоемкость исходного раствора, кДж/(кг× °С);

t_K – температура кипения раствора в начале процесса выпаривания, С;

t_H – начальная температура раствора, °С.

Количество тепла, затрачиваемое на выпаривание раствора, рассчитывается по уравнению:

$$Q_2 = W(\text{конд.}) \cdot (i - C_B \cdot t_K) + G_H \cdot C_H \cdot (t_K'' - t_K'), \quad (3.8)$$

где i – удельная энтальпия вторичного пара при давлении 1 атм, равная 2679 кДж/кг;

C_B – теплоемкость воды при температуре t_K' , кДж/(кг× °С) (см. приложение 1);

t_K'' – температура кипения раствора в конце процесса выпаривания.

Увеличение температуры кипения раствора от t_K' до t_K'' связано с увеличением его концентрации в процессе выпаривания. Изменяются и другие физико-химические свойства растворов, например, плотность, вязкость и теплопроводность упариваемого раствора.

Описание экспериментальной установки

Установка для простого выпаривания (рис. 5) состоит из бака-испарителя (1), в который заливается выпариваемый раствор, теплообменника (2), в котором происходит конденсация вторичного пара и охлаждение его до определенной температуры, и мерника (3) для сбора выпаренной воды. Подвод тепла для подогрева и выпаривания раствора осуществляется электронагревателем.

Исходный раствор соды (Na_2CO_3) в количестве $G_H = 6$ литров с начальной концентрацией X_H от 2 % до 6 % (по указанию преподавателя) заливается через специальное отверстие с помощью воронки в бак-испаритель. Затем включается электронагрев, и раствор нагревается до температуры кипения.

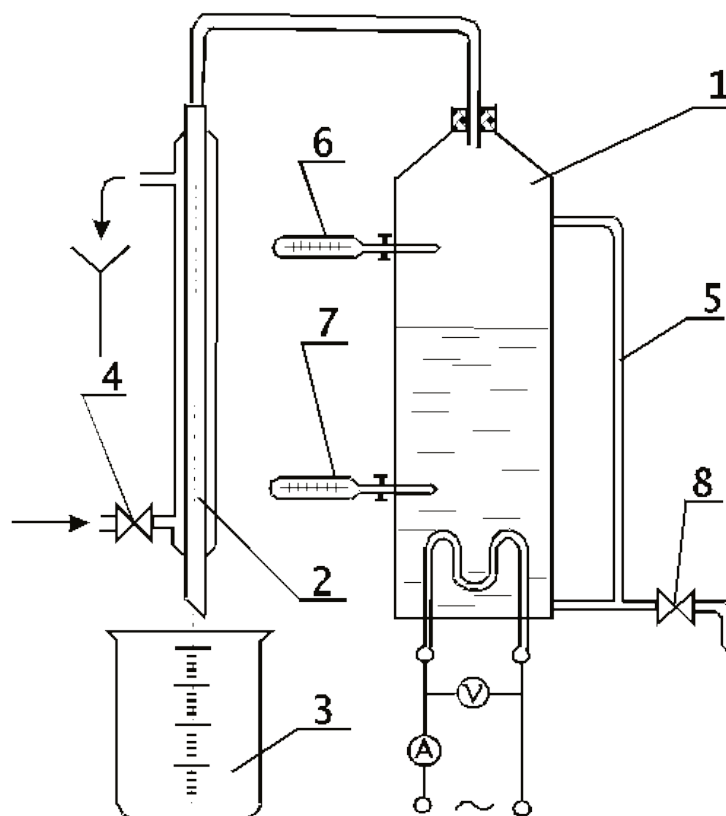


Рис. 5. Схема лабораторной установки:
 1 – бак-испаритель; 2 – теплообменник; 3 – мерник; 4, 8 – вентили;
 5 – водометное стекло; 6, 7 – термометры

Образующийся вторичный пар поступает в теплообменник, где происходит его конденсация. Необходимый расход охлаждающей воды поступает из водопроводной сети и регулируется вентилем (4). Объем исходного и упаренного раствора в баке измеряют с помощью водометного стекла (5). Температуры образующегося пара и кипящего раствора измеряют по термометрам (6) и (7) соответственно. Отбор пробы выпаренного раствора проводят через вентиль (8).

