

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

—
ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

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

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ

**Учебно-практическое пособие
для выполнения лабораторных работ**

Санкт-Петербург

2016

УДК 66.01 (075)
ББК 35.11я 7
М 578

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

Процессы и аппараты: учебно-практическое пособие для выполнения лабораторных работ/ ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2016. – 108 с.: ил. 22.
ISBN-978-5-91646-096-4

Излагаются основы расчётов типовых физических процессов. Большое внимание уделено практическим методам самостоятельной работы студентов. Приводятся расчеты основных технологических параметров процессов и аппаратов химической технологии.

Пособие предназначено для студентов технических вузов, обучающихся по направлениям: 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии»; 15.03.02 «Технологические машины и оборудование»; 18.04.01 «Химическая технология»; 240401.65, 240406.65 «Химическая технология органических веществ», «Технология химической переработки древесины»; 240801.65 «Машины и аппараты химических производств»; 150405.65 «Машины и оборудование лесного комплекса».

Рецензенты: Яблокова М.А., д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой инженерного проектирования Санкт-Петербургского государственного технологического университета (Технического университета);

Осипов П.В., д-р техн. наук, главный консультант в России, странах Балтии, фирма BASF .

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом университета в качестве лабораторного практикума.

Редактор и корректор Т.А.Смирнова

Техн. редактор Л.Я. Титова.

Темплан 2016 г., поз. 45

Подп. к печати 02.06.2016. Формат 60х84/16. Бумага тип. №1.

Печать офсетная. Объём 6,75 печ. л., 6,75 уч. – изд.л. Изд. № 45.

Тираж 100 экз. Цена «С». Заказ

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4.

© Высшая школа технологии и энергетики
СПбГУПТД, 2016

© Мидуков Н.П., Куров В.С., Никифоров А.О.,
2016

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

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ

**Учебно-практическое пособие
для выполнения лабораторных работ**

Санкт-Петербург

2016

ВВЕДЕНИЕ

В современной инженерной практике сочетаются теоретические и экспериментальные методы изучения и анализа процессов и аппаратов. Рациональное сочетание этих методов обеспечивает успешное решение задач по проектированию новых и по эффективной эксплуатации существующих установок.

Задачи учебно-практического пособия для выполнения лабораторных работ по курсу процессов и аппаратов химической технологии заключаются в закреплении и углублении знаний, полученных при изучении теоретической части курса, приобретении навыков экспериментального исследования и применении экспериментальных данных для инженерных расчетов. Пособие охватывает основные разделы курса – гидромеханические, тепловые и массообменные процессы [1-4]. Каждая работа предусматривает детальное ознакомление с экспериментальной установкой, проведение необходимых исследований, обработку полученных опытных данных и выполнение на их основе расчетного задания.

Обработка опытных данных и проведение последующих расчетов проводится только в международной системе единиц СИ. Для перевода физических величин из одной системы единиц в другую следует пользоваться таблицей LVIII [5].

В результате прохождения материала лабораторного практикума у студентов должны выработаться правильные представления о роли и значении расчетных и экспериментальных методов в инженерной практике.

До начала экспериментальной работы студент обязан изучить инструкцию по технике безопасности при работе в лаборатории, разобраться в содержании работы, порядке ее проведения и устройстве установки.

РАБОТА № 1

1.1. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ НАПОРНОГО ТРУБОПРОВОДА

1.1.1. Описание гидравлического стенда

Стенд (рис.1.1) предназначен для проведения лабораторных работ по исследованию гидравлических сопротивлений элементов (модулей) напорного трубопровода по дисциплинам: «Гидравлика», «Процессы и аппараты химической технологии».

Стенд обеспечивает возможность демонстрации гидродинамических явлений, измерения гидродинамических параметров и знакомства с методами и средствами измерения этих параметров.

Внешний вид стенда представлен на рис.1.1, а его гидравлическая схема на рис.1.2.

В состав стенда входят:

Стол 1 со стойками 11 и стяжкой 12. Щит пьезометров 2, на котором расположены: панель управления 13, четыре группы пьезометров 14-17 и панель информации 18. На панели управления 13 размещены клавиши включения сети, насоса Н1 и помпы Н2.

Коллектор 3, жестко закрепленный на горизонтальной поверхности стола, с вмонтированными тремя вентилями В8-В10 (рис.1.2), к которым через резьбовые втулки с помощью накидных гаек подсоединяются исследуемые модули (М1, М2, М3, М5, М6 и М7). Одновременно можно установить не более трех модулей.

Ротаметры 4 (РТ1 и РТ2), нижние фланцы которых через вентили В1 и В2 соединены с насосом 8 (Н1).

Напорная магистраль 5, которая с одной стороны соединяется с верхними фланцами ротаметров 4, а с другой - гибким шлангом с коллектором

3. На магистрали установлена мерная диафрагма 6. Бак 7 с насосом 8 и помпой 9.

Делительная воронка 10, которая через капельницу 21 с вентилем В7 соединена с капиллярной трубкой модуля 20 (М4 - «Режимы течения»), вход которого жестко закреплен на горизонтальной поверхности стола и подведен гибким шлангом к помпе 9.

Комплект исследуемых модулей М1– М7: М1- потери напора по длине в круглой трубе; М2 - потери напора на внезапном расширении; М3 - диаграмма Бернулли; М4 - режимы течения; М5 - потери напора на внезапном сужении; М6 - потери на диафрагме; М7 - потери на дросселе.

Модули М5-М7 на схеме (рис.1.2) не показаны.

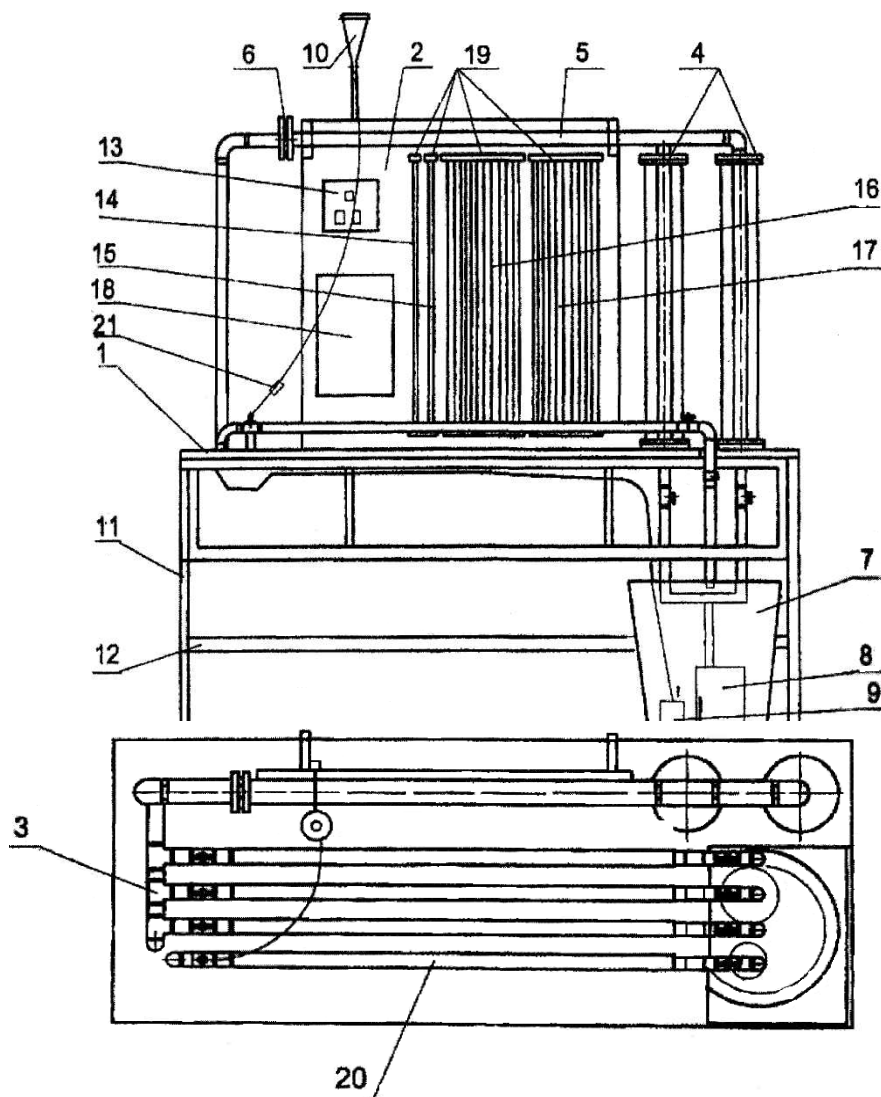


Рис.1.1. Внешний вид стенда ТМЖ 2М

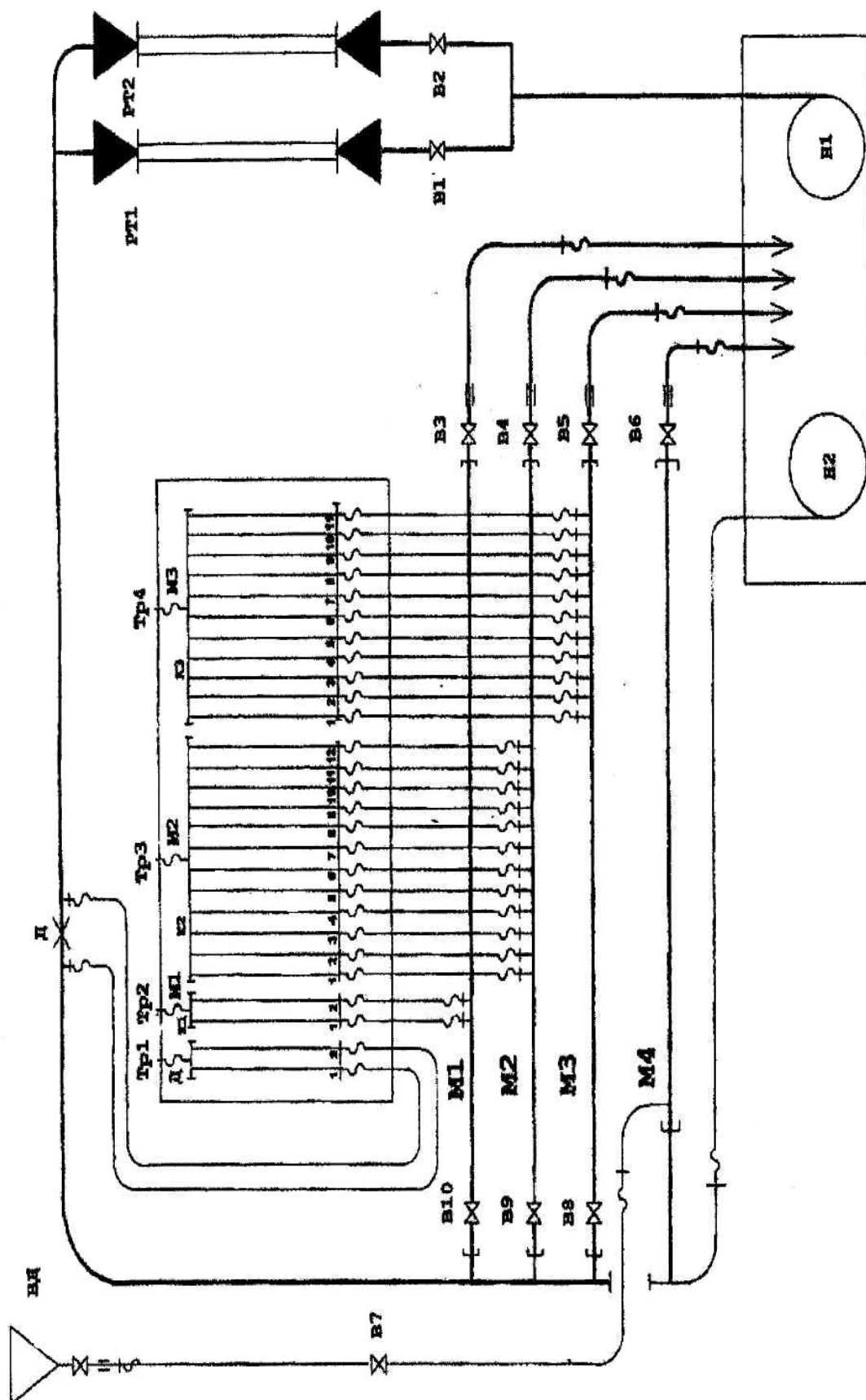


Рис. 1.2. Гидравлическая схема стенда ТМЖ 2М

Модули М1 - М7 представляют собой прозрачные трубы, выполненные из оргстекла и имеющие различные сечения и профили. На входном и выходном концах модулей установлены резиновые уплотнительные кольца. Выходные концы модулей с помощью накидных гаек через резьбовые втулки соединены с выпускными вентилями В3 - В6 (см.рис.1.2), к которым подведены сливные шланги. Выпускные вентили В3 - В5 закреплены на горизонтальной поверхности стола гайками и могут быть легко демонтированы для быстрой замены исследуемых модулей. Под модулями размещен поддон из оргстекла.

Контролируемые точки модулей, установленных в коллекторе 3, через стеклянные штуцеры соединены гибкими трубками с соответствующими группами пьезометров 15-17.

Каждая из четырех групп пьезометров 14-17 состоит из прозрачных пьезометрических трубок, верхние концы которых соединяются между собой общими коллекторами 19. От каждого коллектора отводятся гибкие сливные трубки с зажимами (для выравнивания давления в пьезометрах). Нижние концы пьезометрических трубок каждой группы пьезометров соединены с соответствующим штуцерами диафрагмы 6 и штуцерами исследуемых модулей М1 – М3 и М5 - М7. Возле каждой пьезометрической трубки расположены измерительные линейки.

Первая группа пьезометров 14 состоит из двух пьезометрических трубок и соединена с диафрагмой 6, вторая группа 15 (из двух пьезометров) - с модулем М1, третья группа 16 (из двенадцати пьезометров) - с модулями М2, М6 и М7, четвертая группа 17(из 11 пьезометров) - с модулями М3 и М5.

1.1.2. Основные технические характеристики стенда

Максимальный расход жидкости

(по двум ротаметрам)..... $4 \text{ м}^3/\text{ч} = 1,11 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$

Максимальный напор жидкости, создаваемый насосом Н 1:.....	10,5 м
помпой Н 2.....	1,3 м
Вместимость питающего бака	65 л
Внутренний диаметр диафрагмы, установленной на напорной магистрали	22 мм
Внутренний диаметр трубы напорной магистрали.....	42 мм
Пределы измерения уровня жидкости по шкале пьезометров	600 мм
Цена деления шкалы пьезометров.....	$2 \pm 0,4$ мм
Электропитание стенда от сети переменного тока напряжением.....	220 ± 22 В
Потребляемая мощность при номинальном напряжении питания.....	не более 500 Вт
Время подготовки стенда к работе.....	не более 20 мин

1.1.3. Подготовка стенда к работе

1. Убедиться, что на стенде установлены модули, с которыми должна выполняться работа. При необходимости замена модуля осуществляется в следующей последовательности:

- разъединить гибкие трубки модуля и пьезометров;
- отвернуть накидные гайки 1 с резьбовых втулок 2 (рис.1.3) на входе и выходе модуля;
- ослабить гайку 3 крепления выпускного вентиля, не разворачивая пробку 4;

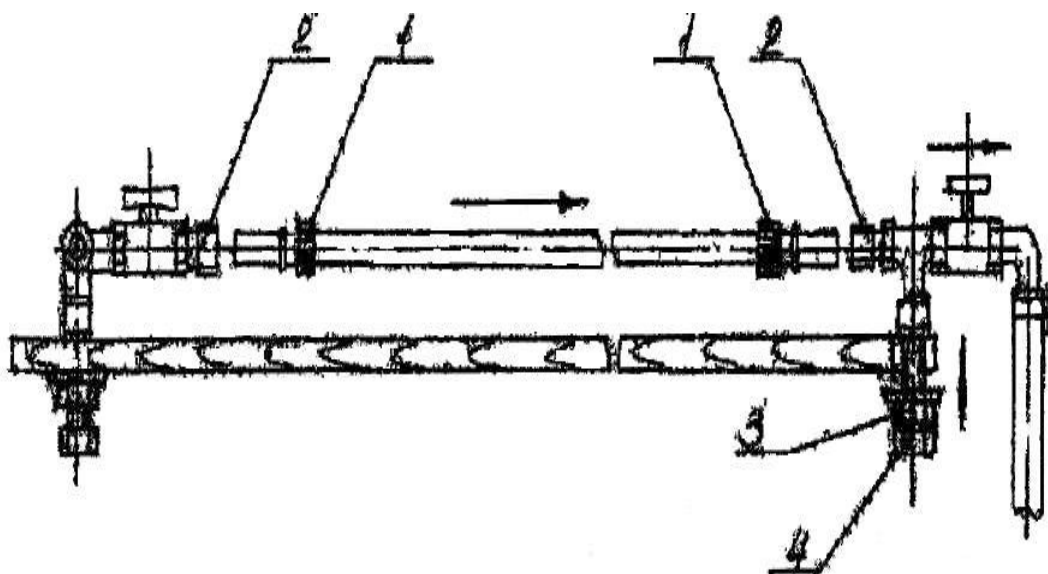


Рис. 1.3. Подготовка стенда к работе

- придерживая модуль, выдвинуть выпускной вентиль наружу через паз в плоскости стола;
- вытащить модуль из резьбовой втулки 2 входного отверстия;
- установить исследуемый модуль в обратном порядке. При этом модуль М1 устанавливается между вентилями В10 – В3, модуль М2 - между вентилями В9 - В4, модуль М3 - между вентилями В8 - В5, модуль М5 - между вентилями В8 – В3 (съемный вентиль В3 устанавливается напротив вентиля В8), модуль М6 - между вентилями В10 – В3, а модуль М7 - между вентилями В8 - В5.

2. Убедиться в отсутствии инородных тел в питающем баке (во избежание повреждения элементов стенда). Бак заполнен дистиллированной водой.

3. Убедиться, что концы сливных шлангов погружены в воду в баке.

4. При работе с модулями М1-М3 и М5-М7 (см. рис.1.2) необходимо:

- закрыть вентили В1 и В2 на напорных трубопроводах насоса;
- открыть входные вентили В8 - В10 и выходные вентили В3-В5;
- пережать трубки коллекторов Тр1 - Тр4 зажимами;
- подключить стенд к сети;
- включить насос Н1 на панели управления;

- во избежание гидравлического удара и повреждения ротаметров плавно открыть вентиль В1, затем - вентиль В2 и заполнить систему водой;
- пропускать воду через модули до наступления установившегося режима, который определяется отсутствием воздушных пузырьков в модулях;
- открывая зажим трубки Тр1, заполнить пьезометры диафрагмы Д водой, сливая воду из трубки в мерную кружку. При отсутствии воздуха в пьезометрах, коллекторе и трубке пережать трубку Тр1 зажимом;
- поочередно открывая зажимы трубок Тр2, Тр3 и Тр4 и прикрывая соответственно выходные вентили В3, В4 и В5, добиться переполнения трубок пьезометров водой, сливая ее в мерную кружку. При отсутствии воздуха в системе пережать трубки Тр2 -Тр4 зажимами;
- закрыть выходные вентили В3 - В5, выключить насос и закрыть вентили В1 и В2. Время между закрытием вентилей В3-В5 и выключением насоса не должно превышать 5-7 с;
- открывая и закрывая поочередно зажимы трубок Тр1 - Тр4 и приоткрывая выходные вентили В3 - В5, установить уровень воды в пьезометрах примерно на средней отметке («нулевой» уровень).

5. Подготовка к работе модуля М4 осуществляется в следующей последовательности:

- закрыть вентиль В7 капельницы и вентиль воронки ВД (см. рис.1.2);
- приготовить и залить в воронку подкрашенную жидкость;
- открыть вентиль В6;
- включить помпу Н2 на панели управления;
- удалить воздух из модуля, сливая воду в бак до наступления установившегося режима (отсутствие пузырьков воздуха);
- закрыть вентиль В6;
- выключить помпу Н2.

1.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ ОТ РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Цель работы – провести исследование с целью получения коэффициента гидравлического трения λ в функции от критерия Рейнольдса Re .

Стенд располагает одним участком трубопровода - модулем М1 (рис.1.4) для выполнения данной работы. Длина трубопровода $l = 0,5$ м, диаметр $d = 16$ мм.