Методика проведения работы

1. Ознакомиться с описанием и устройством лабораторной выпарной установки.
2. Составить таблицы отчетных и расчетных величин. Во время опыта все полученные опытные данные заносятся в таблицу.
3. Приготовить исходный раствор соды. Количество исходного раствора и его концентрация задаются преподавателем. Залить приготовленный раствор в бак-испаритель.
4. По термометру (7) определить температуру исходного раствора.
5. Одновременно включить электронагрев выпарного аппарата и секундомер.
6. Открыть вентиль (4) и пустить воду в теплообменник.

7. Записать показания амперметра и вольтметра.
8. Появление первых капель конденсата в мернике свидетельствует о том, что закончился период нагревания раствора до температуры его кипения t'_K и начался процесс выпаривания. По секундомеру необходимо замерить время нагрева раствора до кипения.
9. После получения заданного преподавателем количества конденсата выключить электронагрев и секундомер, по которому следует замерить время, которое потребовалось на выпаривание заданного количества раствора.
10. Отключить поступление охлаждающей воды в теплообменник.
11. По водомерному стеклу определить объем упаренного раствора в литрах.
12. Взять пробу упаренного раствора и ареометром определить плотность упаренного раствора. По плотности (см. приложение 3) определить концентрацию раствора.

Обработка экспериментальных данных

1. Количество упаренного раствора рассчитать по уравнению (3.3).
2. Количество выпаренной влаги рассчитать по уравнению (3.4).
3. Конечную концентрацию упаренного раствора вычислить по уравнению (3.5). Сравнить расчетную и измеренную концентрацию раствора и вычислить процент ошибки по формуле:

$$\varepsilon = \frac{X_K(\text{расч.}) - X_K(\text{опыт.})}{X_K(\text{расч.})} \cdot 100. \quad (3.9)$$

Расход тепла на подогрев раствора рассчитать по уравнению (3.7). Теплоемкость исходного раствора C_H находят по формуле:

$$C_H = C_{\text{воды}} \cdot \left(1 - \frac{X_H}{100}\right) + C_{\text{соды}} \cdot \frac{X_H}{100}, \quad (3.10)$$

где $C_{\text{воды}}$ – теплоемкость воды (см. приложение 1);

$C_{\text{соды}}$ – теплоемкость соды = 1, 035 кДж/(кг × °С).

Расход тепла на выпаривание рассчитать по уравнению (3.8).

Общие затраты тепла Q рассчитать без учета потерь тепла в окружающую среду.

Требуемую мощность электронагрева N_{TR} найти по формуле:

$$N_{TR} = \frac{Q}{\tau}, \quad (3.11)$$

где τ – суммарное время нагрева и выпаривание раствора.

Определить удельный расход энергии в испытываемом выпарном аппарате:

$$q = \frac{N_{TR}}{W_{(\text{конд.})}}. \quad (3.12)$$

Фактическую мощность электронагревателя N_{Φ} рассчитать по показаниям вольтметра и амперметра.

Определить КПД испытываемой установки:

$$\eta = \frac{N_{\text{ТР}}}{N_{\text{Ф}}}. \quad (3.13)$$

Занести полученные величины в таблицы 6 и 7.

Отчет о выполненной работе должен содержать:

1. Краткое содержание и цель работы.
2. Схему установки и ее описание.
3. Последовательный расчет искомых величин.
4. Таблицы с опытными и расчетными данными.
5. Выводы о работе.

Таблица 6 – Опытные данные

№	Наименование и размерность измеряемых величин	Условные обозначения	Значения
	Количество исходного раствора, кг	$G_{\text{Н}}$	-
	Количество упаренного раствора, кг	$G_{\text{К}}$	-
	Начальная концентрация раствора, % масс.	$X_{\text{Н}}$	-
	Конечная концентрация раствора, % масс.	$X_{\text{К}}$	-
	Количество конденсата, кг	$W(\text{конд.})$	-
	Суммарное время нагрева и выпаривания, с	τ	-
	Температура исходного раствора, оС	$t_{\text{Н}}$	-
	Температура кипения раствора в начале процесса выпаривания, оС	$t'_{\text{К}}$	-
	Температура кипения раствора в конце процесса выпаривания, оС	$t''_{\text{К}}$	-