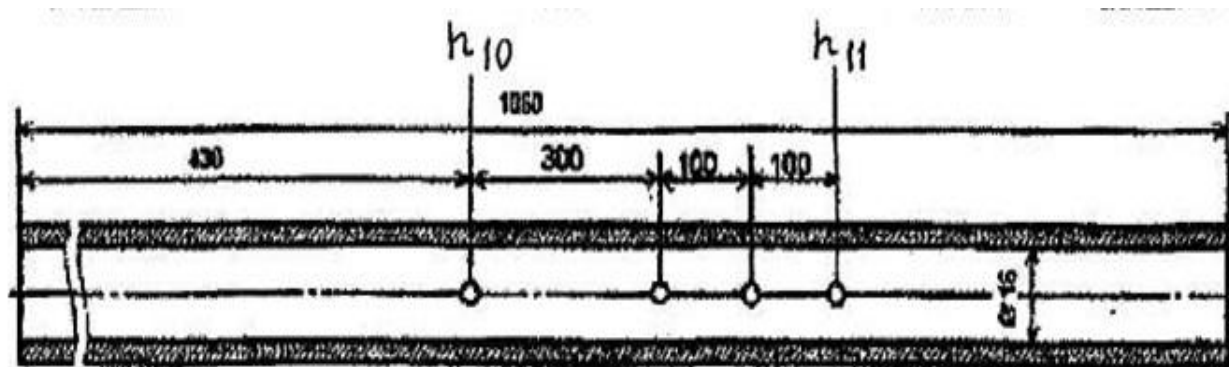


Рис 1.4. Модуль М1 – к определению потерь напора по длине

Порядок выполнения работы

Работа выполняется на заранее заполненном водой модуле М1 в следующей последовательности:

- перед началом эксперимента измерить температуру воды в баке;
- открыть вентили В10 и В3(остальные вентили закрыты);
- включить насос Н1 на панели управления;
- плавно открывая вентиль В1, установить минимально возможный расход, при котором на пьезометрах модуля наблюдается небольшой напор (уровни воды в пьезометрах находятся на разной высоте);
- при установившемся режиме течения записать показания пьезометров на диаграмме (h_{10} и h_{11}) и показания ротаметра РТ1;

- увеличивая вентилем В1 расход воды при установившемся режиме, записывать показания указанных пьезометров и ротаметра. Если показание ротаметра РТ1 достигает приблизительно 95 делений, то расход воды увеличивают, открывая вентиль В2, и показания снимают по ротаметрам РТ1 и РТ2. Регулировка расхода может также осуществляться вентилем В3 (на выходе воды из модуля). Увеличение расхода воды производят не менее 10 - 12 раз, т.е. проводится измерение давления в сечениях 10 – 10 и 11 – 11 с помощью пьезометров h_{10} и h_{11} не менее 10 раз, что позволит в конечном итоге получить зависимость $\lambda = f(Re)$;

- после последнего замера закрыть вентиль В3, выключить насос Н1 и закрыть вентили В10, В1 и В2. Время между закрытием вентиля В3 и выключением насоса - не более 5 - 7 с. Результаты измерений записывают в табл.1.1.

Таблица 1.1

№ п/п	Опытные данные						Результаты обработки					
	показания ротаметров		показания пьезометров									
			диафраг.		модуля							
	PT1	PT2	h ₁	h ₂	h ₁₀	h ₁₁	V, м ³ /ч	Q, м ³ /с	ϑ, м/с	h _ℓ , м	Re	λ
	дел.		мм вод. ст		мм вод. ст							

Обработка опытных данных

По показаниям ротаметров РТ1 и РТ2 или диафрагмы и тарировочным графикам определяется объемный расход воды V , м³/ч. При этом для ротаметров используется график (см. рис.1.6), для диафрагмы – рис.1.5.

Учитывая, что исследования выполнены при установившемся движении жидкости, ее объемный расход равен:

$$V = \frac{V_0}{\tau_{cp}}, \quad (1.1)$$

где V_0 - объем жидкости, м³, прошедшей через расходомер за время τ_{cp} , с.

При измерениях принимали $V_0 = 0,1 \text{ м}^3$. (Внимание! Значение V_0 при проведении эксперимента может быть изменено преподавателем).

Среднюю скорость потока для его конкретного сечения находят из уравнения неразрывности потока для несжимаемой жидкости:

$$w = V/F, \quad (1.2)$$

где $F = \pi d^2/4$ - площадь поперечного сечения потока, м^2 ;

d - диаметр трубопровода в конкретном его сечении, м.

Так как для горизонтального участка прямого трубопровода постоянного сечения значения нивелирного напора Z и средней скорости w остаются постоянными в любом его сечении, то уравнение Бернулли потока реальной жидкости для сечений, проведенных через точки замера давлений p_{10} и p_{11} , принимает вид:

$$p_{10}/\rho g = p_{11}/\rho g + h_{mp}, \quad (1.3)$$

где ρ - плотность воды, кг/м^3 ;

g - ускорение свободного падения, м/с^2 ;

h_{mp} - потерянный напор, м.вод.столба.

Учитывая, что $p_{10}/(\rho g) = h_{10}$, а $p_{11}/(\rho g) = h_{11}$ имеем:

$$h_{mp} = h_{10} - h_{11}. \quad (1.4)$$

Следовательно, потерянный напор определяется как разность показаний пьезометров p_{10} и p_{11} с учетом их знака.

Тогда из уравнения Дарси находим значение коэффициента гидравлического трения:

$$\lambda = \frac{2h_{mp}dg}{lw^2}. \quad (1.5)$$

Величины в формуле (1.5) имеют следующие единицы измерения:
 $[h_{mp}] = [d] = [l] = \text{м}$; $[g] = \text{м/с}^2$; $[w] = \text{м/с}$.

При расчете критерия Re по формуле 1.21 [5] вязкость воды μ , Па·с, определяют по табл. VI [5] при температуре проведения эксперимента, а плотность воды можно принять равной 1000 кг/м^3 .

По рассчитанным значениям λ и Re строят график зависимости $\lambda=f(Re)$ и с помощью рис.1.5 [5] оценивают степень шероховатости d/e и рассчитывают величину абсолютной шероховатости e , м.

Внимание! При построении графика не следует соединять между собой экспериментальные точки ломаной линией. Учитывая наличие погрешности при проведении эксперимента, следует провести плавную линию между точками (с наименьшим их разбросом от этой линии), аналогично линиям рис. 1.5 [5] в исследованном диапазоне критерия Re .

1.3 ИССЛЕДОВАНИЕ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

Цель работы - построить диаграмму уравнения Бернулли для потока жидкости(воды), движущейся в канале заданного профиля.

Схема опытного участка трубопровода обозначена на рис.1.2 под условным обозначением «М3».

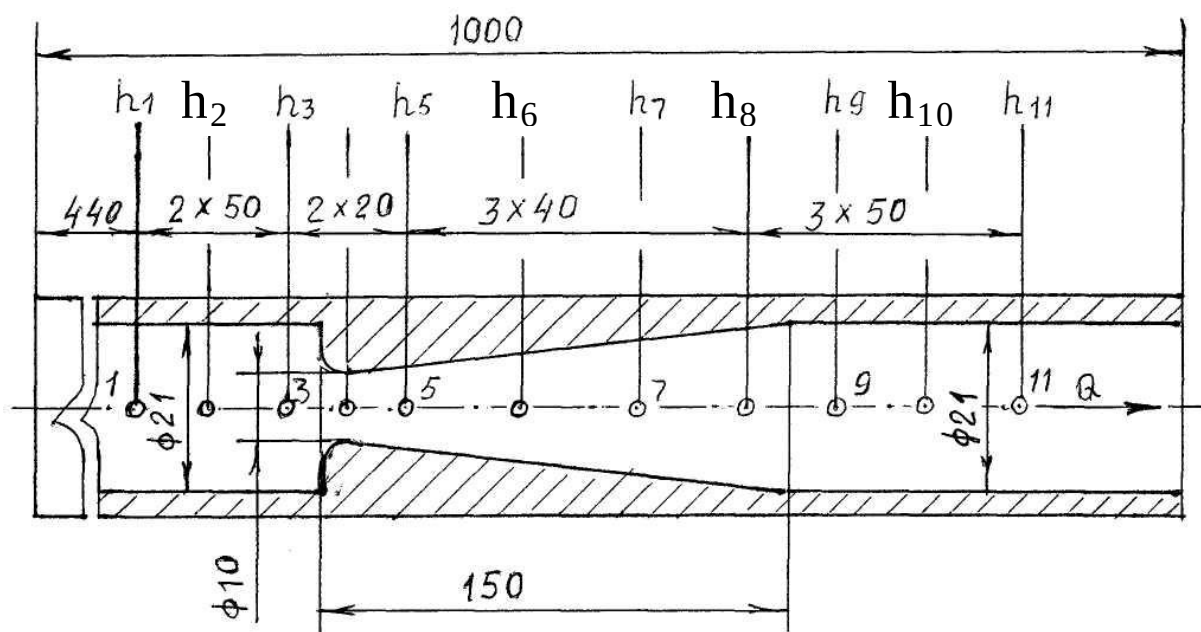


Рис. 1.5. Модуль М3- к построению диаграммы уравнения Бернулли.

Как видно по рис.1.5, данный канал состоит из двух характерных участков: участка между сечениями h_1 и h_4 , где имеет место резкое сужение потока жидкости, и участка между сечениями h_4 и h_9 , где происходит постепенное расширение потока (диффузорное течение).

Весь канал ограничен сечениями h_1 и h_{11} , всего намечено 11 живых сечений, в которых производится измерение давления с помощью пьезометров. Указанные сечения отстоят друг от друга по оси канала на расстояниях, обозначенных на рис. 1.5 (размеры в мм). Общая длина трубопровода – 1000 мм (см. рис.1.2). Длина канала между сечениями h_4 и h_{11} – $h_{1-11} = 410$ мм, длина участка, где наблюдается резкое сужение потока (между сечениями h_1 и h_4) $h_{1-4} = 120$ мм; длина канала между сечениями h_4 и h_9 – $h_{4-9} = 190$ мм; длина диффузора – 150 мм, его внутренний диаметр изменяется от $d = 10$ мм до $d = 21$ мм (см. рис.1.2).

В табл. 1.2 приводятся данные с указанием номеров живых сечений потока, в которых измеряется давление с помощью пьезометров, и диаметры канала сечений.

Таблица 1.2

№ сеч.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d, мм	21	21	21	10	11,47	14,40	17,30	20,27	21	21	21

Порядок выполнения работы

1) Включить насос Н1 на панели управления при открытом вентиле В5 на выходе из модуля и открытом кране В8 на входе в него.

2) Управляя вентилем В5 и Тр4, выдавить воздух из шлангов и пьезометров манометрического щита.

3) Установить расход воды (не более 35 делений по ротаметру РТ1), открывая вентиль В1. Если показания ротаметра РТ1 достигают около 95 делений, то расход воды увеличивают, открывая вентиль В2, и показания снимают по ротаметрам РТ1 и РТ2.

4) При установившемся режиме течения снять показания ротаметров, пьезометров диафрагмы, пьезометров исследуемого модуля и температуры воды, заноса данные в табл.1.3.

5) Регулировка расхода может также осуществляться вентилем В3 (на выходе воды из модуля).

6) Измерение параметров потока воды производится при 10-12 значениях расхода Q , постепенно его увеличивая.

Обработка опытных данных

Для построения диаграммы уравнения Бернулли необходимо знать средние скорости потока жидкости в живых сечениях:

1. По показаниям диаграммы или ротаметров (РТ1 и РТ2) определяется объёмный расход воды Q . С этой целью проводятся специальные испытания диафрагмы и ротаметров, т а р и р о в о ч н ы е г р а ф и к и которых в дальнейшем используют для определения расхода жидкости. В нашем случае такими графиками являются: д л я д и а ф р а г м ы – график, рис. 1.5; для р о т а м е т р о в (РТ1 и РТ2) - график, рис. 1.6.

Ф о р м а 1 . Температура воды: °С.

-Показания пьезометров: диафрагмы: h_1 - мм вод. ст.; h_2 - мм вод. ст.

-Показания ротаметров: РТ1 - дел., РТ2 - дел.

Таблица 1.3

Показания пьезометров модуля h_i , мм вод.ст., в сечениях											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

2. По полученному значению расхода жидкости (воды) Q , м³/с и диаметрам живых сечений (табл.9) определяются средние скорости потока $v_{cp,i} = Q/f_i$ ($i = 1 \dots 11$) в живых сечениях.

3. По полученным $v_{cp,i}$ определяются скоростные (динамические) напоры $H_{ск,i} = v_{cp,i}^2/2g$ в живых сечениях.

Построение диаграммы уравнения Бернулли

График уравнения Бернулли строится в координатах $Z \perp X$, где Z – вертикальная, а X – горизонтальная координата. Построение графика выполняется в следующем порядке:

- 1) выбираются масштабы: горизонтальный и вертикальный;
- 2) изображается профиль канала (профиль модуля МЗ);
- 3) по оси ординат OZ откладываются пьезометрические напоры, измеренные в процессе опытов в каждом сечении, т.е в сеч. 1...14. При этом величины откладываются от оси канала;
- 4) по заданному значению расхода Q (м³/с) определяются значения скоростного напора $v_{cp,i}^2/2g$ в каждом i - м сечении потока жидкости ($i=1 \dots 14$);
- 5) определяется напор потока в исходном i -м сечении ,который равен $H_1 = h_1 + v_1^2/2g$ (h_1 -показания 1-го пьезометра);
- 6) по полученному значению $H_1 = H_T$ (H_T - теоретический напор) строится линия теоретического напора;
- 7) по значениям пьезометрического напора в каждом i -м сечении строится линия пьезометрического (она же - линия гидростатического) напора;
- 8) по значениям полного (она же-действительного) напора $H_i = h_i + v_i^2/2g$, где h_i - пьезометрический напор , $v_i^2/2g$ - динамический напор строится линия действительного напора.

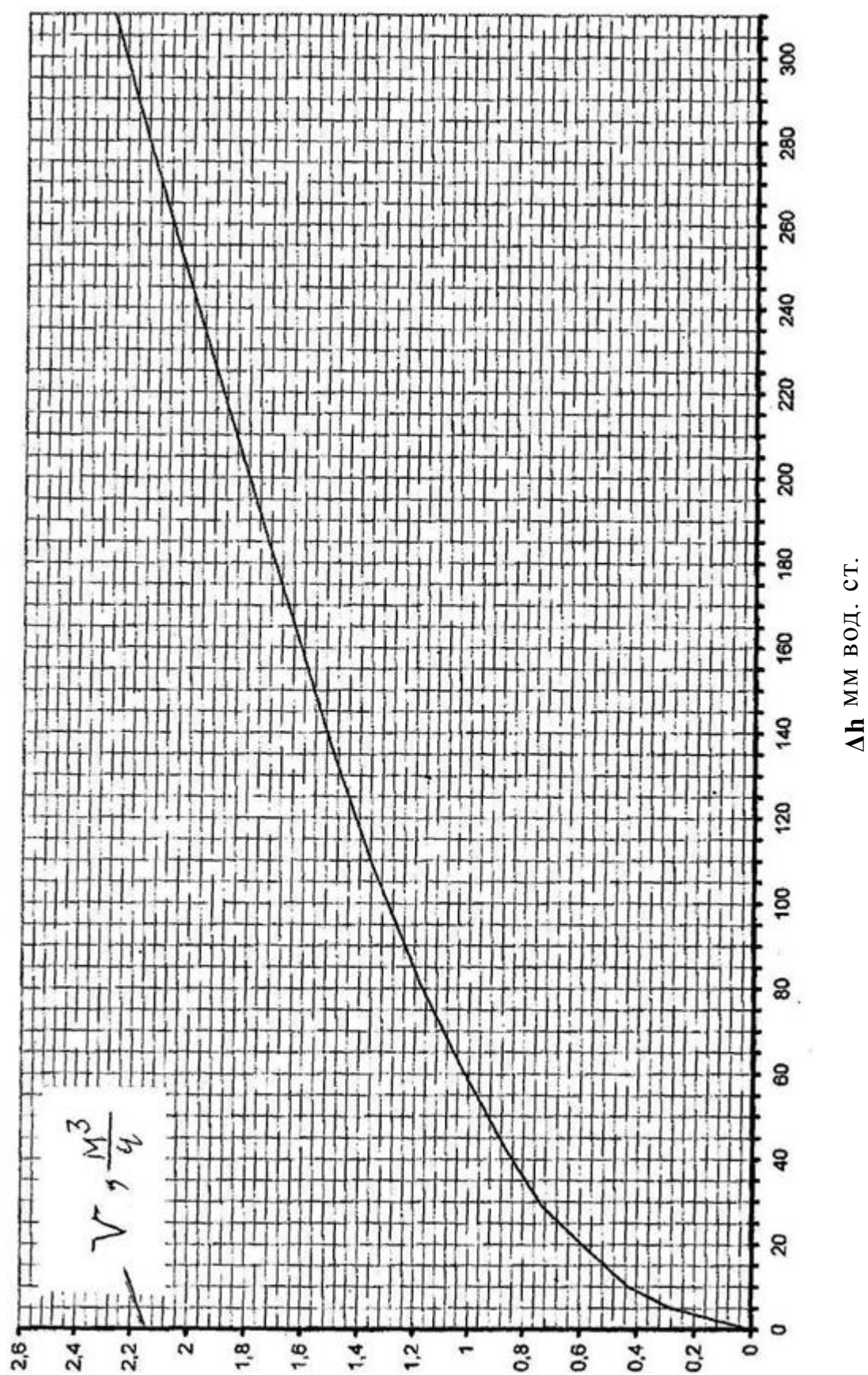


Рис. 1.6. Тарировочный график диафрагмы

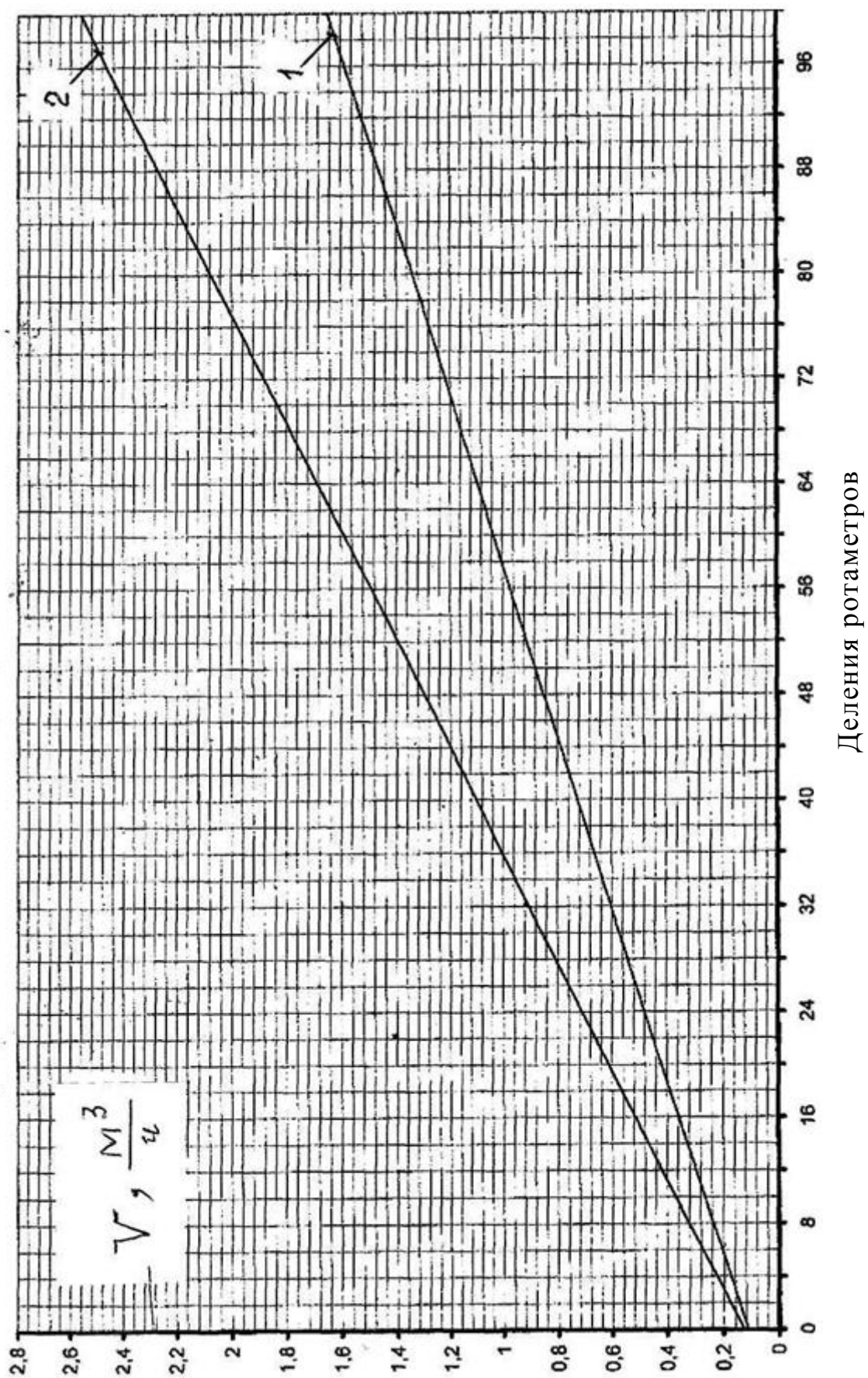


Рис. 1.7. Тарировочный график ротаметров (PT1 - линия 1 и PT2 - линия 2)

1.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕСТНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ОТ РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Цель работы – определить коэффициенты местных гидравлических сопротивлений (резкого расширения, резкого сужения, диффузора, конфузора), установить их зависимость от критерия Рейнольдса Re и проанализировать её.

Схемы и размеры опытных участков трубопровода.

Стенд содержит 5 опытных участков - модулей, представляющих собой местные гидравлические сопротивления.

К ним относятся модули (далее «М»): М2 - внезапное (резкое) расширение; М3 - диффузор (постепенное расширение); М5- внезапное (резкое) сужение; М6 - диафрагма; М7 - дроссель.

Модуль М3 (диаграмма Бернулли) рассмотрен выше (см. работу №2); модуль М6 будет рассмотрен ниже (см. работу №7). В данном случае рассмотрим два модуля: модуль М2 и модуль М5.

Модуль М2 –внезапное (резкое) расширение трубопровода
Схема модуля М2 приведена на рис.1.8

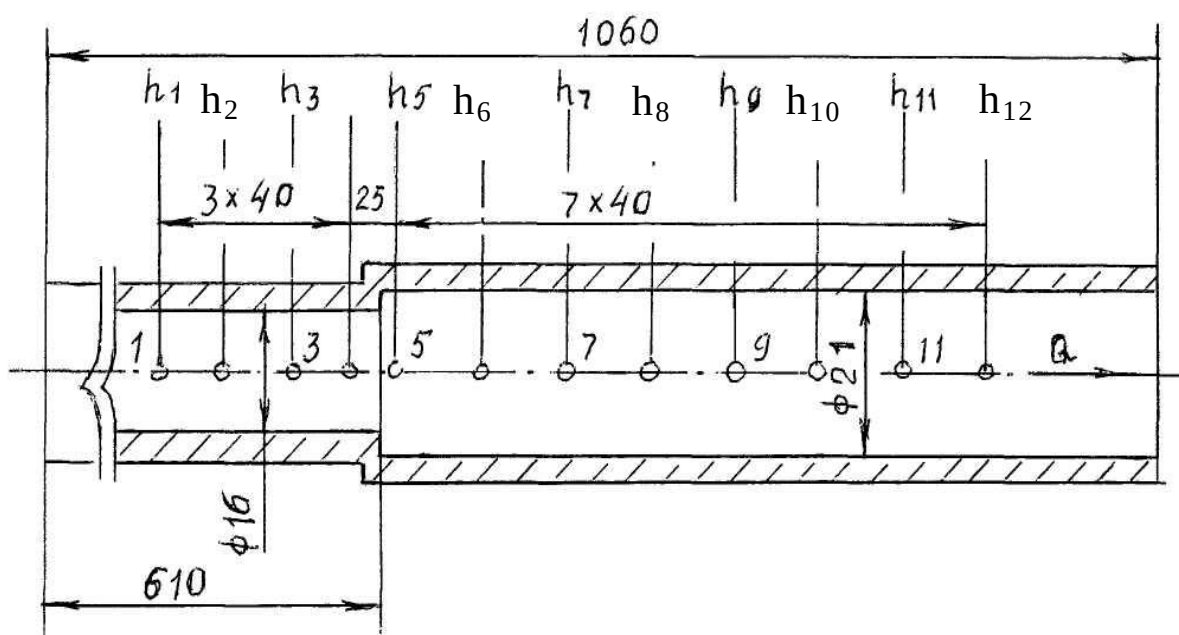


Рис.1.8. Модуль М–внезапное (резкое) расширение трубопровода.

Согласно рис.1.7, имеется резкий переход продольного сечения канала от диаметра $d_1 = 16$ мм к диаметру $d_2 = 21$ мм. Так как после резкого перехода диаметра трубы от d_1 к d_2 формирование потока происходит на определённом расстоянии, то для этого запланировано измерение давления с применением пьезометров в 12 сечениях, обозначенных на рис. 1.7. Это позволяет построить пьезометрическую линию для данного трубопровода, ограниченного сечениями h_1 и h_{12} .

Порядок выполнения работы

1. Заполнить водой модуль №2.
2. Включить насос Н1 на панели управления.
3. Установить расход воды, при котором хорошо видно различие её уровней в пьезометрах, открывая вентили В1 и В2 или прикрывая вентиль модуля В4.
4. При установившемся режиме (что соответствует отсутствию воздуха в модуле и постоянству уровней воды в пьезометрах), записать показания ротаметров, пьезометров на диафрагме и на исследуемом участке модуля (для всех 12 сечений) в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Показания пьезометров модуля h_i , мм. вод. ст., в сечениях											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

-Показания ротаметров: РТ1 - дел., РТ2 - дел.

-Показания пьезометров: диафрагмы: h_1 - мм вод. ст.; h_2 - мм вод. ст.

Эксперимент проводится при 5÷6 различных расходах, которые устанавливаются с помощью вентиля В1, В2 или В4. При проведении эксперимента необходимо тщательно следить за пьезометрами с максимальным и минимальным уровнями воды в них, не допуская перелива её из одного пье-

зометра в другой (через верхний коллектор) или подсоса воздуха из пьезометра в модуль (для пьезометра с минимальным уровнем воды).

Обработка опытных данных и получение искомой зависимости

По измеренным в процессе опыта величинам (табл.1.4) определяются расчётные величины (табл.1.5), которые далее используются для определения искомой величины коэффициента местного сопротивления. Работа выполняется в следующем порядке.

1. По показаниям ротаметров РТ1, РТ2, диафрагмы и тарировочным графикам (см. рис.1.6 и рис.1.7) определяется объёмный расход воды V , м³/ч и далее Q , м³/с.

2. По величине Q , м³/с и диаметрам сечений трубопровода определяются средние скорости потока в исходном сечении h_1 и конечном h_{12} .

3. По опытным данным табл.1.4 строится график пьезометрического напора энергии давления трубопровода.

4. По данному графику определяется максимальное падение напора давления на местном сопротивлении - $\Delta h_{ст}$ (изменение статического напора – энергии давления).

5. Выбираются такие сечения, которые дадут $\Delta h_{ст, max}$. Опыт показывает, что такими сечениями в данном примере являются h_2 и h_7 или h_3 и h_8 . Исходя из этого

$$h_{pp, max} = h_3 - h_8 + (v_3^2 - v_8^2)/2g = \zeta'_{pp} (v_3^2)/2g \quad (1.6)$$

Из (1.1) искомая опытная величина коэффициента гидравлического сопротивления внезапного (резкого) расширения

$$\zeta'_{pp, оп} = (2g/v_3^2) \cdot \Delta h_{pp, max} \quad (1.7)$$

6. Определяется критерий Рейнольдса

$$Re = (v_3 \cdot d_1)/\nu. \quad (1.8)$$

7. Полученные расчётные значения величин заносятся в табл. 1.5.

Таблица 1.5

№ n/n	Расход		Расчетные величины								
	$V,$ $\text{м}^3/\text{ч}$	$Q,$ $\text{м}^3/\text{с}$	h_3	h_8	Δh_{3-8}	ϑ_3	ϑ_8	$\Delta h_{pp},$ мм вод. ст.	$\nu,$ $\text{см}^2/\text{с}$	Re	ζ'_{pp}
	1	2	мм вод. ст.			м/с		8	9	10	11

Модуль М5 - внезапное (резкое) сужение трубопровода

Схема модуля М5 приведена на рис. 1.9.

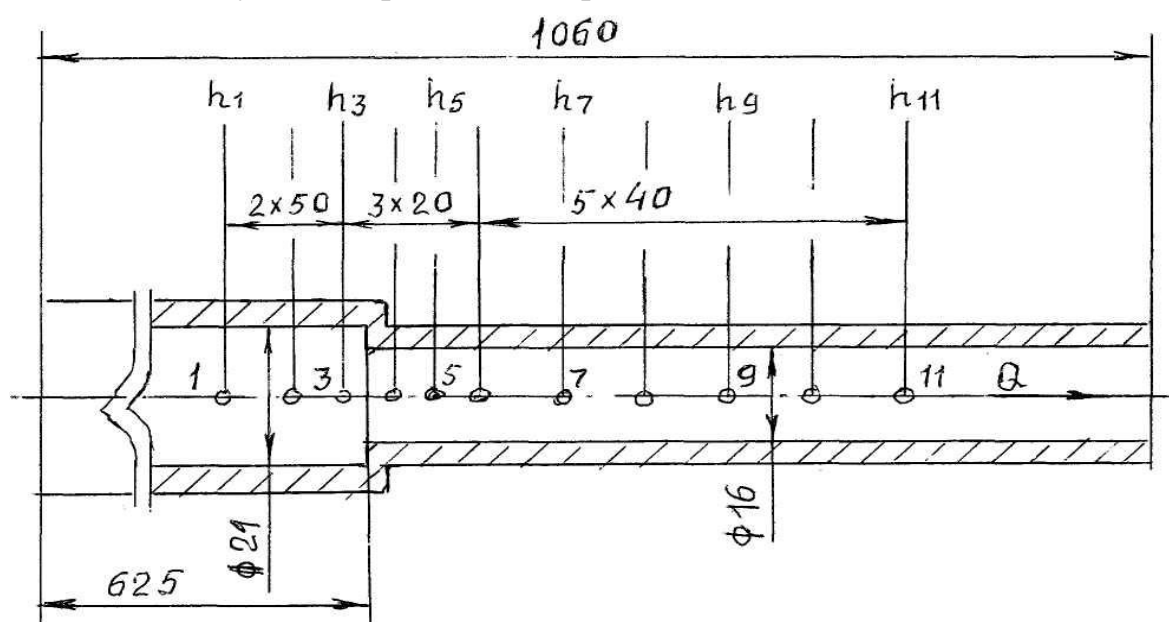


Рис.1.9. Модуль М5 - внезапное (резкое) сужение трубопровода

Порядок выполнения работы

Работа на модуле М5 выполняется в том же порядке, что и на модуле М2. Результаты показаний ротаметров РТ1 и РТ2, а также показаний пьезометров, диафрагмы и пьезометров модуля заносятся в табл. 1.5.

Замечание: В данном случае используется форма табл. 1.5, а номера пьезометров и измеряемые в них пьезометрические напоры соответствуют рис. 1.8.

Обработка опытных данных

1. По опытным данным табл. 1.5 строится график пьезометрического напора трубопровода.

2. По данному графику определяется максимальное падение напора на данном местном сопротивлении $\Delta h_{ст, max}$

3. Определяется потеря напора при резком сужении потока.

$$\Delta h_{p.c} = h_2 - h_9 + \frac{(\vartheta_2^2 - \vartheta_9^2)}{2g} = \zeta_{pc} \frac{\vartheta_9^2}{2g}, \quad (1.9)$$

где $\Delta h_{p.c}$ - максимальные потери напора при резком сужении потока; h_2 и h_9 - пьезометрические напоры (энергия давления) в сечениях 2-2 и 9-9 соответственно; (ϑ_2^2) и (ϑ_9^2) - средние скорости потока в сечениях 2-2 и 9-9;

$h_2 - h_9 = \frac{P_2 - P_9}{\rho g}$ - изменения энергии давления; $\frac{\vartheta_2^2 - \vartheta_9^2}{2g}$ - изменение кинетической энергии на данном местном сопротивлении.

4. Определяется критерий Рейнольдса

$$Re = (\vartheta_9 \cdot d_2) / \nu. \quad (1.10)$$

5. Полученные расчетные значения величин заносятся в табл. 1.6.

Таблица 1.6

№ n/ n	Расход		Расчетные величины								
	V, м³/ч	Q, м³/с	h_2	h_9	Δh_{2-9}	ϑ_2	ϑ_9	Δh_{pc} ,	ν , см²/с	Re	ζ_{pc}
			мм вод. ст			м/с		мм вод. ст			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

6. Строится график функции опытных значений коэффициента сопротивления ζ_{pc} от критерия Re .

Теоретические значения коэффициента ζ_{pc} можно определить по формуле

$$\zeta_{pc} = 0,5(1 - f_9/f_2), \quad (1.11)$$

где f_2 -площадь живого сечения 2-2; f_9 –сечения 9-9.

Контрольные вопросы

1. Чем отличается идеальная жидкость от реальной?
2. В чем состоит энергетический смысл основного уравнения гидростатики?
3. Какие силы могут действовать на жидкость?
4. Какие зависимости описывают движение ньютоновских жидкостей?
5. Почему вводится понятие: средняя скорость потока?
6. В чем заключается физический смысл уравнения неразрывности (сплошности) потока?
7. Какой закон устанавливает связь между касательным напряжением и градиентом скорости потока?
8. Какое влияние оказывает изменение температуры на вязкость капельных и упругих жидкостей?
9. В чем заключается энергетический смысл уравнения Бернулли? Что такое геометрический, пьезометрический, динамический и потерянный напоры?
10. Какие жидкости называют неньютоновскими? Как их классифицируют?
11. В чем состоит особенность движения волокнистых суспензий?
12. Какое течение жидкости называют ламинарным, а какое - турбулентным?
13. Как оценить границы различных режимов движения жидкости?
14. Каков физический смысл критерия Рейнольдса?
15. Как определить потери напора по длине трубопровода и в местных сопротивлениях?
16. С помощью каких приборов определяются скорость и расход жидкости?

17. Как определяется коэффициент гидравлического трения при различных режимах движения жидкости?
18. Зачем вводится понятие относительной шероховатости?
- Ответы на эти вопросы можно найти в [2] (с. 23-30, 31-33, 36-50, 54-61, 78-81, 84-95).

РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ МАШИН НА ГИДРАВЛИЧЕСКУЮ СЕТЬ

Цель работы: сравнить экспериментальные рабочие характеристики центробежного вентилятора с графическими зависимостями по литературным данным и графически определить возможность работы исследуемого вентилятора на заданную гидравлическую сеть.

Установка, схема которой изображена на рис.2.1, состоит из центробежного вентилятора 1 с всасывающим 2 и нагнетательным 3 воздуховодами диаметром 100 мм, по оси которых установлены трубки Пито-Прандтля 4 и 5; электродвигателя 6 постоянного тока, который приводит во вращение колесо центробежного вентилятора 1; выпрямителя тока 7 и лабораторного автотрансформатора 8 для регулирования напряжения, подаваемого от сети переменного тока, а следовательно, и частоты вращения колеса центробежного вентилятора 1.

Установка снабжена измерительными приборами: микроманометром 9, подсоединенным к трубке Пито-Прандтля 5 для измерения динамического давления в нагнетательном трубопроводе; микроманометром 10, подсоединенным к трубкам Пито-Прандтля 4 и 5 для измерения общего (полного) давления, создаваемого вентилятором; амперметром 11 и вольтметром 12 для измерения силы тока и напряжения, подаваемого на клеммы электродвигателя 6, и тахометром 13 для измерения частоты вращения колеса центробежного вентилятора 1.

На нагнетательном воздуховоде 3 установлен шибер 14 для регулирования производительности вентилятора.

Методика проведения работы

Для проведения эксперимента на лабораторной установке преподавателем задается значение частоты n вращения колеса вентилятора.

Перед пуском установки в работу убедиться, что шибер 14 на воздуховоде закрыт. Вращением рукоятки трансформатора 8 по часовой стрелке установить по тахометру 13 заданную частоту вращения колеса вентилятора.

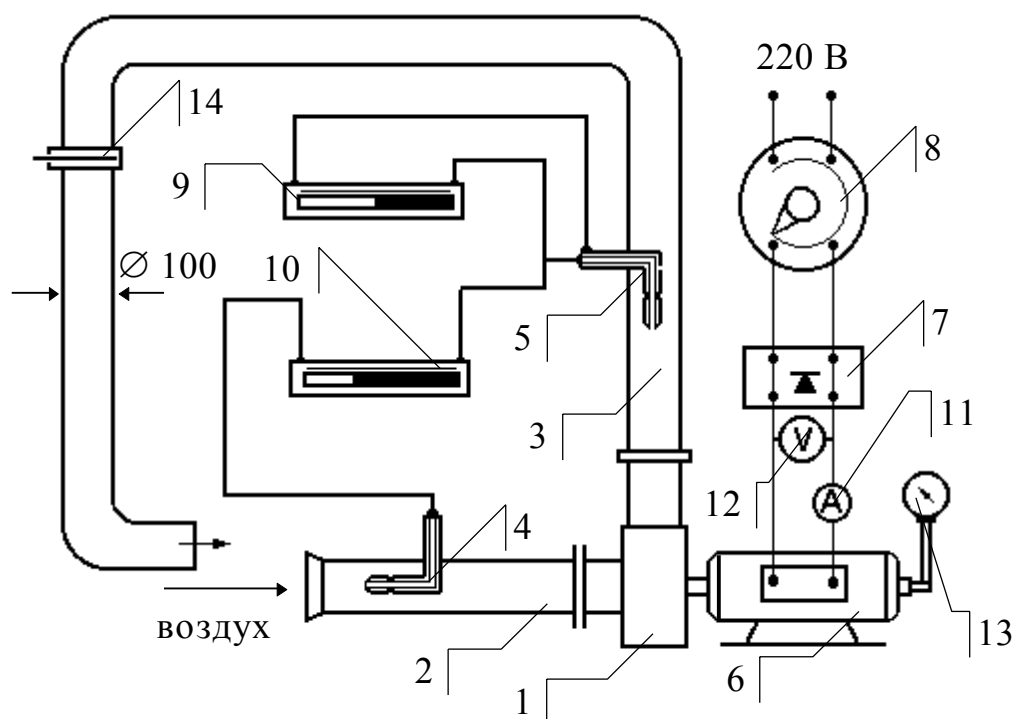


Рис. 2.1. Схема экспериментальной установки:

1- вентилятор; 2- всасывающий воздуховод; 3- нагнетательный воздуховод; 4 и 5- трубки Пито-Прандтля; 6- электродвигатель; 7- выпрямитель тока; 8- автотрансформатор; 9 и 10- микроманометры; 11- амперметр; 12- вольтметр; 13- тахометр; 14- шибер

Система обладает большой инерционностью, поэтому рукоятку вращать очень медленно, не допуская зашкаливания стрелки амперметра 11.

При установившейся частоте вращения снимают и записывают в таблицу 2.1 показания микроманометров 9 и 10, амперметра 11 и вольтметра 12.

При изменении положения шибера 14, т.е. при установлении какого-либо расхода по воздуховоду, изменяется и частота вращения колеса вентилятора. Поэтому, установив шибер в первое положение (частично приоткрыв сечение воздуховода), следует восстановить заданную частоту вращения, при которой проводится измерение, и записать новые показания приборов в таблицу. Такие измерения провести еще при четырех положениях шибера. Последнее положение шибера при полностью открытом сечении воздуховода.

Таблица 2.1

Положение	Общее давление, Δp		Динамическое давление, Δp_d		Сила тока, I	Напряжение U
шибера	мм.в.ст.	Па	мм.в.ст.	Па	А	В

В процессе проведения эксперимента, необходимо не забывать при каждом новом положении шибера контролировать соответствие частоты вращения колеса вентилятора заданному значению.