Таблица 7 – Полученные расчетные величины

№	Наименование и размерность измеряемых величин	Условные обозначения	Значения
	Количество упаренного раствора, кг	$G_{\text{К}}$	-
	Количество выпаренной влаги, кг	W	-
	Конечная концентрация раствора, % масс.	$X_{\text{К}}$	-
	Ошибка в % между измеренной и расчетной концентрациями	ε	-
	Количество тепла на нагрев раствора до температуры кипения, кДж	Q_1	-
	Количество тепла, затраченное на выпаривание раствора, кДж	Q_2	-
	Общие затраты тепла на нагрев и выпаривание, кДж	Q	-
	Требуемая мощность нагревателя, кВт	$N_{\text{ТР}}$	-
	Фактическая мощность электронагревателя, кВт	$N_{\text{Ф}}$	-
	КПД установки	η	-

Вопросы для коллоквиума

1. Определение процесса выпаривания.
2. Назначение процессов выпаривания.
3. Теплоносители выпарных аппаратов.
4. Первичный пар, вторичный пар – что это?
5. Выражение концентрации через мольные доли.
6. Закон Рауля.
7. Температурная депрессия.
8. Гидростатическая депрессия.
9. Гидравлическая депрессия.
10. Выбор давления в процессе выпаривания.
11. Преимущества и недостатки простой однократной выпарки.
12. Что необходимо знать, чтобы определить количество выпаренной влаги?
13. На основе чего определяют расход греющего пара?
14. Исходное уравнение для определения поверхности теплообмена.
15. Основная причина использования многокорпусной выпарки.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Исследование работы ректификационной колонны периодического действия

Целью работы является ознакомление с основными особенностями работы и расчета процесса ректификации на примере насадочной колонны, работающей в режиме полного возврата флегмы.

Описание экспериментальной установки

Ректификационная установка 5 состоит из колонны (1), заполненной насадкой из нихромовой проволоки диаметром 0,3 мм в виде спиралей диаметром 3 мм и длиной 2÷3 мм, куба-испарителя (2) с раствором этилового спирта в воде, расположенного в глицериновой бане (3), и конденсаторов-дефлегматоров (11), выполненных в виде теплообменников типа «труба в трубе». Колонна (1) через конденсаторы (11) свободно соединяется с атмосферой (рис. 6).

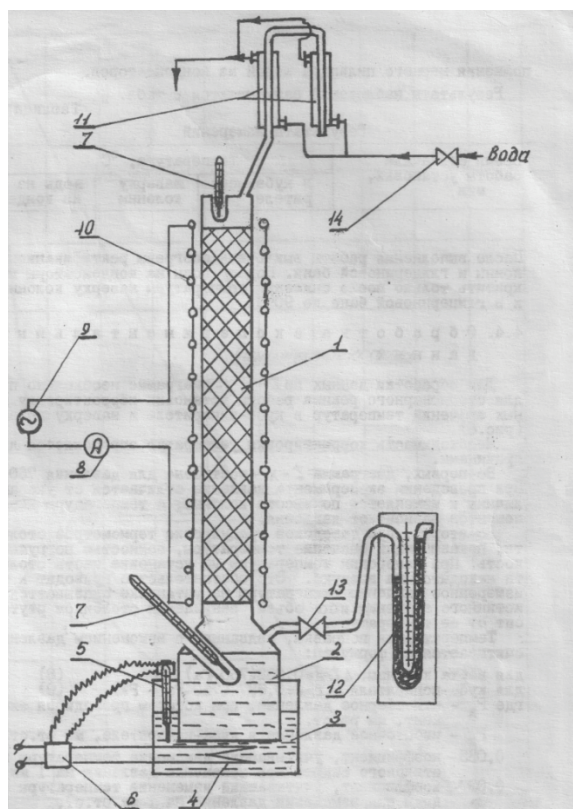


Рис. 6. Схема установки:

- 1 – ректификационная колонна; 2 – куб-испаритель; 3 – глицериновая баня;
4 – теплоэлектронагреватель; 5 – контактный термометр; 6 – реле;
7 – термометры; 8 – амперметр; 9 – трансформатор; 10 – электрообогрев колонны; 11 – теплообменники (конденсаторы); 12 – манометр; 13, 14 – краны

Колонна (1) и куб-испаритель (2) имеют независимые теплообогревы (10) и (4). Напряжение на электрообогрев (10) колонны подается с целью компенсации тепловых потерь в окружающую среду при ее работе, регулируется автотрансформатором (9), а сила тока контролируется амперметром (8). Напряжение на электронагреватель (4) в глицериновой бане подается через реле (6), связанное с контактным термометром (5), что обеспечивает в глицериновой бане постоянную температуру, значение которой устанавливается по контактному термометру.

Установка оснащена следующими приборами: термометрами (7) для измерения температуры в кубе-испарителе и наверху колонны и манометров (12) для измерения избыточного давления в кубе-испарителе.

Для измерения расхода и температуры воды на выходе из дефлегматоров (11) к установке прилагаются мерный цилиндр, секундомер и термометр.

Методика проведения работы

1. Перед началом эксперимента вместе с лаборантом необходимо проверить уровень глицерина в бане и правильность установки температуры по контактному термометру, закрыть кран (13) и подсоединить шланг от крана (14) к линии подачи воды на конденсаторы, а также измерить атмосферное давление по инспекторскому барометру.
2. Открыть кран (14) для подачи воды на конденсаторы.
3. Включить обогрев глицериновой бани и ректификационной колонны.
4. В процессе выполнения работы через каждые 5 минут снимать значения температур с точностью до 0,1 °С в кубе-испарителе, наверху колонны и воды на выходе из конденсаторов до тех пор, пока во всех точках показания термометров не будут изменяться в течение трех последовательных измерений. Это означает, что установка вышла на установившийся режим работы.
5. В установившемся режиме работы установки открывается кран (13) и измеряется давление в кубе колонны, а также определяется время заполнения мерного цилиндра водой из конденсаторов.
6. После выполнения работы выключить обогревы ректификационной колонны и глицериновой бани.
7. Подачу воды на конденсаторы можно прекратить только после снижения температуры наверху колонны до 20 °С и в глицериновой бане до 90 °С.

Таблица 8 – Результаты измерений

Время от начала работы установки, мин	Температура, °С		
	В кубе-испарителе	Наверху колонны	Воды на выходе из конденсаторов
-	-	-	-

Кроме того, для выполнения расчетов необходимо зафиксировать следующие показатели: атмосферное давление – P , мм. рт. ст.; избыточное давление в кубе-испарителе – P_k , мм. рт. ст.; температуру воздуха в помещении – t_{cp} , °С; время заполнения мерного цилиндра объемом V , литры, водой из конденсаторов.

Обработка экспериментальных данных

Для обработки данных по $t - x, y$ – диаграмме необходимо провести для стационарного режима работы установки корректировку полученных значений температур в кубе-испарителе и наверху колонны (рис. 7).

Необходимость корректировки температур определяется двумя причинами.

Во-первых, диаграмма $t - x, y$ построена для давления 760 мм рт. ст. При проведении эксперимента давление отличается от указанной величины и измеряется по высоте колонны, а температуры кипения компонентов зависят от давления.

Во-вторых, при заводской градуировке термометров столбик ртути, показывающий значение температуры, полностью погружен в жидкость. При измерении температуры на установке часть столбика ртути находится в воздухе. Это обстоятельство приводит к тому, что измеренное значение температуры на установке оказывается ниже ее истинного значения, т. к. объем, занимаемый столбиком ртути, зависит от ее температуры.