По окончании опытов вывести рукоятку трансформатора 8 на нулевую отметку, вращая ее против часовой стрелки, и отключить установку от сети.

Обработка опытных данных

Для исследованной частоты вращения колеса вентилятора при всех положениях шибера проводят следующие расчеты.

Определяют мощность, потребляемую вентилятором, по формуле:

$$N = I \cdot U, \quad (2.1)$$

где I - сила тока, А; U - напряжение, В. По значениям Δp_∂ , рассчитанным по показаниям микроманометра 9, вычисляют локальную скорость по оси воздуховода:

$$w_{\max} = \sqrt{2\Delta p_\partial / \rho_{cp}}, \quad (2.2)$$

где ρ_{cp} - плотность среды (в данном случае средой является воздух, плотность которого при температуре 20° С и нормальном давлении: $\rho_{cp}=1,22$ кг/м³); Δp_∂ - динамическое давление, Па. Считая, что поток в воздуховоде турбулентный, определяют его среднюю скорость:

$$w = 0,8w_{\max}. \quad (2.3)$$

Зная диаметр воздуховода d , м, по уравнению расхода вычисляют объемную производительность вентилятора:

$$V = wS = \frac{\pi d^2}{4} w, \quad (2.4)$$

где S - площадь поперечного сечения воздуховода, м².

Пользуясь показаниями микроманометра 10 для замера общего давления Δp , развиваемого вентилятором, и значениями N и V , рассчитанными по уравнениям (2.1) и (2.4), определяют коэффициент полезного действия вентилятора:

$$\eta = \frac{V\Delta p}{N} \quad (2.5)$$

Все результаты обработки экспериментальных данных заносят в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Положение	$w_{\max}$	w	V	V	N	η
шибера	м/с	м/с	м ³ /с	м ³ /ч	Вт	%

На основании данных табл. 2.1 и 2.2 на миллиметровку наносят точки и строят рабочие характеристики вентилятора: $\Delta p = f(V)$, $N = f(V)$ и $\eta = f(V)$. Все три кривые изображают на одном графике, имеющем оси ординат с указанием масштабов Δp в Па, N в Вт и η в % и одну ось абсцисс с масштабом V в м³/ч. При построении рабочих характеристик следует помнить, что любой эксперимент имеет погрешность, а поэтому после нанесения на график экспериментальных точек кривые характеристик проводят при плавном их изменении (точки разбросаны около кривых) аналогично кривым рис.34 [4]. В правом верхнем углу графика указывается частота вращения колеса вентилятора, при которой построены рабочие характеристики.

Определение возможности работы вентилятора на заданную гидравлическую сеть

Закончив обработку экспериментальных данных, следует оценить возможность работы данного вентилятора для перемещения атмосферного воздуха с температурой t в пространство с избыточным давлением $\Delta p_{изб.}$. Производительность по воздуху равна V . Воздуховод имеет: m - задвижек, k - отводов с радиусом изгиба трубы R_0 и углом поворота φ . Длина воздуховода равна l . Конкретные значения всех величин и их размерность задаются преподавателем в индивидуальном задании.

Расчет выполняется в следующей последовательности:

1. По таблице 1.1 [5] выбирается среднее значение скорости для воздуха при атмосферном давлении.
2. По формуле (1.19) [5] определяется диаметр воздуховода. Вычисленное значение диаметра округлить до сотых долей метра и по округленному значению диаметра d из той же формулы уточнить значение скорости воздуха в воздуховоде.
3. По рис.VI [5] при заданной температуре найти значение μ коэффициента динамической вязкости воздуха.

4. Плотность воздуха при нормальных условиях дается в табл. V [5], а при рабочих условиях (заданной температуре и атмосферном давлении) рассчитывается по формуле (1.5) [5].
5. По формуле (1.21) [5] рассчитать значение критерия Рейнольдса и оценить режим движения воздуха по воздуховоду.
6. Для труб из кровельной стали по таблице XII [5] найти значение абсолютной шероховатости e стенок труб воздуховода.
7. По значению критерия Рейнольдса и величине обратной относительной шероховатости (d/e) по рис.1.5 [5] определить значение коэффициента гидравлического трения λ в воздуховоде.
8. Найти значение коэффициентов местных сопротивлений (вход в воздуховод, выход из него, задвижки и отводы) по табл. XIII [5].
9. По формулам (1.35), (1.36) и (1.47) [5] рассчитать значения потерь давления в воздуховоде на создание скорости потока $\Delta p_{ск}$; на трение $\Delta p_{тр}$ и на местные сопротивления $\Delta p_{мс}$.
10. Полное гидравлическое сопротивление сети Δp_c при заданной производительности по воздуху определяется формулой (1.34) [5], в которой при перемещении воздуха $\Delta p_{нод} = 0$, а $\Delta p_{дон} = \Delta p_{изб}$.
11. Для графического построения характеристики сети необходимо знать ее гидравлическое сопротивление еще при 3 - 5 значениях производительности по воздуху. Эти точки определяются на основании следующих рассуждений. Если уменьшить или увеличить заданную производительность V в 1,5 или в 2 раза, то скорость воздуха в данном воздуховоде, в соответствии с уравнением расхода, также уменьшится или увеличится в 1,5 или в 2 раза, а так как любая из величин $\Delta p_{ск}$, $\Delta p_{тр}$ и $\Delta p_{мс}$ пропорциональна квадрату скорости, то сумма этих значений ($\Delta p_{ск} + \Delta p_{тр} + \Delta p_{мс}$) при изменении производительности также уменьшится или увеличится в $1,5^2$ или в 2^2 раза, соответственно. Разность же

давлений $\Delta p_{\text{дон}}$, не связанная со значением скорости потока, остается без изменения при любой производительности.

Все расчеты для определения точек характеристики сети целесообразно оформить в виде табл. 2.3.

Таблица 2.3

Производительность по воздуху, Q	$\Delta p_{\text{ск}} + \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{мс}}$	$\Delta p_{\text{дон}}$	$\Delta p_{\text{с}}$ (в соответствии с формулой (1.34) [5])
$\text{м}^3/\text{ч}$	Па	Па	Па
$Q = 1.5 \cdot V$	$A \cdot 1.5^2$	B	$A \cdot 1.5^2 + B$
$Q = V$ (задано)	A (рассчитано)	B (задано)	$A + B$
$Q = V / 1.5$	$A / 1.5^2$	B	$(A / 1.5^2) + B$
$Q = V / 2$	$A / 2^2$	B	$(A / 2^2) + B$
$Q = 0$	0	B	B

В данной таблице значение A равно сумме $\Delta p_{\text{ск}}$, $\Delta p_{\text{тр}}$ и $\Delta p_{\text{мс}}$ при заданной производительности V .

На основании первого и четвертого столбцов данной таблицы построить графическую зависимость для сети $\Delta p_{\text{с}} = f(Q)$, которая представляет собой правильную параболу, выходящую из точки с координатами $Q=0$ и $\Delta p_{\text{с}} = \Delta p_{\text{дон}}$. На этот график (в том же масштабе) нанести характеристику вентилятора $\Delta p = f(V)$, полученную при проведении эксперимента. В точке пересечения обеих характеристик, называемой рабочей точкой, определить максимально возможную производительность Q_{max} и максимальное сопротивление сети Δp_{max} , которое сможет преодолеть вентилятор при работе на заданную сеть при исследованной частоте вращения колеса.

12. Применяя законы пропорциональности (формулы (2.8) [5]), определить:

- ⇒ при какой наименьшей частоте вращения колеса вентилятора может быть обеспечена требуемая производительность V при работе на заданную сеть. При этом $Q_1 = V$, а $Q_2 = Q_{max}$ при частоте вращения вентилятора n_2 , при которой исследовалась работа вентилятора. Таким образом, индексом 1 обозначаются искомые величины, а индексом 2 – известные;
- ⇒ какое давление будет создавать вентилятор при производительности $Q_1=V$ при рассчитанной частоте вращения n_1 . При этом H_2 заменяют на $\Delta p_{max} - \Delta p_{изб}$ и после расчета H_1 определяют $\Delta p_1 = H_1 + \Delta p_{изб}$. Полученное значение Δp_1 сравнить с рассчитанным при заданной производительности сопротивлением сети Δp_c ;
- ⇒ потребляемую вентилятором мощность при производительности $Q_1=V$. Для этого по графику $N = f(V)$ определить при Q_{max} значение $N=N_2$ и рассчитать N_1 .

Контрольные вопросы

1. Какие типы машин по принципу действия применяются для перемещения жидкостей и для перемещения и сжатия газов?
2. Какие основные параметры характеризуют работу машин для перемещения жидкостей и газов?
3. На что затрачивается напор насоса?
4. Какими параметрами определяется высота всасывания насоса?
5. Как высота всасывания насоса зависит от температуры перекачиваемой жидкости?
6. Каков принцип устройства и работы поршневых и плунжерных насосов? Каковы их достоинства и недостатки?
7. В каких конструкциях насосов применяются воздушные колпаки? В чем смысл их работы?
8. Что такое кавитация? В каких средах она возникает?
9. Каков принцип устройства и работы центробежных насосов?

10. От каких параметров зависит теоретический напор центробежных машин?
11. Как определить фактический напор центробежного насоса?
12. Как графически изобразить рабочие характеристики центробежного насоса?
13. Как осуществляется выбор насоса при работе на заданную сеть?
14. Как устроен и работает осевой насос?
15. Как устроен и работает струйный насос?
16. В чем особенности устройства и работы насосов для перемещения волокнистых суспензий?
17. Как устроен и работает центробежный вентилятор?
18. Чем отличается рабочее колесо центробежного вентилятора от рабочего колеса центробежного насоса?
19. С какой целью применяют турбогазовдувки и турбокомпрессоры?
20. Как устроена трубка Пито-Прандтля? Как с ее помощью измерить динамическое и полное давление, создаваемые при работе вентилятора?
21. Есть ли отличие в рабочих характеристиках центробежных насоса и вентилятора?
22. Чем отличается универсальная характеристика вентилятора от его рабочих характеристик?
23. Можно ли, зная рабочие характеристики вентилятора при одной частоте вращения колеса, построить рабочие характеристики при другой частоте вращения колеса?
24. Как устроены и работают одноступенчатые поршневые компрессоры? В чем их конструктивное отличие от поршневых насосов? Что представляет собой индикаторная диаграмма работы компрессора?
25. Каковы особенности процесса сжатия в вакуум-насосах? Как устроены и работают водокольцевые и струйные вакуум-насосы?

Ответы на эти вопросы можно найти в [2] (с. 59, 127-175).

РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ СУСПЕНЗИЙ МЕТОДОМ ОСАЖДЕНИЯ

Цель работы: при проведении эксперимента и последующих расчетов оценить достоинства и недостатки процесса отстаивания; провести анализ кинетических кривых процесса отстаивания; полученные на модельной установке данные использовать для расчета промышленного отстойника непрерывного действия заданной производительности: рассчитать требуемую поверхность осаждения, диаметр одноярусного отстойника, а в случае ограничения производственной площади - число ярусов и диаметр многоярусного отстойника, а также минимальный диаметр выделяемых из суспензии твердых частиц.

Описание экспериментальной установки

Исследование процесса отстаивания проводится на модельной установке периодического действия, основная часть которой представляет собой мерный цилиндр емкостью 1 литр, снабженный ручной мешалкой специального типа. Дисперсионная среда - вода, данные о дисперсной фазе указаны на корпусе установки.

Продолжительность процесса отстаивания фиксируется с помощью секундомера, объем уплотненной суспензии определяется по делениям, нанесенным на цилиндре, а высота осветленного слоя жидкости - по шкале, закрепленной на корпусе установки.

С целью более четкого фиксирования границы раздела между уплотненной суспензией и осветленной жидкостью установка снабжена лампой подсвечивания. Лампа включается только на периоды снятия замеров.

Методика проведения работы

Перед началом эксперимента в случае необходимости добавляя чистую воду довести объем суспензии в мерном цилиндре до 1 литра и определить

температуру t , при которой проводится эксперимент. Перемещая мешалку вверх и вниз и придавая ей вращательное движение, добиться равномерного распределения твердых частиц в суспензии по всей высоте цилиндра. Мешалку опустить вниз и включить секундомер.

Через заданные преподавателем промежутки времени по границе раздела уровня осветленной жидкости и уплотненной суспензии (при включенной подсветке) фиксируется: высота слоя осветленной жидкости h и объем уплотненной суспензии V_c . Результаты измерений заносятся в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Время, τ	Объем уплотненной суспензии, V_c	Высота осветленной жидкости, h	Порозность уплотнен- ной суспензии, ε
МИН	Л	ММ	-

Обработка опытных данных

По экспериментальным данным построить кинетические кривые $V_c=f(\tau)$ и $h=f(\tau)$. При построении графиков учитывать возможную погрешность эксперимента (некоторый разброс точек по отношению к истинному положению кривых). Поэтому кинетические кривые проводятся плавно между точками. Обратит внимание, что ряд экспериментальных точек (в одном и том же интервале времени на обеих кривых) ложатся на прямые линии. Это участок свободного отстаивания. В дальнейшем идет участок нелинейного изменения - стесненное отстаивание. На полученных кривых обозначить критическую точку, т.е. точку окончания свободного отстаивания.

Кривая изменения высоты осветленного слоя жидкости во времени дифференцируется графическим методом на участке свободного отстаива-

ния и по двум-трем произвольно выбранным точкам на участке стесненного отстаивания на проведенной линии. Графическое дифференцирование проводится следующим образом. К выбранным точкам на кривой $h = f(\tau)$ проводят касательные до пересечения их с осью ординат (касательная и прямая участка свободного отстаивания совпадают). Эти касательные рассматривают как гипотенузы прямоугольных треугольников с катетами Δh и $\Delta \tau$. Значение Δh и $\Delta \tau$ определяются по графику с учетом масштаба осей. При этом Δh выразить в метрах, а $\Delta \tau$ в секундах. Тогда отношение Δh к $\Delta \tau$ даст значение скорости отстаивания w_i в той точке, к которой проведена касательная. Все выполняемые расчеты скорости отстаивания записываются непосредственно на том же листе, на котором построена зависимость $h=f(\tau)$. Определив по графику время в критической точке и в точках, к которым проведены касательные, строят график зависимости скорости отстаивания от времени $w_i = f(\tau)$. Максимальное значение скорости на этом графике (ордината горизонтального участка) отвечает значению скорости свободного отстаивания w_0 в условиях опыта.

Считая, что свободное отстаивание шарообразных частиц из суспензии происходит в ламинарном режиме и при известной скорости свободного отстаивания w_0 , рассчитать минимальный диаметр осаждающихся твердых частиц, применяя формулу Стокса (3.1) [5]; проверить справедливость ее применения, рассчитав критерий Рейнольдса:

$$Re_{oc} = w_0 d \rho_c / \mu_0, \quad (3.1)$$

где d - рассчитанный диаметр шарообразных частиц;

ρ_c и μ_0 - плотность и вязкость дисперсионной среды, т.е. воды.

Значение μ_0 при температуре t_0 определить по табл. VI [5].

Рассчитать массовую долю твердого компонента в исходной суспензии при $V_c = 1 \text{ л} = 10^{-3} \text{ м}^3$ ($\tau=0$) по формуле:

$$x_n = \frac{1}{(b_0 + bV_c)} \quad , \quad (3.2)$$

где $b_0 = (\rho - \rho_c)/\rho$; $b = \rho_c/m$ - постоянные коэффициенты для данной суспензии в условиях эксперимента;

ρ ; m - плотность и масса твердых частиц, находящихся в суспензии.

При всех значениях объема уплотняемой суспензии рассчитать порозность (объемную долю жидкости в суспензии): $\varepsilon = 1 - \{ m/(\rho V_c) \}$ и построить график $h = f(\varepsilon)$.

Расчет промышленного отстойника

Для расчета промышленного отстойника непрерывного действия в индивидуальном задании преподаватель задает массовую производительность отстойника либо по твердому компоненту G , либо по исходной суспензии G_n , а также температуру суспензии в отстойнике t_n , массовую долю твердого компонента в шламе x_k и максимально допустимый диаметр D отстойника. Массовая доля твердого компонента x_n в исходной суспензии такая же, как в лабораторном эксперименте.

На основании экспериментальных данных определить требуемую площадь осаждения и число ярусов в отстойнике при условии, что диаметр рассчитанного аппарата должен быть меньше заданного диаметра D .

Расчет проводится в следующей последовательности:

1. Определить вязкость воды при температуре t_n и по формуле Стокса рассчитать скорость свободного отстаивания в промышленном аппарате w_n , предполагая минимальный диаметр осаждаемых частиц равный диаметру частиц рассчитанному на основании экспериментальных данных. Проверить рассчитанное значение по соотношению $w_n = w_o \cdot \mu_o / \mu_n$, которое справедливо для ламинарного движения частицы.

2. По графику $h = f(\tau)$ для критической точки, характеризующей переход от свободного отстаивания к стесненному, найти высоту осветленной жид-

кости $h_{cв}$ и рассчитать время свободного отстаивания в промышленном аппарате $\tau_{cв} = h_{cв} / w_n$.

3. По заданному значению массовой доли x_k твердого компонента в шламе рассчитать его порозность $\varepsilon = (1 - x_k) / (1 - x_k b_0)$, где b_0 рассчитана ранее.

4. Расчет средней скорости стесненного отстаивания проводят в следующей последовательности:

$\Rightarrow$ рассчитать критерий Архимеда:

$$Ar = \left(\frac{gd^3}{\mu_n^2} \right) \rho_c (\rho - \rho_c); \quad (3.3)$$

$\Rightarrow$ рассчитать критерий Рейнольдса для стесненного отстаивания при ε_k :

$$Re_k = \frac{Ar \cdot \varepsilon_k^{4,75}}{18 + 0,61 \sqrt{Ar \cdot \varepsilon_k^{4,75}}}; \quad (3.4)$$

$\Rightarrow$ рассчитать скорость стесненного отстаивания при ε_k : $w_k = \mu_n Re_k / (\rho_c d)$.

Расчет w_k при $\varepsilon_k > 0,7$ можно проводить по эмпирической формуле:

$$w_k = w_n \cdot \varepsilon_k^2 \cdot 10^{-1,82(1-\varepsilon_k)}. \quad (3.5)$$

Сравнить результаты расчета;

$\Rightarrow$ рассчитать среднюю скорость на участке стесненного отстаивания:

$$W_{cp} = \frac{(W_n - W_k)}{\ln(W_n / W_k)} \quad (3.6)$$

5. По графику $h = f(\varepsilon)$ при ε_k определить высоту слоя осветленной жидкости h_k и рассчитать продолжительность стесненного отстаивания для промышленного аппарата $\tau_{cm} = (h_k - h_{cв}) / w_{cp}$.

6. Расчетная скорость отстаивания для промышленного отстойника составит: $w_p = h_k / (\tau_{cв} + \tau_{cm})$.

7. Необходимая площадь осаждения в промышленном отстойнике (в зависимости от способа задания производительности) составит:

$$F = 1,33 \frac{G_n \left(1 - \frac{x_n}{x_k} \right)}{\rho_c w_p} = 1,33 \frac{G \left(\frac{1}{x_n} - \frac{1}{x_k} \right)}{\rho_c w_p}, \quad (3.7)$$

где 1,33 - коэффициент, учитывающий непрерывную работу отстойника.

По рассчитанной площади отстаивания определяется диаметр D_0 одноярусного отстойника. В случае ограничения производственной площади, задаваемой предельно допустимым диаметром отстойника, определяется число ярусов в многоярусном отстойнике $n=(D_0 / D)^2$ с округлением в большую сторону до целого числа. Исходя из равенства $F=nF_0$, определяется площадь отстаивания одного яруса F_0 и диаметр многоярусного отстойника D_n .

Контрольные вопросы

1. Какие виды неоднородных систем можно разделить осаждением?
2. Какие способы осаждения применяют в промышленности?
3. Разностью каких величин определяется движущая сила процесса отстаивания?
4. Чем отличается стесненное отстаивание от свободного?
5. Как записывается уравнение динамического равновесия при свободном отстаивании частиц?
6. По каким критериям можно установить режимы движения частицы в жидкой среде?
7. В чем сложность расчета скорости свободного отстаивания?
8. Как рассчитать скорость свободного отстаивания при ламинарном движении частицы в среде?
9. Как пользоваться для расчета скорости свободного отстаивания обобщенным методом проф. П.В.Лященко?
10. Какие параметры определяют скорость стесненного отстаивания?
11. Влияет ли температура суспензии на скорость процесса отстаивания?