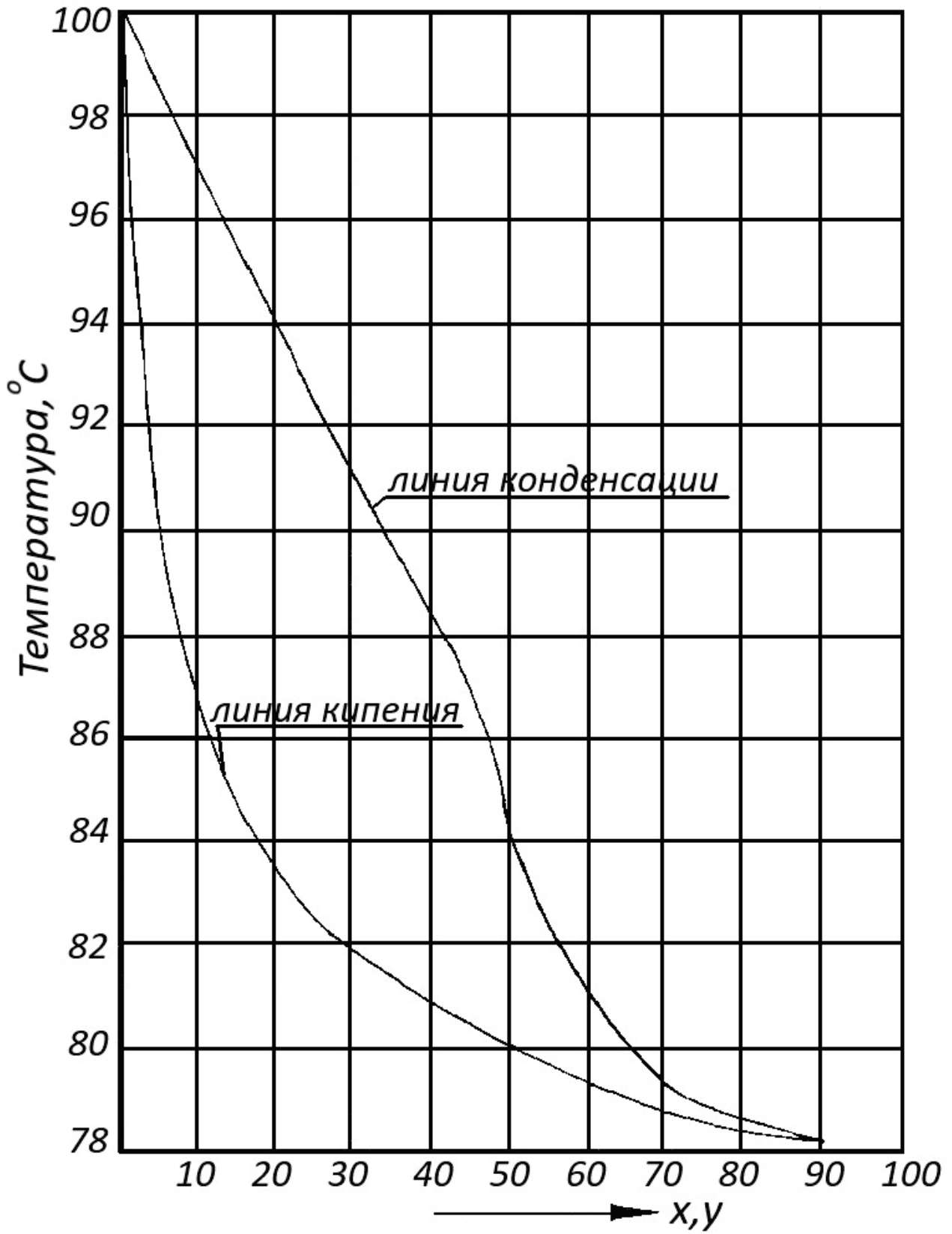


Рис. 7. Диаграмма $t - x, y$ для системы этиловый спирт-вода

Температурная поправка, связанная с изменением давления, рассчитывается по формулам:

для верха колонны

$$-\Delta t_{P_B} = 0,033(760 - P_a), \quad (4.1)$$

для куба-испарителя:

$$-\Delta t_{P_K} = 0,037(760 - P_a + P_K), \quad (4.2)$$

где P_a – атмосферное давление, при котором проводился эксперимент, мм. рт. ст.,

P_K – избыточное давление в кубе-испарителе, мм. рт. ст.;

0,033 – коэффициент, учитывающий изменение температуры кипения этилового спирта при изменении давления на 1 мм. рт. ст.;

0,037 – коэффициент, учитывающий изменение температуры кипения воды при изменении давления на 1 мм. рт. ст.

Рассчитанные поправки температуры могут иметь как положительное, так и отрицательное значение.

Температурная поправка, связанная с тем, что часть столбика ртути, показывающего температуру, не погружена в жидкость, определяется зависимостью:

$$\Delta t_{\text{ж}} = 0,00016(t - 50) \cdot (t - t_{\text{ср}}), \quad (4.3)$$

где t – температура наверху колонны или в кубе-испарителе при установившемся режиме;

50 – температура столбика ртути, погруженного в жидкость для термометров, применяемых на установке;

$t_{\text{ср}}$ – температура окружающего воздуха.

По формуле (4.3) рассчитывают поправки для верха колонны ($\Delta t_{\text{жВ}}$) и для куба-испарителя ($\Delta t_{\text{жК}}$).

Истинные значения температур кипения, приведенные в давлению 760 мм рт. ст., равны:

$$t_n = t + \Delta t_p + t_{\text{ж}}. \quad (4.4)$$

По формуле (4.4) определяется температура наверху колонны и в кубе-испарителе.

По истинным значениям температур $t_{\text{нв}}$ и $t_{\text{нк}}$ установившегося режима работы установки с помощью $t - x, y$ диаграммы для системы этиловый спирт – вода определяются на линии кипения молярные содержания низкокипящего компонента – этилового спирта, в дистилляте $x_{\text{д}}$ (по $t_{\text{нв}}$) и в кубовом остатке $x_{\text{к}}$ (по $t_{\text{нк}}$).

Диаграмма $t - x, y$ построена по справочным данным, приведенным в приложении 4. Данные этого же приложения использованы и при построении $y - x$ диаграммы (рис. 8), с помощью которой графическим методом определяется общая эффективность исследуемой ректификационной установки как число теоретических тарелок $n_{\text{т}}$, построенных между рабочими и равновесными линиями.

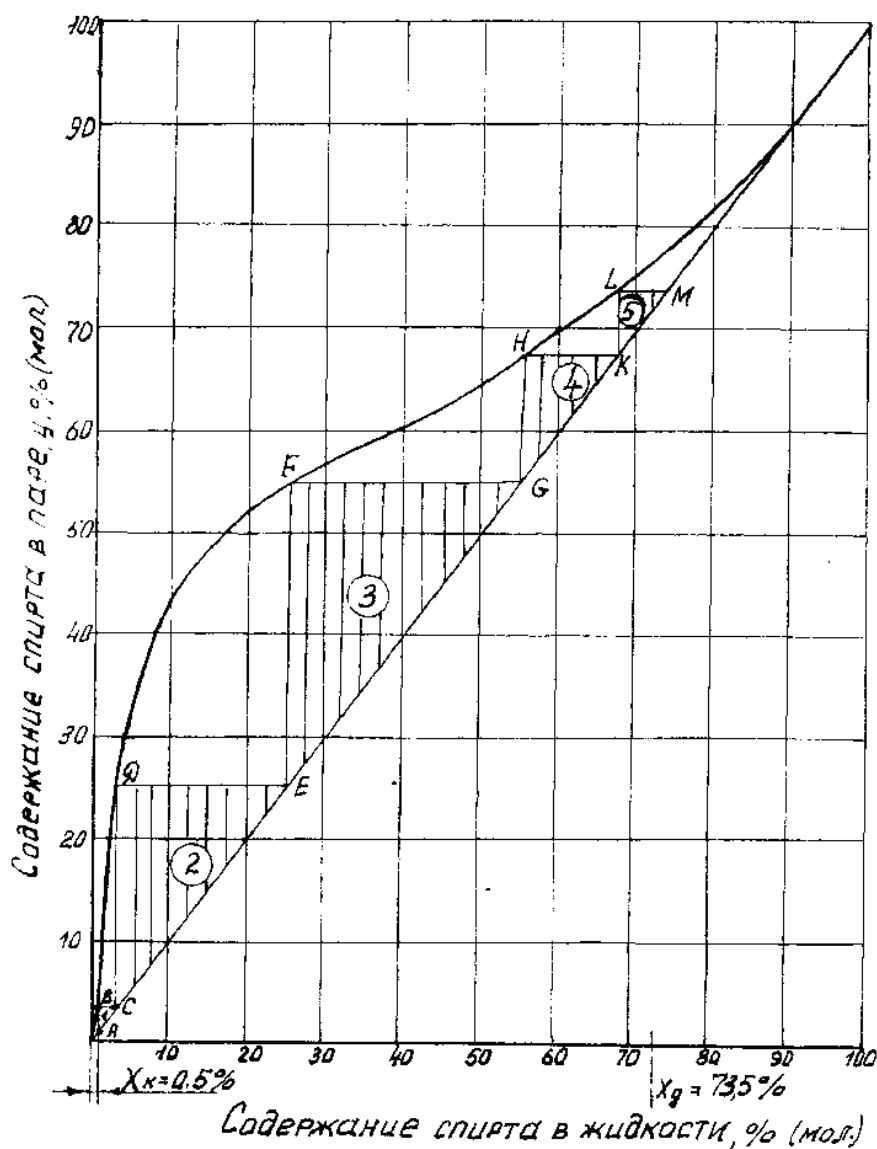


Рис. 8. Диаграмма $y-x$ для системы этиловый спирт-вода

Учитывая, что при работе колонны в режиме с полным возвратом флегмы, рабочие линии совпадают с диагональю квадрата на $y-x$ – диаграмме, построение теоретических тарелок проводят в следующей последовательности. Из точки А, отвечающей составу кубового остатка x_k , проводится вертикальная линия до пересечения с линией равновесия (линия АВ). Из точки В проводится горизонтальная линия до пересечения с рабочей линией (линия ВС). Из точки С проводится вертикальная линия СД до пересечения с линией равновесия и т. д. до тех пор, пока мольное содержание низкокипящего компонента в жидкости (точка М) не станет равным или чуть больше состава дистиллята x . По графику подсчитывается число теоретических тарелок, как число ступеней построенной ломаной линии.

Эффективность непосредственно ректификационной колонны определяется с учетом эффективности куба-испарителя, равной одной теоретической тарелке, по формуле:

$$n = n_T - 1. \quad (4.5)$$

Параллельно с графическим методом определяется эффективность колонны аналитическим методом «от тарелки к тарелке».

Состав пара Y_i^* , равновесный с жидкостью состава x_i , определяется уравнением:

$$Y_i^* = \frac{100 \cdot \alpha \cdot x_i}{100 + (\alpha - 1) \cdot x_i}, \quad (4.6)$$

где α – коэффициент относительной летучести этилового спирта и воды по данным табл. 9 при концентрации спирта в смеси x_i , %.