12. В чем достоинства и недостатки процесса отстаивания?
13. Какова последовательность расчета отстойных аппаратов?
14. Как устроены одноярусный и многоярусный отстойники? С какой целью применяют многоярусные аппараты?
15. Какие способы увеличения эффективности осаждения применяют в промышленности? Чем они различаются между собой?
16. Как объяснить повышение эффективности разделения неоднородной системы в циклонных аппаратах меньшего диаметра?
17. Как устроены и работают аэроциклон и батарейный циклон?
18. Как устроены и работают гидроциклон, батарея центрифуг, радиоклон? В чем достоинства радиоклона?
19. Как устроена и работает горизонтальная отстойная центрифуга со шнековой выгрузкой осадка?

Ответы на эти вопросы можно найти в [2] (с. 95-101, 176-181, 183-186, 213-214, 217, 221, 226, 228-233)

РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ СУСПЕНЗИЙ МЕТОДОМ ФИЛЬТРОВАНИЯ

Цель работы: ознакомиться с методикой расчета фильтровальной установки; экспериментально определить константы фильтрования; рассчитать удельное сопротивление осадка и сопротивление фильтровальной перегородки; применить экспериментальные данные для расчета фильтровальной установки заданной производительности.

Описание лабораторной установки

Исследование процесса фильтрования проводится на модельной установке (рис.4.1), которая состоит из фильтровальной воронки 1 наливного

типа с внутренним диаметром 130 мм; бачка 2 с мешалкой для приготовления суспензии; мерной емкости 3 для сбора фильтрата и вакуум-насоса 4.

Установка снабжена U-образным манометром 5 для замера вакуума в мерной емкости 3 и кранами 6, 7, 8 и 9.

Отдельные части установки соединены между собой гибкими трубками.

С помощью крана 6 в бачок 2 для приготовления суспензии подается вода из городского водопровода.

Кран 7 предназначен для поддержания постоянного уровня суспензии в воронке 1.

Кран 8 соединяет вакуумную линию с атмосферой и регулирует величину разрежения в емкости 3 для сбора фильтрата.

Кран 9 предназначен для слива фильтрата из емкости 3 после окончания эксперимента.

Фильтровальная воронка 1 разборная; в нее укладывают и закрепляют внутренним цилиндром сменную фильтровальную перегородку, исследуемую в данном опыте.

Методика проведения работы

Исследование кинетики фильтрования проводится на суспензии, твердые частицы которой при фильтровании образуют несжимаемый осадок. Суспензия приготавливается лаборантом в бачке 2.

Равномерное распределение твердых частиц в дисперсионной среде в процессе проведения эксперимента обеспечивается непрерывной работой пропеллерной мешалки.

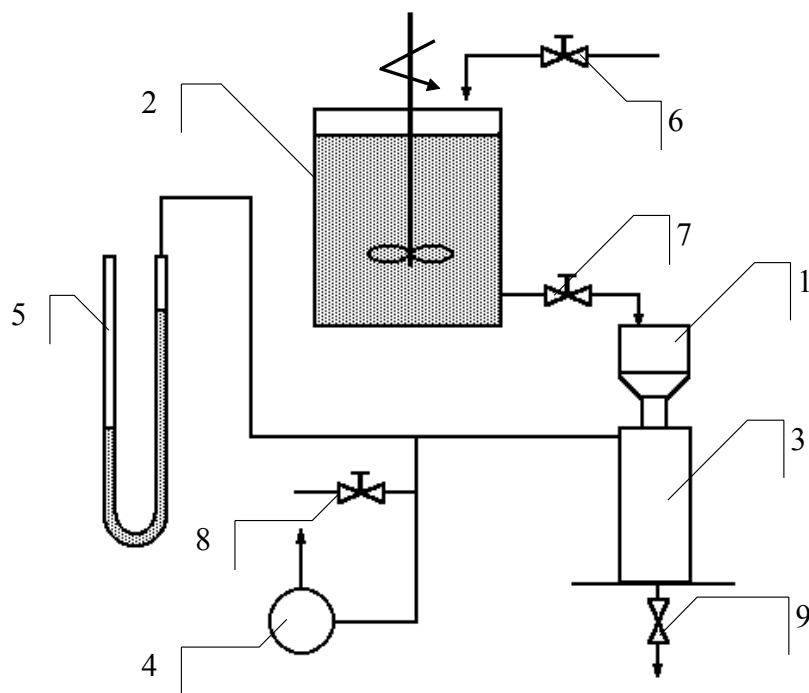


Рис.4.1. Схема экспериментальной установки:

1 -фильтровальная воронка; 2 -бачок с мешалкой для суспензии; 3 -мерная емкость для сбора фильтрата; 4 -вакуум-насос; 5 -U-образный манометр; 6-9 –краны

При вынутом внутреннем цилиндре на перфорированную решетку фильтровальной воронки 1 аккуратно укладывают предварительно смоченный фильтровальный материал, который закрепляется по диаметру вставным внутренним цилиндром. Тип фильтровального материала задается преподавателем. Собранная воронка устанавливается в гнездо сборника фильтрата 3.

Перед началом эксперимента необходимо убедиться, что кран 9 закрыт, кран 8 приоткрыт, а уровень жидкости в сборнике фильтрата установлен на нулевой отметке. Кроме того, необходимо мысленно (для более быстрого в последующем установления разрежения в мерной емкости 3 зафиксировать отметку уровня воды на одном из колен манометра 5, соответствующую заданной движущей силе процесса. Иначе падает точность эксперимента.

Открыв кран 7, создаем над фильтровальной перегородкой слой суспензии высотой $10 \div 15$ мм (до нанесенной на воронке отметки). Сразу же включают вакуум-насос 4 и, плавно прикрывая кран 8, по показаниям манометра 5 устанавливают заданное преподавателем разрежение в сборнике фильтрата 3, равное движущей силе процесса, которое поддерживают постоянным в течение всего эксперимента.

Одновременно с включением вакуум-насоса 4 включают секундомер. Регулируя краном 7 подачу суспензии в фильтровальную воронку 1, поддерживают принятую ранее высоту слоя суспензии над фильтровальной перегородкой.

При проведении эксперимента следят за изменением уровня фильтрата в сборнике 3 и, не выключая секундомер, записывают в табл. 4.1 время от начала опыта через каждые 100 мл отобранного фильтрата. Когда объем фильтрата в сборнике 3 достигнет 1 литра, закрывают кран 7 подачи суспензии в фильтровальную воронку 1 и продолжают опыт, наблюдая за уровнем суспензии в воронке. В тот момент, когда вся суспензия над осадком отфильтровалась, выключают секундомер. Вакуум-насос продолжает работать еще секунд $5 \div 10$. При этом через осадок просасывается воздух, несколько его подсушивая. После чего вакуум-насос выключить и записать конечное время фильтрования τ_k и общее количество отобранного фильтрата за время опыта - V_k .

Вынуть фильтровальную воронку 1 из гнезда сборника фильтрата 3, из воронки вынуть внутренний цилиндр и, стараясь не нарушить слой осадка на фильтровальном материале, аккуратно вынуть фильтровальный материал со слоем осадка на нем из воронки и положить его на горизонтальную поверхность. После чего, применяя специальное устройство, определить высоту слоя осадка с точностью до 0,1 мм и температуру суспензии при проведении эксперимента.

Обработка опытных данных

Для определения констант процесса фильтрования K и C необходимо провести обработку всех экспериментальных данных в соответствии с формулами табл. 4.1:

Таблица 4.1

τ	$V \cdot 10^3$	$v = V/F$	τ/v	v^2
с	м ³	м ³ /м ²	с/м	м ²

В таблице F - площадь поверхности фильтрования в лабораторной установке рассчитывается по известному внутреннему диаметру вставного цилиндра воронки ($d = 0,13$ м) как площадь круга.

Обработав экспериментальные данные, определяют суммарные значения величин по столбцам таблицы, т.е. находят:

$$\sum_1^m \tau_i; \sum_1^m v_i; \sum_1^m (\tau_i/v_i) \text{ и } \sum_1^m v_i^2, \text{ где } m - \text{число экспериментально снятых значений.}$$

Константы процесса фильтрования C и K , входящие в интегральное уравнение фильтрования

$$v^2 + C \cdot v = K \cdot \tau, \quad (4.1)$$

находят двумя способами: аналитическим и графическим.

При аналитическом определении констант фильтрования используется известный из математической статистики метод наименьших квадратов. Для этого интегральное уравнение преобразуют к линейному виду:

$$\frac{\tau_i}{v_i} = b_0 + b \cdot v_i, \quad (4.2)$$

где $b_0 = C / K$ и $b = 1 / K$.

Коэффициенты b и b_0 , находят при решении системы уравнений:

$$\begin{aligned} b_0 m + b \sum_1^m v_i &= \sum_1^m \left(\tau_i / v_i \right) \\ b_0 \sum_1^m v_i + b \sum_1^m v_i^2 &= \sum_1^m \tau_i \end{aligned} \quad (4.3)$$

Определив значения коэффициентов b и b_0 , рассчитывают константы фильтрования: $K=1 / b$ и $C= b_0 / b$.

Учитывая большой объем расчетов, обработка экспериментальных данных и определение констант процесса может быть выполнена на компьютере.

При графическом способе определения констант на график $(\tau / v)=f(v)$ наносят все экспериментальные точки. В соответствии с линеаризованным интегральным уравнением фильтрования эти точки должны лежать на прямой линии. Следовательно, учитывая погрешность эксперимента, по нанесенным точкам проводят прямую линию и продолжают ее до пересечения с осью абсцисс (ось v). При проведении линии надо стремиться к равномерному разбросу экспериментальных точек вдоль всей длины проводимой прямой линии. Нулевая точка (точка пересечения координатных осей) должна находиться примерно в середине оси абсцисс.

Отрезок, отсекаемый продолжением прямой линии на оси абсцисс, по абсолютному значению в масштабе этой оси ($\text{м}^3/\text{м}^2$) равен константе фильтрования C . Отрезок b_0 , отсекаемый прямой линией на оси ординат, в масштабе этой оси равен C / K . Следовательно: $K= C / b_0$.

Аналитически и графически найденные значения констант фильтрования сравнить между собой. Определить погрешность графического метода по отношению к аналитическому. Аналитическое определение констант с применением метода наименьших квадратов дает более точные значения констант. Поэтому в дальнейших расчетах пользоваться значениями K и C , найденными аналитически.

Для расчета удельного сопротивления осадка r_0 и сопротивления фильтровальной перегородки R_{fn} найти значение $\gamma=V_{oc} / V$, где V_{oc} - объем

осадка, а V - объем фильтрата, равный V_{κ} , в конце опыта. Так как высота слоя осадка h экспериментально определена, то $V_{oc}=h \cdot F$ и следовательно:

$$\gamma = \frac{h \cdot F}{V_{\kappa}}, \quad (4.4)$$

где F - площадь поверхности фильтрования в лабораторной установке.

Не забывайте, что единицы измерения всех величин, подставляемых в формулы, должны быть выражены в СИ.

Определив значение γ , из формулы

$$K = \frac{2 \Delta p}{\mu \cdot r_0 \cdot \gamma} \quad (4.5)$$

вычислить значение удельного сопротивления осадка r_0 . Величину Δp , при которой проводился эксперимент, выразить в Па (табл. LVIII [5]); значение вязкости фильтрата μ найти из табл. VI [5] при температуре проведения опыта.

Значение сопротивления фильтровальной перегородки $R_{\phi n}$ найти из уравнения:

$$C = \frac{2 \cdot R_{\phi n}}{r_0 \cdot \gamma} \cdot \quad (4.6)$$

Расчет фильтровальной установки

Рассчитывается число фильтров в установке, оснащенной барабанными вакуумными фильтрами, так как на модельной установке в лаборатории исследовали процесс фильтрования под вакуумом. Считаем, что осадок и фильтровальный материал - несжимаемые. Это означает, что r_0 и $R_{\phi n}$, найденные при проведении опыта, не изменяют своих численных значений при изменении движущей силы фильтрования Δp .

Для расчета установки задаются следующие значения параметров: производительность установки G по сухому веществу; движущая сила фильтрования Δp ; температура t суспензии, поступающей в ванну фильтра; диа-

метр барабана фильтра D ; его длина L ; степень погружения ϕ фильтрующей поверхности барабана в ванну с суспензией; частота вращения барабана n и концентрации сухого вещества в исходной суспензии x_c и в осадке x_{oc} .

Последовательность расчета следующая:

1. Определить вязкость фильтрата по табл. VI [5] при заданной температуре исходной суспензии.
2. Рассчитать для промышленной установки объемное соотношение осадка к фильтрату, который получается при образовании данного объема осадка:

$$\gamma = \frac{1 - x_{oc} [1 - (\rho_\phi / \rho_m)]}{(x_{oc} / x_c) - 1}, \quad (4.7)$$

где ρ_ϕ ; ρ_m - соответственно; плотность фильтрата и плотность твердого компонента в суспензии (в данном случае плотность мела).

3. По формулам (4.6) и (4.7) при значениях Δp , μ , γ для промышленной установки рассчитать константы фильтрования K и C .
4. Время фильтрования при погружении поверхности барабана в ванну с суспензией рассчитывается из уравнения: $\tau \cdot n = \phi$.
5. Количество фильтрата v , отбираемого с 1 м² фильтровальной поверхности промышленного фильтра за время τ , определяется из уравнения (4.1), в котором C и K - значения констант для промышленного фильтра.
6. Рассчитать необходимую поверхность фильтрования всех фильтров в установке по формуле:

$$F_0 = \frac{G \left(\frac{1}{x_c} - \frac{1}{x_{oc}} \right)}{\rho_\phi \cdot v} \cdot \tau. \quad (4.8)$$

7. Число фильтров в установке определяется как целое число (с округлением в большую сторону) зависимостью:

$$N = \frac{F_0}{\pi DL \cdot \varphi} \quad (4.9)$$

Контрольные вопросы

1. Каково назначение и физическая сущность фильтрования? В каких процессах оно используется?
2. Какие виды неоднородных систем можно разделить фильтрованием?
3. Что является движущей силой процесса фильтрования, какими способами она создается?
4. В какой конструкции фильтров, работающих под вакуумом или под давлением, можно получить большую движущую силу? Какое максимальное значение принимает движущая сила в вакуумных фильтрах?
5. Какие фильтровальные перегородки применяют в процессах фильтрования? Каковы требования, предъявляемые к ним?
6. С помощью какого уравнения можно объяснить влияние температуры исходной суспензии на скорость процесса фильтрования?
7. Каков физический смысл удельного сопротивления осадка и сопротивления фильтровальной перегородки?
8. В какое уравнение входят константы процесса фильтрования? Что они характеризуют и какими параметрами определяются?
9. Из чего складывается сопротивление в процессе фильтрования?
10. Как рассчитать необходимую поверхность фильтрования и число фильтров в установке?
11. Как устроен и работает барабанный вакуум-фильтр? Какая деталь этого фильтра позволяет чередовать операции на его фильтровальной поверхности? В чем его недостатки?

12. Как устроен и работает напорно-вакуумный фильтр? Каким образом в нем обеспечивается напор и как создается вакуум?
 13. Как устроен и работает фильтр воздушного давления?
 14. Какие способы съема осадков с барабанных фильтров используются в промышленности?
 15. За счет каких величин и параметров можно интенсифицировать процесс фильтрования?
 16. Какая конструкция барабанного фильтра позволяет значительно интенсифицировать фильтрование? За счет чего? Как устроен и работает этот фильтр?
 17. Как устроен и работает фильтр-пресс автоматический камерный модернизированный (ФПАКМ)?
 18. Какой фильтр применяется для фильтрования аэродисперсных систем? Как он устроен? Его основной недостаток.
- Ответы на эти вопросы можно найти в [2] (с. 101-106, 176-177, 186-210, 233-236)

РАБОТА №5

РАСХОД ЭНЕРГИИ НА ПЕРЕМЕШИВАНИЕ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

Цель работы: экспериментальным путем установить зависимость между критерием мощности и центробежным критерием Рейнольдса для заданного типа мешалки в различных режимах ее работы (аналог научно-исследовательской работы студентов).

Описание лабораторной установки

Установка состоит из сосуда диаметром 270 мм и высотой 430 мм, выполненного из оргстекла, и электродвигателя постоянного тока, расположенного над сосудом, с тахогенератором, позволяющим регулировать частоту вращения мешалки. Уровень воды в сосуде не более 410 мм. Съёмные

мешалки закрепляются к валу электродвигателя с помощью цангового патрона. Установка снабжена вольтметром и амперметром. В сосуде могут быть установлены четыре отражательные перегородки шириной 40 мм. Исследуется работа мешалок двух типов: пропеллерная $d_m = 90$ мм и турбинная открытого типа $d_m = 150$ мм.

Методика проведения эксперимента

1. Закрепить в цанговом патроне заданную преподавателем мешалку.
2. Залить в сосуд воду (до указанного уровня) и измерить ее температуру.
3. Медленным вращением ручки тахогенератора (по часовой стрелке) установить начальное напряжение по вольтметру тахогенератора $U_T = (10 - 12)$ В.
4. Снять показания вольтметра U и амперметра J , включенных в электрическую цепь электродвигателя при установившемся режиме работы.
5. Увеличивая каждый раз показания вольтметра тахогенератора на (3–5) В, снять еще 7 – 10 раз показания вольтметра и амперметра электродвигателя. Максимальное напряжение на вольтметре тахогенератора не должно превышать 50 В. Все данные занести в табл. 5.1.
6. Плавное поворачивая ручку тахогенератора против часовой стрелки, вывести показания его вольтметра на ноль и отключить питание установки. Слить воду из сосуда.

Таблица 5.1

№ п/п	Показания вольтметра тахогенератора, U_T , В	Показания вольт- метра двигателя, U , В	Показания ампер- метра двигателя, J , А

Обработка экспериментальных данных

1. По показаниям вольтметра тахогенератора рассчитать частоту вращения мешалки (об/мин):

$$n = 25 U_T$$

2. Рассчитать мощность (B_m), потребляемую электродвигателем, при различной частоте вращения мешалки в жидкой среде:

$$N_э = U \cdot J \quad (5.2)$$

3. Рассчитать мощность холостого хода N_{xx} для всех значений U_T по эмпирической формуле:

$$N_{xx} = 0,312 \cdot U_T + 1,4. \quad (5.3)$$

4. Рассчитать полезную мощность, потребляемую мешалкой при всех частотах вращения:

$$N_n = N_э - N_{xx}.$$

5. Рассчитать критерий мощности K_N и центробежный критерий Рейнольдса $Re_{ц}$ для всех опытных данных:

$$K_N = \frac{N_n}{\rho n^3 d_m^5}; \quad Re_{ц} = \frac{\rho n d_m^2}{\mu}, \quad (5.5)$$

где ρ – плотность воды, $кг/м^3$; μ – вязкость воды, $Па \cdot с$, при температуре опыта (табл. VI [5]); n – частота вращения мешалки, $об/с$; d_m – диаметр мешалки, $м$.

6. Найти значение $\lg K_N$ и $\lg Re_{ц}$ и заполнить графы табл.5.2.

Таблица 5.2

№ п/п	Частота вращения мешалки, n		Мощность, потребляемая электродвиг., $N_э$	Мощность холостого хода, N_{xx}	Полезная мощность, N_n	Критерий мощности, K_N	$\lg K_N$	Центробежный критерий Рейнольдса, $Re_{ц} \cdot 10^{-4}$	$\lg Re_{ц}$
	об/мин	об/с	Вт	Вт	Вт				

7. Найти по рис.V11[5] аналогичный исследуемому тип мешалки, предварительно рассчитав соотношения D/d_m и B/D , где D – диаметр сосуда, а B – ширина перегородок, и обратить внимание на положение линии $K_N=f(Re_{ц})$ в исследованном диапазоне

критериев $Re_{\text{ц}}$. Построить по экспериментальным данным график $\lg K_N = f(\lg Re_{\text{ц}})$, согласуя ход кривой с данными рис. V11[5]. Рекомендуемые масштабы по осям: для $\lg K_N$ от $-0,1$ до 1 , для $\lg Re_{\text{ц}}$ от 4 до 5 , как показано на рис.5.1, на котором представлены возможные положения линий на основе экспериментальных точек. Экспериментальные точки по значению $\lg K_N$ могут иметь и отрицательное значение.