Расчет начинается с куба колонны. Принимая $x_i = x_0 = x_K$, и по формуле (4.6) предварительно определив α , рассчитывается $Y_i^* = Y_0^*$.

Учитывая, что при работе ректификационной колонны в режиме с полным возвратом флегмы, рабочие линии, совпадая с диагональю квадрата на y - x – диаграмме, описываются уравнением $y = x$, по рассчитанному Y^* определяется состав жидкости, соответствующий первой теоретической тарелке ступени разделения: $x_i = Y_0^*$

Далее, принимая $x_i = x_1$, и определив по нему новое значение α , по формуле (4.6) рассчитывается состав пара $Y_i^* = Y_1^*$, равновесный с жидкостью состава x на первой теоретической тарелке, состав жидкости, соответствующий второй теоретической тарелке $x_2 = Y_1^*$.

Расчет с применением формулы (4.6) продолжается до тех пор, пока на n -ной ступени расчета значение x не станет больше или равно составу дистиллята x_d . Численное значение n числа ступеней расчета и отвечает эффективности собственно ректификационной колонны, так как эффективность куба колонны учитывается значениями Y_0 и x_0 . Значения n_1 , определенные графическим и аналитическими методами, должны совпадать между собой.

Высота насадки, эквивалентная одной теоретической тарелке (ВЭТТ), рассчитывается по формуле $h_3 = H_n/n$, где для исследуемой колонны общая высота насадки $H_n = I_m$.

Для определения количества теплоты, выделившейся при конденсации паров в дефлегматоре, рассчитывается расход воды, подаваемой на дефлегматор:

$$V_0 = V/\tau, \quad (4.7)$$

где V – объем мерного цилиндра, m^3 , τ – время его заполнения водой из конденсаторов, с.

Количество теплоты, передаваемое при конденсации пара к воде в дефлегматоре, составит:

$$Q_d = V_0 \cdot \rho_B \cdot C_B (t_K - t_H), \quad (4.8)$$

где ρ_B – плотность воды, kg/m^3 ;

C_B – теплоемкость воды, $dj/kg \cdot K$;

t_H – температура воды на выходе из конденсатора через 10 минут после пуска установки (за этот интервал времени обеспечивается стационарный температурный режим поступающей на дефлегматор воды);

t_K – температура воды на выходе из конденсатора при установившемся режиме работы установки, т.е. при последнем замере.

По рассчитанному значению Q_d определяется массовый расход флегмы:

$$G = Q_g/z, \quad (4.9)$$

где z – удельная теплота конденсации флегмы, определяемая по правилу аддитивности в зависимости от ее состава в массовых долях.

Учитывая, что электрообогрев колонны компенсирует потери теплоты в окружающую среду, полагается, что количество теплоты Q_k , затрачиваемое на испарение жидкости в кубе-испарителе, равно количеству теплоты Q_d , выделяемому при конденсации пара в дефлегматоре, т. е.: $Q_k = Q_d$.

Зная Q_k , рассчитывается массовый и объемный расходы пара и скорость его движения в нижней части колонны с учетом состава пара, т. е. по данным для воды.

Вопросы для коллоквиума

1. Для какой цели применяются процессы дистилляции и ректификации?
2. В чем физическая сущность и различие этих процессов?
3. Из каких аппаратов состоит дистилляционная установка?
4. Из каких аппаратов состоит ректификационная установка?
5. Как используется процесс дистилляции в ректификационной установке?
6. Какие диаграммы используются для пояснения и расчета процесса ректификации? Приведите их изображения.
7. Какой вид может иметь линия равновесия между составами жидкости и пара?
8. Что такое флегмовое число? Пределы его изменения.
9. Какими уравнениями описываются рабочие линии процесса ректификации для верхней и нижней частей колонны?
10. Как изменяется положение рабочих линий процесса ректификации на диаграмме $y-x$ при изменении флегмового числа?
11. Как определить эффективность колонны через число теоретических тарелок при проектировании колонны?
12. Какие конструкции тарельчатых колонн используются в промышленности? Их принципиальные схемы.

Таблица 9 – Равновесный состав жидкости и пара для систем этиловый спирт-вода при атмосферном давлении 760 мм. рт. ст.

Содержание спирта, % (мол)		Температура кипения, t , °С	Коэффициент относительной летучести, α
В жидкости, x	В паре, y		
1	2	3	4
0	0	100	-
1	10	97,2	11,0
2	17,4	95,0	10,32
3	23,1	93,4	9,71
4	27,7	91,9	9,19
5	31,5	90,5	8,74
6	34,6	89,3	8,29
7	37,3	88,3	7,90
8	39,6	87,5	7,54
9	41,6	87,1	7,20
10	43,4	86,7	6,90
20	52,5	83,2	4,42
30	56,9	81,8	3,08
40	61,0	80,8	2,35
50	65,2	80,0	1,87
55	79,6	79,6	1,70
60	79,3	79,3	1,54
65	79,0	79,0	1,41
70	78,7	78,7	1,30
75	78,4	78,4	1,22
80	78,3	78,3	1,13
81	78,3	78,3	1,11
82	78,3	78,3	1,10
83	78,3	78,3	1,097
84	78,3	78,3	1,063
85	78,3	78,3	1,049
86	78,3	78,3	1,043
87	78,2	78,2	1,027
88	78,2	78,2	1,019
89	78,2	78,2	1,005
90	78,2	78,2	0,977

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Процессы и аппараты химической технологии. Испытание динамических насосов [Текст]: лабораторные работы / Сост.: Н. П. Мидуков, М. В. Колосова, В. С. Куров, А. О. Никифоров. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. – 47 с. [Электронный ресурс]. – URL: <http://nizrp.narod.ru/metod/kafpriarxt/1621337400.pdf>
2. Казаков, В. Г., Луканин, П. В., Громова, Е. Н. Выпаривание растворов целлюлозного производства [Текст]: монография / В. Г. Казаков, П. В. Луканин, Е. Н. Громова. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2022. – 191 с.
3. Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс [Текст]: учебник: в 2 книгах / В. Г. Айнштейн, М. К. Захаров, Г. А. Носов [и др.]; под ред. В. Г. Айнштейна. – 8-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2022 – Книга 1 : Книга 1 – 2022. – 916 с. [Электронный ресурс]. – URL: <https://e.lanbook.com/book/205946> (дата обращения: 22.12.2022).
4. Мидуков, Н. П. Массообменные процессы в целлюлозно-бумажной промышленности [Текст]: учеб. пособие / Н. П. Мидуков, В. С. Куров, А. О. Никифоров; М-во образования и науки РФ, СПбГТУРП. – СПб.: СПбГТУРП, 2015. – 125 с.: ил. 22. [Электронный ресурс]. – URL: <http://nizrp.narod.ru/metod/kafpriarxt/2.pdf>
5. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий [Текст]: в 2 ч. / под ред. Г. М. Островского. – СПб.: Проффессионал.
 - Ч. 1. – 2004. – 846 с.
 - Ч. 2. – 2006. – 920 с.