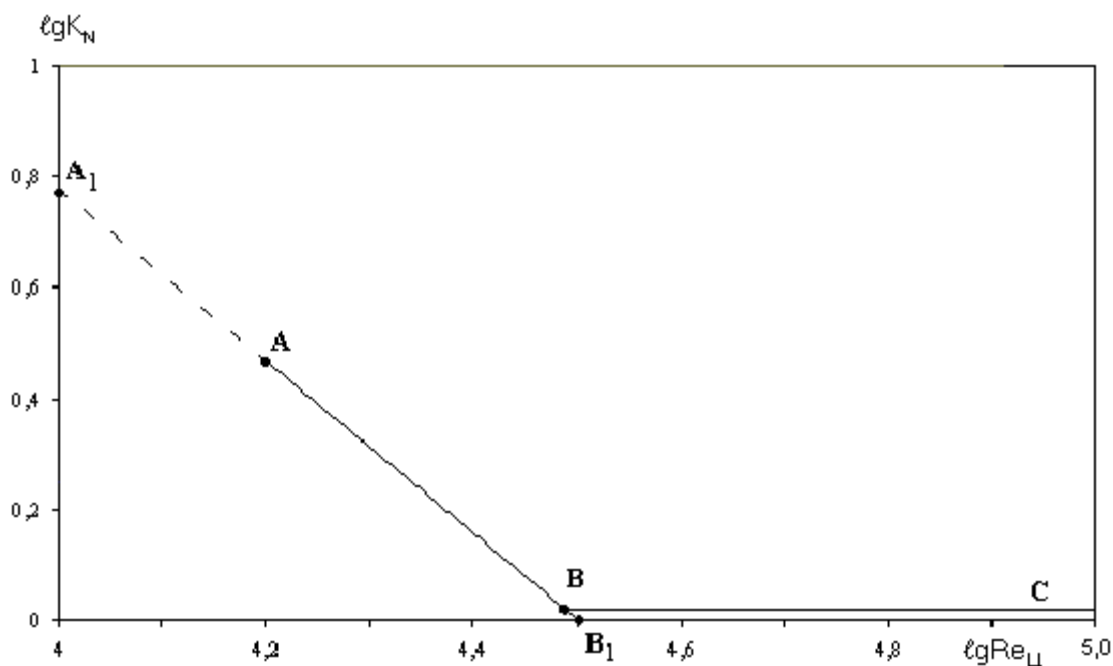


Рис.5.1. Возможные положения экспериментально установленных линий

8. Провести графическую обработку данных для линий АВ и ВС с целью определения коэффициента C и показателя степени m в уравнении $K_N = C/Re_{\text{ц}}^m$. С этой целью продлить линию АВ до пересечения с осями координат и определить значение отрезков OA_1 по оси ординат и OB_1 по оси абсцисс. Для рис.5.1 значение отрезка OB_1 равно $(\lg Re_{\text{ц}} - 4)$, где $\lg Re_{\text{ц}}$ отвечает значению B_1 на оси абсцисс. Тангенс угла наклона этой линии к оси

абсцисс численно равен $m = OA_1 / OB_1$. Если бы ось абсцисс была построена от нуля, то линия A_1B_1 отсекала бы на оси ординат отрезок равный $\lg C$. Следовательно значение $\lg C$ можно найти из подобия треугольников:

$$\frac{\lg C}{\lg Re_{ц}} = \frac{OA_1}{OB_1} = m \quad (5.6)$$

По значению $\lg C$ вычислить C , установить значения $Re_{ц}$, в интервале которых будет справедлива полученная зависимость и записать ее с цифровыми значениями C и m .

Аналогичные рассуждения провести для линии BC , установив зависимость $K_N = f(Re_{ц})$ и пределы по $Re_{ц}$, в которых она будет справедлива.

Возможны и другие положения прямых линий, отличные от линий на рис.5.1, но ход рассуждений будет аналогичен изложенному.

Контрольные вопросы

1. Назначение процесса перемешивания.
2. Виды перемешивания. Принципиальные схемы.
3. Основные параметры процесса: интенсивность, эффективность, расход энергии на перемешивание.
4. Расчет эффективности перемешивания.
5. Зависимость эффективности перемешивания от частоты вращения мешалки.
6. Способы устранения воронки.
7. Определение оптимальной частоты вращения мешалки при приготовлении суспензий и эмульсий.
8. Определение мощности, потребляемой мешалкой. Критерий мощности.

9. Конструкции механических мешалок (лопастных, пропеллерных, турбинных и специального назначения). Области их применения по вязкости перемешиваемых сред.
10. Какой тип мешалки позволяет увеличить аксиальную составляющую скорости и за счет чего?
11. Какой тип мешалки позволяет увеличить радиальную составляющую скорости потока?

Ответы на эти вопросы можно найти в [2] (с. 258 – 273).

РАБОТА №6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

В ТЕПЛООБМЕННИКЕ ТИПА ТРУБА В ТРУБЕ

Цель работы: сравнительная оценка коэффициента теплопередачи, вычисленного на основе экспериментальных данных и рассчитанного на основе теоретических уравнений.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис.6.1) состоит из теплообменника 1 типа “труба в трубе”, электрического нагревателя 2 и контрольно-измерительных приборов.

Теплообменник состоит из четырех горизонтальных элементов, расположенных один над другим. Каждый элемент представляет собой две соосно расположенные трубы. Внутренние трубы соседних элементов соединены между собой калачами, а кольцевые пространства элементов - патрубками. Материал труб - нержавеющая сталь. Общая рабочая длина поверхности теплообменника - 4 м.

Один поток воды из городского водопровода через ротаметр 5 поступает в электронагреватель 2, где его температура повышается на 15-35°C (в зависимости от расхода воды).

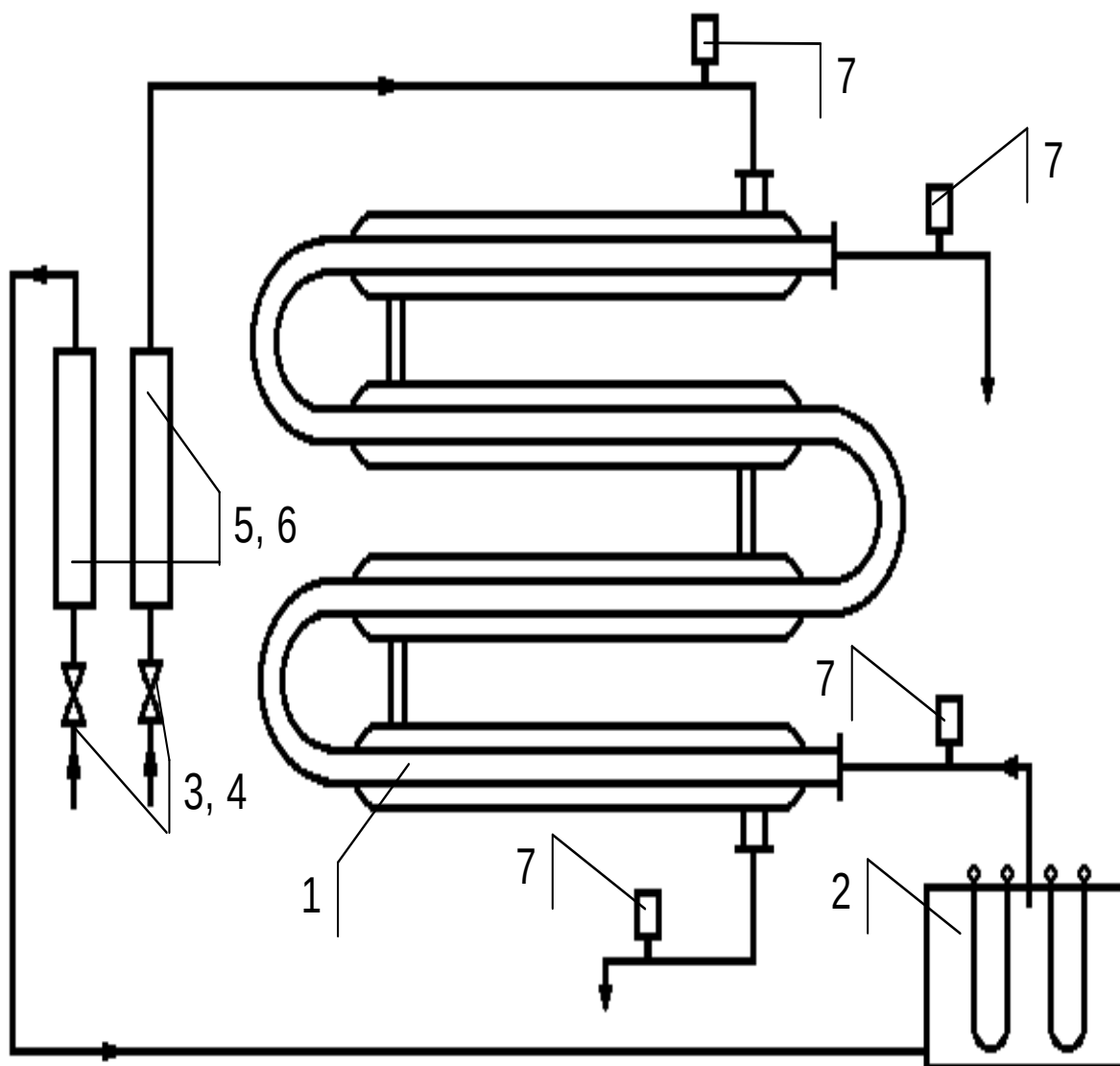


Рис.6.1. Схема экспериментальной установки:

1- теплообменник типа “труба в трубе”, 2- электронагреватель;
3, 4- вентили; 5, 6- ротаметры; 7- термометры

Нагретая в электронагревателе 2 вода поступает во внутреннюю трубу диаметром 17×2 мм нижнего элемента теплообменного аппарата, поднимаясь из одного элемента в другой по калачам, проходит все элементы теплообменника. Ее расход регулируется вентилем 3 и измеряется ротаметром 5 и должен составлять не менее 1,5 л/мин (10 делений по ротаметру).

Второй поток воды из городского водопровода поступает в верхний элемент теплообменника, движется по кольцевому сечению между внутренней и наружной трубами элемента и перетекает вниз из одного элемен-

та в другой по патрубкам. Диаметр наружный трубы 32×3 мм. Расход холодного потока регулируют вентилем 4 и измеряют ротаметром 6.

Теплопередача происходит через стенку внутренней трубы. При этом холодный поток нагревается, а нагретый - охлаждается. Температура воды на входе и выходе каждого теплоносителя (нагретого и холодного потоков) измеряется термометрами 7.

Методика проведения работы

Для выполнения работы преподаватель задает значения расходов теплоносителей n_x и n_r в делениях по шкале ротаметров. По градуированному графику, который находится на установке, расходы теплоносителей из делений перевести в л/ч.

Открывая вентили 3 и 4, установить заданные расходы теплоносителей по показаниям ротаметров и включить электронагреватель. Отметить время начала эксперимента. Следить постоянно за показаниями ротаметров, поддерживая с помощью вентиля заданные расходы теплоносителей в течение всего времени проведения опыта. Колебания расходов теплоносителей не дают возможности быстро добиться установившегося режима работы теплообменника.

Через 20÷25 минут определить по термометрам 7 и записать значения температур на входе и выходе каждого из теплоносителей. В дальнейшем значения температур снимают и записывают через каждые 5-6 минут. Опыт заканчивают (отключают нагрев и закрывают вентили), когда показания температур по любому из четырех термометров предыдущего и последующего замеров не изменяются. Это означает, что установка выведена на установившийся гидродинамический и тепловой режимы. Результаты наблюдений записывают в табл. 6.1:

Таблица 6.1

Холодный поток				Нагретый поток			
расход		температура, °C		расход		температура, °C	
n_x	V_x	t_1	t_3	n_r	V_r	t_2	t_4
делений	л/ч	на входе	на выходе	делений	л/ч	на входе	на выходе

Обработка опытных данных

Цель обработки данных - рассчитать экспериментальное значение коэффициента теплопередачи. Расчет ведут только по установившемуся режиму, т.е. по последней строке таблицы опытных данных в следующей последовательности.

Определить количество теплоты, которое нагретый теплоноситель передает холодному теплоносителю:

$$Q_r = G_r \cdot c_r \cdot (t_2 - t_4), \quad (6.1)$$

и количество теплоты, которое холодный теплоноситель принимает от нагретого при установившемся режиме работы установки:

$$Q_x = G_x \cdot c_x \cdot (t_3 - t_1), \quad (6.2)$$

где G_x и G_r - массовые расходы теплоносителей;

c_x и c_r - их теплоемкости при средней температуре холодного и нагретого потоков.

Теплоемкости воды определить по таблице XXXIX [5].

Как вы думаете, в чем причина, что Q_x не равно Q_r ? В дальнейших расчетах принимаем среднеарифметическое Q_{cp} .

Для расчета движущей силы теплопередачи (средней разности температур Δt_{cp}) изобразите схему движения теплоносителей, проставьте на схе-

ме значения температур на входе и выходе каждого теплоносителя и в соответствии с пунктом 21 формулы (4.76) и (4.79) [5], рассчитайте $\Delta t_{\text{ср}}$.

Поверхность теплопередачи F рассчитать по среднему диаметру внутренней трубы, как поверхность цилиндра. Не забудьте, что теплообменник состоит из четырех горизонтальных элементов, длина каждого из которых равна 1 м.

Экспериментальное значение коэффициента теплопередачи $K_{\text{э}}$ определить из основного уравнения теплопередачи (формула (4.72) [5]).

Сравните рассчитанное значение $K_{\text{э}}$, с его ориентировочными значениями в табл. 4.8 [5], сделайте вывод.

Расчет теоретического значения коэффициента теплопередачи

При теоретическом расчете коэффициента теплопередачи $K_{\text{т}}$ необходимо вычислить значения коэффициентов теплоотдачи для холодного $\alpha_{\text{х}}$ и нагретого $\alpha_{\text{г}}$ потоков. Их находят из критерия Нуссельта, соответственно для холодного $Nu_{\text{х}}$, и нагретого $Nu_{\text{г}}$ потоков. Выбор формулы для расчета критерия Nu определяется режимом движения жидкости, т.е. критерием Рейнольдса Re . Один из параметров, который необходимо знать при расчете Re , - средняя скорость потока жидкости. Поэтому расчет проводится для каждого из теплоносителей (холодного и нагретого) в следующей последовательности.

1. Рассчитать площади поперечного сечения потоков $f_{\text{г}}$ и $f_{\text{х}}$. Для нагретого потока $f_{\text{г}}$ определяется как площадь круга, диаметр которого равен внутреннему диаметру внутренней трубы элемента теплообменника. Для холодного потока $f_{\text{х}}$ определяется как площадь кольца, через которое протекает холодный поток.
2. Рассчитать значения средних скоростей $w_{\text{г}}$ и $w_{\text{х}}$, по формуле (1.17) [5], предварительно выразив найденные по градуировочному графику объемные расходы теплоносителей в единицах измерения системы СИ.

3. Применяя линейную интерполяцию, из табл. VI и XXXIX [5] найти для воды при средних температурах нагретого t_r , и холодного t_x потоков значения коэффициентов: динамической μ_r и μ_x и кинематической ν_r и ν_x вязкости; теплопроводности λ_r и λ_x ; объемного расширения β_r и β_x и значения плотности ρ_r и ρ_x . Значения теплоемкости воды c_x и c_r найдены ранее. Из этих же таблиц найти значения $\mu_{ст}$, $c_{ст}$ и $\lambda_{ст}$ для воды при температуре стенки $t_{ст}$, которая в данной установке определяется как среднеарифметическое значение из средних температур нагретого и холодного теплоносителей.
4. По формуле (4.13) [5] рассчитать критерии Рейнольдса Re_r и Re_x для нагретого и холодного потоков. Критерии Прандтля для нагретого Pr_r и холодного Pr_x потоков, а также критерий $Pr_{ст}$ для воды при температуре стенки $t_{ст}$ рассчитать по формуле (4.12) [5], а критерии Грасгофа Gr_r и Gr_x по уравнению (4.15) [5], используя ранее найденные значения физико-химических констант при соответствующих температурах. Значения Δt в критерии Gr_r определяются как разность между средней температурой t_r нагретого потока и $t_{ст}$, а Δt для Gr_x берется как разность температур между $t_{ст}$ и средней температурой холодного потока t_x . Определяющий геометрический размер в критериях подобия для нагретого потока - внутренний диаметр внутренней трубы, а для холодного - эквивалентный диаметр для кольца, которое является поперечным сечением холодного потока.
- Рассчитанные значения критериев Прандтля можно проверить, найдя путем интерполяции из таблицы XXXIX [5] Pr_r , Pr_x и $Pr_{ст}$ соответственно при температурах t_r , t_x и $t_{ст}$.
5. По рассчитанным критериям Re_r и Re_x устанавливают режимы движения нагретого и холодного потоков и выбирают критериальные зависимости для расчета критериев Нуссельта Nu_r и Nu_x .

6. При $Re < 3500$ расчет критерия Nu ведут по формуле (4.25) [5] или рис. VII [2]. При теплоотдаче в переходной области рекомендуется пользоваться графиком рис.4.1 [5]. При развитом турбулентном течении в прямых трубах и каналах справедливо критериальное уравнение 4.17 [5].
7. В соответствии с формулой (4.11) [5] рассчитать значения коэффициентов теплоотдачи для нагретого α_r и холодного α_x потоков.
8. По формуле (4.74) [5], раскрывая значение термического сопротивления стенки $r_{ст}$ в соответствии с объяснениями к формуле (4.1) [5], рассчитать теоретическое значение коэффициента теплопередачи K_t . Значение коэффициента теплопроводности для материала стенки (нержавеющая сталь) найти из таблицы XXVIII [5].
9. Рассчитать в процентах погрешность между коэффициентами теплопередачи $K_э$ и K_t .

Контрольные вопросы

1. Как может распространяться теплота в газах, жидкостях и твердых телах?
2. Какое уравнение характеризует перенос теплоты в подвижных средах?
3. Как найти численное значение коэффициента теплопроводности? Каков его физический смысл?
4. В каких средах коэффициент теплопроводности имеет наибольшее, а в каких - наименьшее значение?
5. Какой процесс называют теплопередачей, а какой - теплоотдачей?
6. Каким уравнением определяется количество теплоты при теплоотдаче, а каким - при теплопередаче?
7. Как найти численное значение коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи? Каков их физический смысл?
8. Почему при расчете коэффициентов теплоотдачи применяют теорию подобия?

9. Какой критерий при теплоотдаче является определяемым? Каков его физический смысл?
10. Какие критерии при теплоотдаче являются определяющими? Каков их физический смысл?
11. Как выбрать критериальное уравнение при расчете теплоотдачи?
12. Какой критерий входит в критериальное уравнение при ламинарном и отсутствует при турбулентном режиме движения жидкости? Почему?
13. Каков смысл отношения $(Pr/Pr_{ст})$ в критериальных уравнениях?
14. Как рассчитать движущую силу теплопередачи при переменной разности температур теплоносителей?
15. Какое направление движения теплоносителей в теплообменнике предпочтительно и почему?
16. Как определить термическое сопротивление стенки при теплопередаче?
17. Как рассчитать количество теплоты, отдаваемое или принимаемое теплоносителями?
18. Какие теплообменные аппараты называют рекуператорами, регенераторами и теплообменниками смешения?
19. Как устроен и работает кожухотрубный теплообменник?
20. В чем достоинства (за счет чего они достигаются) и недостатки многоходовых кожухотрубных теплообменников по сравнению с одноходовыми?
21. Какие виды кожухотрубных теплообменников применяют для компенсации температурных расширений?
22. Как устроены и работают спиральные теплообменники? Почему спиральные теплообменники для системы "жидкость-жидкость" не применяют для системы "жидкость-пар"? В чем их отличие?
23. Как устроен и работает пластинчатый теплообменник? Почему при штамповке пластин их поверхность выполняют рифленой?

Ответы на эти вопросы можно найти в [2] (с. 260-265; 275-277; 296-298; 311-318; 326-335).

РАБОТА №7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ВЫПАРНОГО АППАРАТА

Цель работы: исследование работы выпарной установки однократного действия, экспериментальный и теоретический расчеты количества выпариваемой воды, сравнительная оценка коэффициентов теплопередачи и удельных расходов греющего пара при нагреве и кипении раствора.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис.7.1) состоит из выпарного аппарата с естественной циркуляцией раствора, парогенераторов 1, поверхностного конденсатора 5, сборника конденсата 6, вакуум-насоса 7, вспомогательного оборудования и контрольно-измерительных приборов.

Основные части выпарного аппарата: вынесенная греющая камера 2, в которой происходит нагрев и кипение раствора, сепаратор 3, предназначенный для отделения вторичного пара от раствора, и циркуляционная труба 4. Греющая камера 2 представляет собой вертикальный теплообменный аппарат типа "труба в трубе", а конденсатор вторичного пара 5 - кожухотрубчатый теплообменник.

Поверхность теплообмена F греющей камеры $0,04 \text{ м}^2$.

Обогрев греющей камеры 2 производится паром, поступающим из парогенераторов 1. Конденсат из кольцевого пространства греющей камеры непрерывно самотеком возвращается в парогенераторы. Таким образом, в парогенераторах обеспечивается постоянный уровень воды и поддерживается оптимальный уровень конденсата в греющей камере.

Установка работает под вакуумом, создаваемым при конденсации вторичного пара в конденсаторе 5. Неконденсируемые газы (воздух) отводятся через сборник конденсата 6 вакуум-насосом 7.

На установке выпаривают растворы хлористого натрия начальной концентрации от 2 до 7% (масс.). При такой концентрации раствора отложения накипи на внутренней поверхности греющей камеры практически отсутствуют, а расчет теплового баланса упрощается, так как теплотой гидратации можно пренебречь.

Установка работает периодически. Заполнение выпарного аппарата раствором соли перед началом и слив упаренного раствора по окончании опыта производится через кран 8. Охлаждающую воду в межтрубное пространство теплообменника-конденсатора подают из водопроводной сети.

Давление греющего пара в греющей камере и разрежение в сепараторе измеряют, соответственно, манометром и вакуумметром. Температура раствора в аппарате измеряется термометром.

Методика проведения работы

Перед началом работы необходимо:

- проверить уровень воды в парогенераторах. В случае необходимости через кран 9 заполнить парогенераторы до указанного на установке уровня;
- убедиться в отсутствии конденсата в сборнике 6;
- закрыть краны 8, 10, 11 и 12;
- определить и записать объем исходного раствора. В случае необходимости приготовить раствор по указанию преподавателя;
- отобрать исходный раствор в мерный цилиндр, довести его температуру до 15°C и ареометром измерить плотность исходного раствора. Записать значение плотности. Раствор из мерного цилиндра слить в емкость исходного раствора.

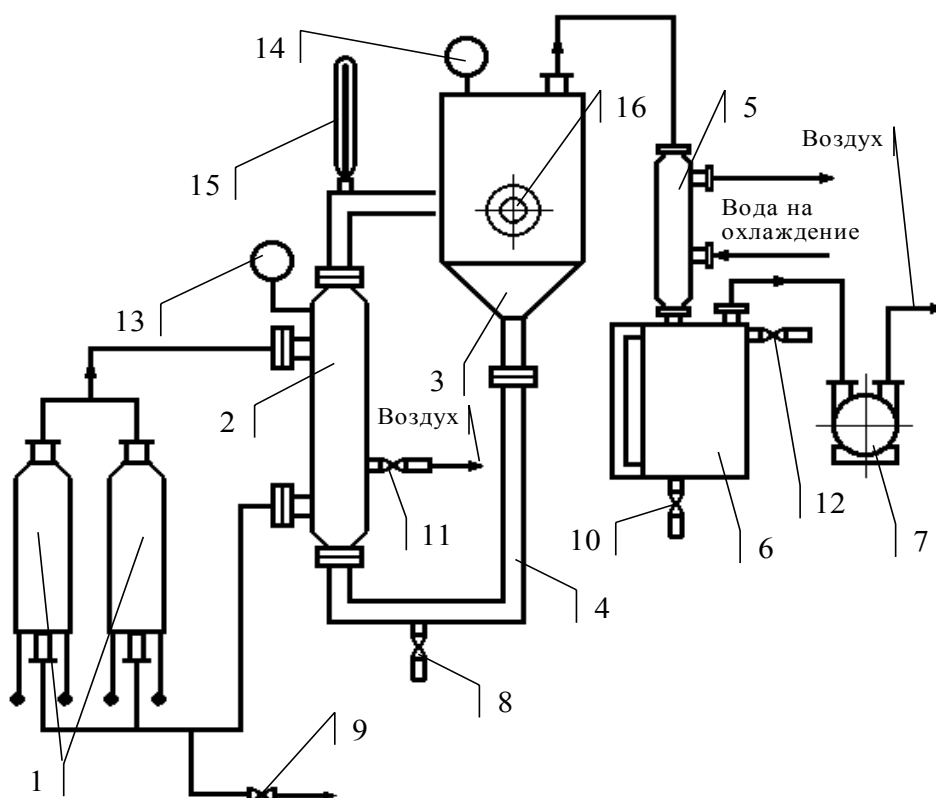


Рис.7.1. Схема экспериментальной установки:

1- парогенераторы; 2- греющая камера; 3- сепаратор; 4- циркуляционная труба; 5- конденсатор; 6- сборник конденсата; 7- вакуум-насос; 8, 9, 10, 11, 12- краны; 13- манометр; 14- вакуумметр; 15- термометр; 16- смотровое окно

Пуск установки в работу производить в следующей последовательности:

1. Опустить гибкий шланг в емкость с исходным раствором.
2. Включить подсветку смотрового окна.
3. Открыть кран 8.
4. Включить вакуум-насос и за счет создаваемого в сепараторе разрежения заполнить аппарат раствором. Когда весь раствор из емкости поступит в аппарат, закрыть кран 8. Вакуум-насос продолжает работать.
5. Открыть кран (на схеме не показан) на линии охлаждающей воды на конденсатор 5.

6. Включить парогенераторы и, заметив время начала работы установки, снять по термометру 15 значение температуры исходного раствора в аппарате, а по вакуумметру 14 - значение разрежения в сепараторе. Записать все значения в соответствующие столбцы таблицы наблюдений. По достижении максимального разрежения в сепараторе вакуум-насос можно отключить.

Наблюдая за показаниями термометра через каждую минуту от начала работы установки, определить время начала нагрева раствора $\tau_{\text{нн}}$. В дальнейшем, наблюдая за уровнем конденсата сокового пара, определить время начала отбора конденсата, которое будет соответствовать времени начала кипения раствора $\tau_{\text{нк}}$.

В процессе выполнения работы через каждые 5 минут измерять давление греющего пара по манометру 13, разрежение в сепараторе по вакуумметру 14, температуру раствора по термометру 15 и объем конденсата в сборнике 6.

В течение первых 10÷15 минут работы установки через каждые 1,5÷2 минуты производить сдувку неконденсируемого газа (воздуха) из кольцевого пространства греющей камеры с помощью крана 11. Слив конденсата (воды) из крана 11 в процессе сдувки недопустим. Вакуум-насос включается также периодически на 20÷30 секунд.

Последний замер данных (через 5 минут) производится, когда объем конденсата в сборнике 6 станет примерно равным объему конденсата, заданному преподавателем. После чего отключить парогенераторы и подсветку смотрового окна. Постепенно открывая кран 12, сбросить вакуум в выпарном аппарате. Через кран 8 слить упаренный раствор в приемную емкость. Отобрать в мерный цилиндр часть упаренного раствора, охладить его до 15°C и ареометром измерить плотность. После чего уточнить объем

отобранного конденсата вторичного пара и через кран 10 слить его в приемную емкость.

Исходные данные и результаты наблюдений записывать в табл. 7.1:

- объем исходного раствора - $V_n, \text{ м}^3$;
- плотность исходного раствора - $\rho_n, \text{ кг/м}^3$;
- плотность упаренного раствора - $\rho_k, \text{ кг/м}^3$.

Таблица 7.1

Время от начала работы установки	Температура раствора,	Давление греющего пара	Разрежение в сепараторе	Объем отобранного конденсата
$\tau, \text{ мин}$	$t, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{изб}}^*, \text{ ат}$	$B^*, \text{ ат}$	$V, \text{ л}$

* - размерности $p_{\text{изб}}$ и B уточнить в соответствии с градуировкой приборов.

Обработка опытных данных

1. По измеренным значениям плотности исходного ρ_n и упаренного ρ_k раствора по табл. L [5], применяя линейную интерполяцию, определить концентрацию соли в исходном x_n и упаренном x_k растворах.
2. По уравнению (5.3) [5] материального баланса процесса выпаривания вычислить теоретическое значение массы воды W_T , которую необходимо удалить из раствора соли для изменения его концентрации от x_n до x_k , и сравнить ее с массой конечного объема конденсата вторичного пара W_k . Погрешность эксперимента составит $\varepsilon = [(W_T - W_k)/W_k] \cdot 100 \%$. Необходимое для расчета значение G_n можно вычислить, зная объем исходного раствора V_n и его плотность ρ_n .
3. По уравнению (5.5) [5] теплового баланса выпарного аппарата рассчитать расход теплоты на процесс выпаривания в лабораторной установке. При этом, первое слагаемое правой части уравнения представляет собой количество теплоты Q_n , затраченное на нагрев раствора до конечной

температуры его кипения в аппарате; второе слагаемое - количество теплоты Q_k , затраченное на образование и удаление из раствора W_k вторичного пара; а третье слагаемое - потери теплоты $Q_{пот}$ в окружающую среду за счет теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией.

Значение теплоемкости c_n исходного раствора рассчитывают по уравнению (5.10) [5]. Энтальпию вторичного пара $i_{вт}$ определяют, применяя линейную интерполяцию, по табл. LVII [5], рассчитав предварительно абсолютное давление в сепараторе $p_c = p_{ат} - B$, где $p_{ат}$ - атмосферное давление, а B - показание вакуумметра в конце эксперимента. Для перевода давления $p_{ат}$ в требуемую размерность воспользуйтесь табл. LVIII [5]. Значение теплоемкости воды c_v находят по табл. XXXIX [5] по температуре раствора в конце опыта t_k . Расход теплоты на компенсацию потерь в окружающую среду $Q_{пот}$ принять равным 5% от суммы $(Q_n + Q_k)$.

4. Продолжительность нагрева раствора в аппарате составит:

$\Delta\tau_n = \tau_{нк} - \tau_{нн}$, а продолжительность кипения раствора $\Delta\tau_k = \tau_k - \tau_{нк}$, где τ_k - время окончания проведения эксперимента.

5. По уравнению (5.7) вычислить:

- расход греющего пара за рабочий период установки $\tau_p = \Delta\tau_n + \Delta\tau_k$.

Расход теплоты на выпаривание определяется уравнением (5.5) [5];

- расход греющего пара за период кипения раствора. Расход теплоты в этом случае определяется только вторым слагаемым правой части уравнения 5.5 [5].

В обоих случаях удельную теплоту конденсации $r_{г.п.}$ находят по табл. LVII [5] по абсолютному давлению греющего пара $p_{гп} = p_{ат} + p_{изб}$, где $p_{изб}$ - показание манометра в конце эксперимента. Вместо сухости греющего пара x может быть задана его влажность $w_{гп}$. Связь между ними определяется зависимостью $x = 1 - w_{гп}$.

6. По уравнению (5.8) [5] рассчитать удельные расходы греющего пара за рабочий период и за период кипения раствора. Рассчитанное значение

за период кипения сравнить с литературными данными для однократного выпаривания.

7. Рассчитать коэффициент теплопередачи для периода нагрева раствора

$$k_n = \frac{Q_n}{(F \Delta t_{cp} \Delta \tau_n)},$$

где Q_n - количество теплоты, затраченное на нагрев раствора (см. пункт 3); F - поверхность теплообмена греющей камеры (см. описание экспериментальной установки); Δt_{cp} - средняя движущая сила теплопередачи для периода нагрева раствора; $\Delta \tau_n$ - продолжительность работы установки в данном периоде.

Для вычисления Δt_{cp} требуется по табл. LVII [5] зная $p_{гп}$ (см. пункт 5), определить температуру греющего пара $t_{гп}$; рассчитать движущую силу на концах теплообменника (греющей камеры);

$$\Delta t_1 = t_{гп} - t_n; \Delta t_2 = t_{гп} - t_k,$$

где t_n , t_k - соответственно начальная температура раствора и температура кипения раствора.

Найти Δt_{cp} в соответствии с формулами (4.78) или (4.79) [5].

8. Рассчитать коэффициент теплопередачи для периода кипения раствора

$$k_k = \frac{Q_k}{(F \Delta t_{п} \Delta \tau_k)},$$

где Q_k - количество теплоты, затраченное на образование и удаление из раствора вторичного пара (см. пункт 3); $\Delta t_{п} = t_{гп} - t_k$ - полезная разность температур (движущая сила) процесса выпаривания; $\Delta \tau_k$ - продолжительность кипения раствора.

9. Сравнить рассчитанные значения коэффициентов теплопередачи между собой.

Контрольные вопросы

1. Что такое выпаривание?
2. Из каких основных частей состоит выпарной аппарат? Какое их назначение?
3. Что является движущей силой процесса выпаривания?
4. В чем преимущества водяного пара как теплоносителя? В чем его недостаток?
5. Как найти физико-технические характеристики пара?
6. В чем состоят преимущества выпаривания под вакуумом?
7. Почему в процессе выпаривания различают общую и полезную разности температур?
8. Что такое температурные потери при выпаривании? Какие виды температурных потерь существуют? От чего они зависят?
9. Какие уравнения материального баланса применяют при расчете выпаривания?
10. Какие слагаемые входят в уравнение теплового баланса выпаривания?
11. С какой целью в промышленности применяют многокорпусные выпарные установки?
12. Какие схемы многокорпусного выпаривания используют в промышленности? В чем их достоинства и недостатки?
13. От чего зависит оптимальное число корпусов в многокорпусной установке?
14. Для чего служит и как устроен барометрический конденсатор?
15. Каково назначение вакуум-насоса?
16. Какие конструкции выпарных аппаратов применяют в промышленности?
17. С какой целью в выпарных аппаратах устанавливают циркуляционный насос? Какой тип насоса применяют?
18. За счет чего можно уменьшить образование накипи в выпарных аппаратах?

19. Сколько ступеней сепарации в выпарном аппарате? Как обеспечивается первая ступень сепарации в выпарном аппарате с вынесенной греющей камерой?

Ответы на эти вопросы можно найти в [2] (с. 339; 347-357; 362-372; 373-374; 376-377).

РАБОТА №8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА И ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ

Цель работы: расчет и определение по диаграмме Л.К.Рамзина свойств влажного воздуха по экспериментально найденным двум его параметрам; практическое применение диаграммы Л.К.Рамзина для расчета процесса сушки.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из психрометра и барометра для измерения атмосферного давления.

Статический психрометр Августа имеет два термометра, шарик одного из которых обмотан влажной тканью, впитывающей в себя воду из резервуара, расположенного ниже шарика термометра.

Воздух у поверхности ткани неподвижен.

Методика проведения работы

Перед началом работы необходимо проверить наличие воды в резервуаре психрометра Августа, в случае необходимости налить воду комнатной температуры с помощью пипетки.

Визуально убедиться, что ткань у шарика термометра влажная.

Измерение температур сухого и мокрого термометров производить не менее трех раз через 5-10 минут между каждыми измерениями.

Первый замер по психрометру Августа производить не ранее, чем через 10 минут после увлажнения ткани.

Для расчета используют установившиеся значения температур.

В промежутках между замерами по психрометру также не менее трех раз измеряют атмосферное (барометрическое) давление.

Результаты наблюдений заносят в табл. 8.1

Таблица 8.1

№ п/п	Температура по термометрам психрометра Августа, $t, ^\circ\text{C}$		Относительная влажность по психрометрической таблице, φ	Барометрическое давление
	сухого	мокрого	%	мм.рт.ст.
1				
2				
3				

Обработка опытных данных

1. По установившимся значениям температур психрометра Августа определить относительную влажность воздуха по психрометрической таблице, которая находится на стенде.
2. По установившимся значениям температур психрометра Августа рассчитать влагосодержание воздуха x_0 , его относительную влажность φ_0 , парциальное давление водяного пара p_n , энтальпию J_0 и найти температуру точки росы t_p .

С этой целью рассчитать влагосодержание воздуха при температуре мокрого термометра t_m по уравнению, которое получается из зависимости (10.5) [5] при $\varphi=1$:

$$x_M = \frac{0,622 p'_{\text{нас}}}{(\Pi - p'_{\text{нас}})}, \quad (8.1)$$

где $p'_{\text{нас}}$ - давление насыщенного водяного пара при температуре мокрого термометра t_M по данным таблицы XXXVIII [5], Π - барометрическое давление.

С учетом аналогии между процессами тепло- и массообмена у шарика мокрого термометра, влагосодержание воздуха при температуре сухого термометра t определяется уравнением

$$x_0 = \frac{r_M x_M - c_B (t - t_M) \cdot \varepsilon}{r_M + c_{\Pi} (t - t_M) \cdot \varepsilon}, \quad (8.2)$$

где r_M - удельная теплота парообразования, которую находят при температуре мокрого термометра t_M по табл. LVI [5];

$c_B = 1,01$ кДж/(кг·К) - средняя удельная теплоемкость сухого воздуха;

$c_{\Pi} = 1,97$ кДж/(кг·К) - средняя удельная теплоёмкость водяного пара;

ε - поправочный коэффициент, учитывающий наличие теплового потока к поверхности испарения за счет излучения, значение которого находят по графику (рис.8.1) для неподвижного воздуха.

По рассчитанному значению $x = x_0$ из формулы (10.5) [5] выразить и рассчитать значение относительной влажности воздуха ϕ , а из формулы (10.6) [5] рассчитать парциальное давление p_{Π} водяного пара в воздухе. Значение давления насыщенного водяного пара $p_{\text{нас}}$ по температуре сухого термометра t находят по данным табл. XXXVIII [5]. Из этой же таблицы по рассчитанному значению p_{Π} найти температуру точки росы t_p .

3. По установившимся значениям температур психрометра Августа на диаграмме Л.К.Рамзина найти точку А, характеризующую параметры воздуха в лаборатории. Для этого, как показано на рис.8.2, провести

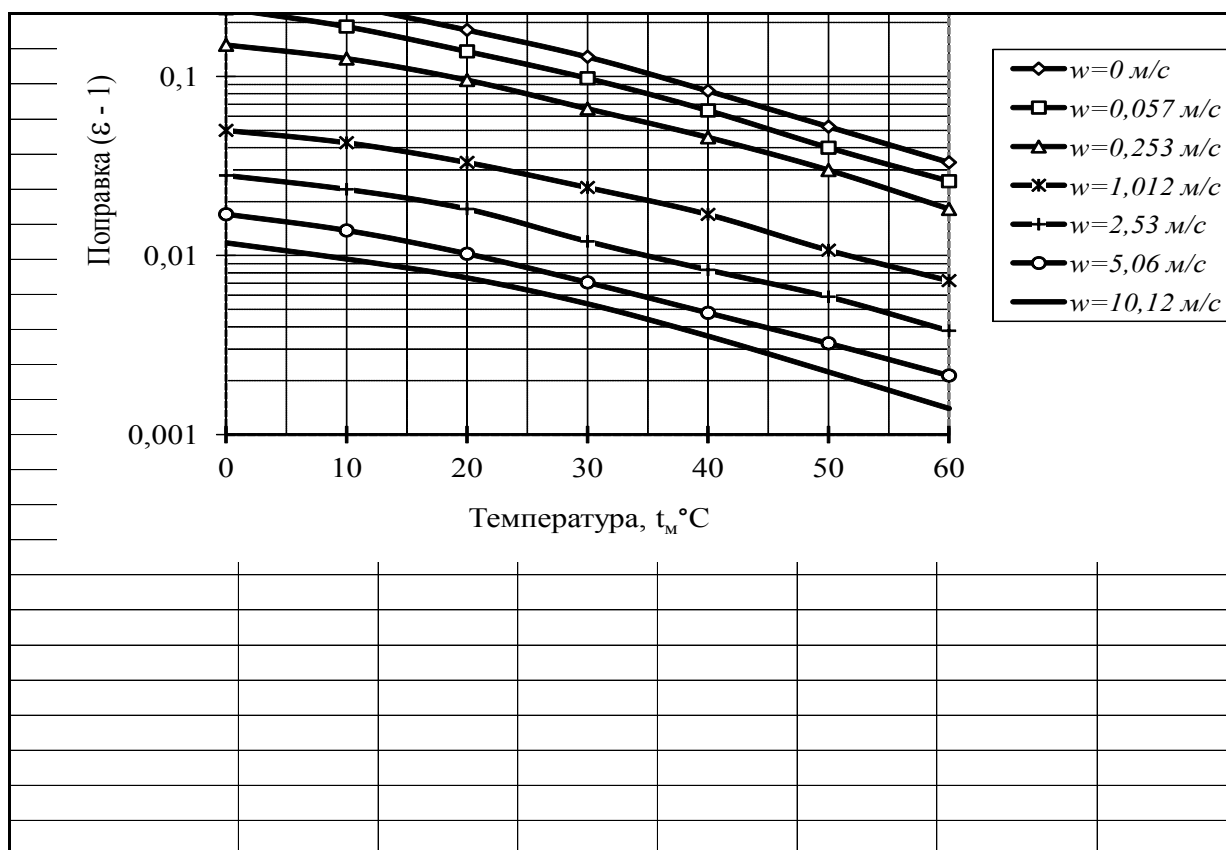


Рис.8.1. Зависимость поправочного коэффициента ϵ от скорости воздуха

изотермы сухого t и мокрого t_m термометров. Через точку пересечения изотермы мокрого термометра с линией насыщенного воздуха провести линию $J = \text{const}$. Точка пересечения этой линии с изотермой сухого термометра является искомой точкой А.

В точке А определить (см. рис. 8.2):

- влагосодержание x_0 . Для этого из точки А провести линию $x = \text{const}$ пересечения с осью x ;
- энтальпию J_0 . Для этого продолжить линию $J = \text{const}$, проходящую через точку А, до оси J ;
- относительную влажность ϕ_0 ;

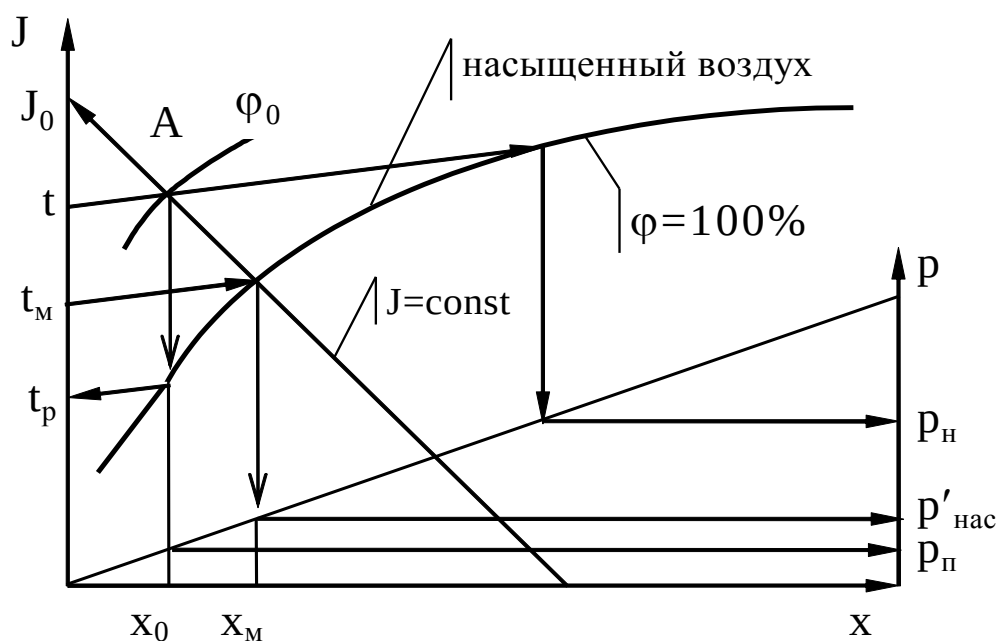


Рис.8.2. Определение параметров исходного воздуха по значениям температур t и t_m

- температуру точки росы t_p . Для этого найти точку пересечения линии $x_0 = \text{const}$, проходящей через точку A , с линией насыщенного водяным паром воздуха. Изотерма, проходящая через точку пересечения этих линий, определяет температуру точки росы;
- парциальное давление водяного пара в воздухе p_π . Для этого найти точку пересечения линии $x_0 = \text{const}$, проходящей через точку A , с линией парциального давления водяного пара и через эту точку провести линию, параллельную оси x до пересечения с осью парциального давления (правый нижний угол диаграммы Рамзина);
- давление насыщенного пара при температурах t и t_m . Для этого продолжить изотермы t и t_m до пересечения их с линией насыщенного водяным паром воздуха и из точки пересечения провести линии $x = \text{const}$ до пересечения с линией парциального давления водяного пара.

Для сопоставления данных п.2 и п.3 составить табл. 8.2:

Таблица 8.2

Физические параметры влажного воздуха	Численные значения параметров							
	x_m	x_0	J_0	φ_0	p_{π}	t_p	p_n	p'_n
	кг пара/кг с.в.		кДж/кг с.в.	%	мм.рт.ст.	°С	мм.рт.ст.	мм.рт.ст.
Рассчитанные по формулам п.2 и найденные по таблицам								
Определенные по диаграмме Л.К.Рамзина								

*Расчет расхода воздуха, теплоты и пара при конвективной сушке
материала*

Для расчета процесса конвективной сушки, принципиальная схема которой изображена на рис.5, преподаватель задает индивидуальное задание, которое состоит из следующих данных:

- производительность сушилки либо по материалу, поступающему на сушку - G_n , либо по высушенному материалу - G_k , либо по абсолютно сухому материалу - G_c ;
- влажность материала на входе в сушилку - u_n или u'_n и на выходе из нее - u_k или u'_k , где u - влажность материала от общей его массы, u' - влажность материала в расчете на массу сухого вещества;
- температура воздуха после калорифера - t_1 ;
- параметр, характеризующий отличие реального процесса сушки от идеального - Δ ;
- относительная влажность воздуха на выходе из сушильной камеры - φ_2 ;
- давление греющего пара в калорифере - p_{π} ;
- влажность греющего пара - w_{π} .

Расчет проводить с применением диаграммы Рамзина в следующей последовательности.

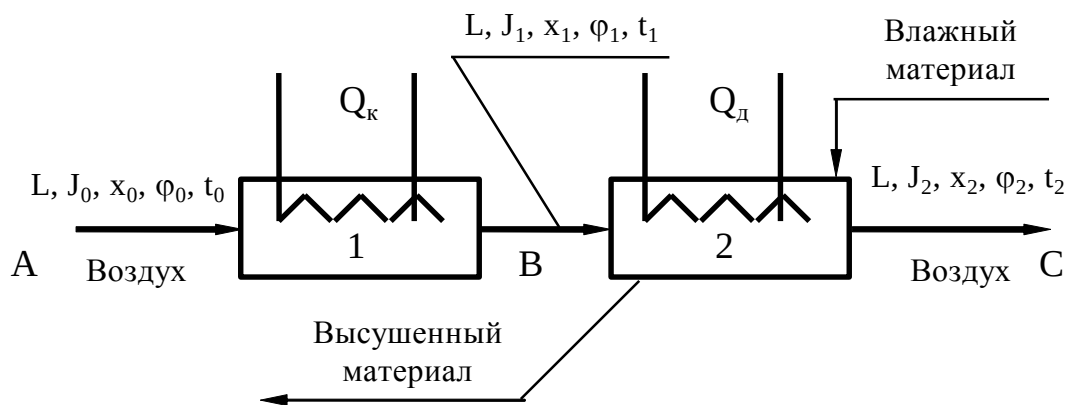


Рис.8.3. Принципиальная схема конвективной сушки:

1-калорифер; 2-сушильная камера; Q_k -теплота, подводимая к воздуху в калорифере; Q_d - дополнительная теплота, подводимая к воздуху в сушильной камере; L -расход сухого воздуха; J, x, ϕ, t -энтальпия, влагосодержание, относительная влажность и температура воздуха на различных участках процесса сушки

1. Построить линию нагрева воздуха в калорифере - линия АВ рис.8.4. При этом считать, что в калорифер 1 (рис.8.3) поступает воздух, параметры которого определены в соответствии с показаниями психрометра Августа, а его состояние характеризуется точкой А на диаграмме Рамзина (рис.8.2 и 8.4). Из точки А по линии $x_0 = \text{const}$ провести прямую линию до пересечения с изотермой t_1 . Точка В характеризует состояние воздуха на выходе из калорифера, т.е. перед поступлением его в сушильную камеру. Определить в точке В влагосодержание x_1 , и энтальпию J_1 , влажного воздуха. При этом $x_1 = x_0$.
2. Учитывая заданное значение Δ , построить на диаграмме Рамзина линию ВС (рис.8.4), характеризующую изменение параметров влажного воздуха в реальной сушильной установке. Для этого, задаваясь значением $x > x_0$ в пределах от 0,015 до 0,025 кг пара/кг сухого воздуха, рассчитать значение J из уравнения

$$J = J_1 + \Delta(x - x_0). \quad (8.3)$$

Пересечение линий $x=\text{const}$ и $J=\text{const}$, отвечающих произвольно выбранному значению x и рассчитанному при этом x значению J , определяет на диаграмме Рамзина промежуточную точку C' (рис.8.4), лежащую на линии BC реального процесса сушки.

Точка C' , в зависимости от знака Δ , располагается на диаграмме выше или ниже линии $J_1=\text{const}$. Это следует учесть при оформлении схемы определения параметров воздуха по диаграмме Рамзина к отчету по работе. На рис.6 представлена схема графического построения при положительном Δ .

Проводя через точки B и C' прямую линию до пересечения с заданным значением φ_2 , находим на диаграмме положение точки C , которая характеризует состояние воздуха на выходе из сушилки. В точке C определить значения влагосодержания x_2 и энтальпии J_2 влажного воздуха.

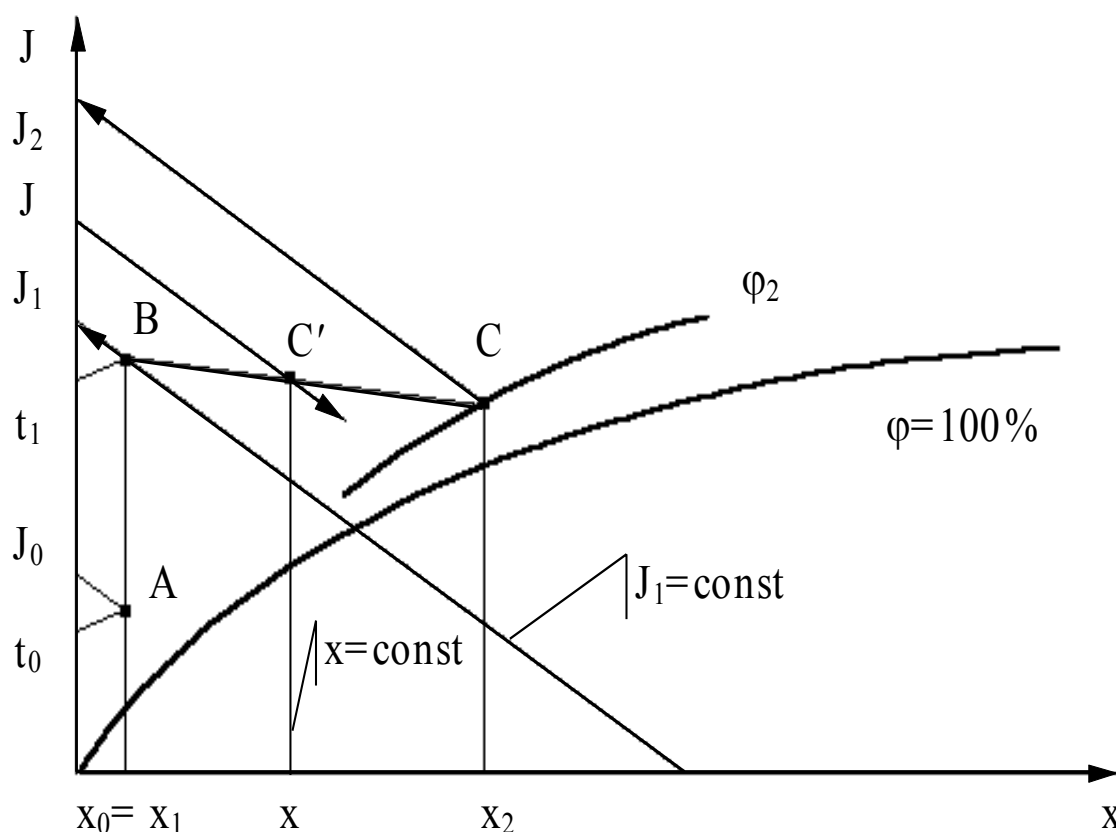


Рис.8.4. Схема определения параметров влажного воздуха по диаграмме Рамзина, в конвективной сушильной установке при $\Delta > 0$

3. Используя характеристики воздуха, найденные по диаграмме Рамзина в точках А, В и С, рассчитать по формуле (10.14) [5] удельный расход l сухого воздуха на сушку материала и по формуле (10.18) [5] удельный расход теплоты q_k на нагрев воздуха в калорифере. Сравнить это значение q_k со значением, рассчитанным по уравнению $q_k = l \cdot (J_2 - J_0) - \Delta$. Если расхождение между ними не более 5%, то в дальнейших расчетах использовать среднее между ними. В противном случае проверить свою работу по диаграмме Рамзина.
4. Рассчитать удельный расход греющего пара для нагрева воздуха в калорифере 1:

$$d_k = \frac{q_k}{r \cdot (1 - w_{\text{п}})},$$

где r - удельная теплота парообразования, определяемая по табл. LVII [5] по заданному давлению греющего пара $p_{\text{гп}}$.

5. Выбирая необходимые для расчета формулы из уравнений (10.1), (10.2) и (10.3) [5], в зависимости от способа задания производительности сушилки и влажности материала, рассчитать количество влаги W , удаляемой из материала в процессе сушки.
6. Рассчитать расход воздуха на сушку и расходы теплоты и греющего пара в калорифере по уравнениям:

$$L = l \cdot W; \quad Q_k = q_k \cdot W; \quad D_k = d_k \cdot W. \quad (8.5)$$

7. По формуле (10.12) [5] рассчитать удельный объем влажного воздуха $v_{\text{уд}}$ с параметрами, отвечающими параметрам воздуха в лаборатории, и его объемный расход по уравнению $V = L \cdot v_{\text{уд}}$.

К отчету о выполненной работе приложить схемы работы по диаграмме Рамзина (без масштабов по осям) с простановкой численных значений, которые были определены или использованы при работе с диаграммой.

Контрольные вопросы

1. Какими параметрами характеризуется влажный воздух?
2. Как пользоваться диаграммой Рамзина для определения различных параметров влажного воздуха?
3. Какой из основных параметров влажного воздуха не определяется по диаграмме Рамзина?
4. По показаниям каких приборов и как можно найти относительную влажность воздуха?
5. На что расходуется теплота воздуха в сушильной камере?
6. В чем отличие идеального (теоретического) и реального процессов сушки? Как они изображаются на диаграмме Рамзина?
7. Почему параметр Δ может принимать положительные и отрицательные значения?
8. Как определить удельные и общие расходы воздуха, теплоты и греющего пара на сушку материала?
9. Как обеспечить более мягкие условия сушки в сушильной установке? Как эти варианты сушки изображаются на диаграмме Рамзина?
10. Отличаются ли удельные расходы воздуха и тепла, на сушку по основному варианту и по вариантам с более мягкими условиями процесса сушки?

Ответы на эти вопросы можно найти в [2] (с. 583-590, 593-607).

РАБОТА №9

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ

Цель работы: провести анализ построенных на основе экспериментальных данных графиков кривой сушки и скорости сушки, применить экспериментальные данные для расчета ленточной сушилки полотна целлюлозы.

Описание экспериментальной установки

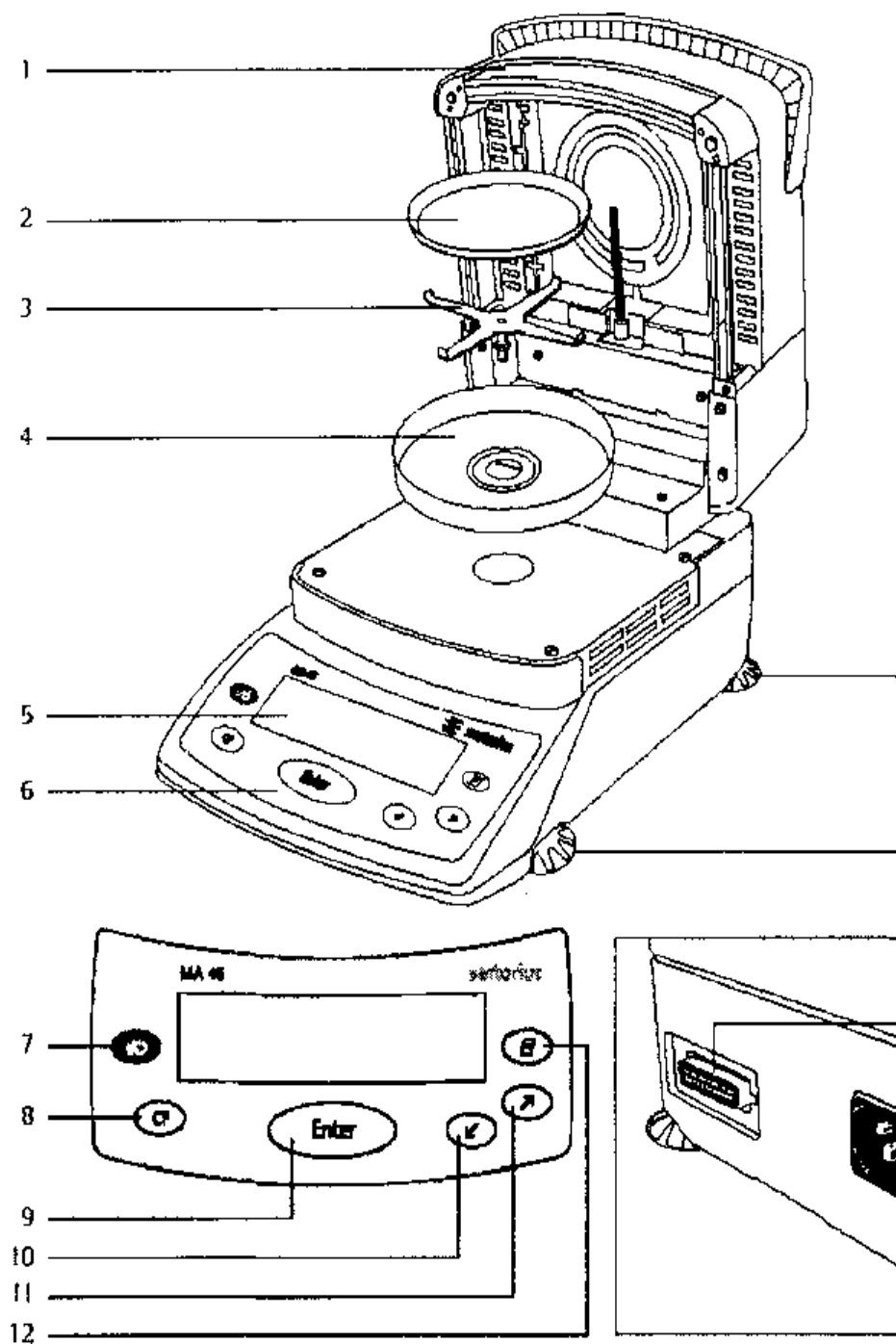


Рис. 9.1. Схема экспериментальной установки

Условные обозначения, представленные на рис. 9.1, приведены в табл. 9.1.

Таблица 9.1

№ п/п	Наименование	Шифр
1	Откидная крышка с нагревательным элементом	
2	Съёмная кювета для образцов (80 штук/упаковка)	6965542
3	Держатель кюветы	69MA0092
4	Защитный диск	69MA0093
5	Дисплей	
6	Клавиатура	
7	Клавиша Вкл./Выкл.	
8	Клавиша CF (сброс)	
9	Клавиша "Enter" (подтверждение)	
10	Клавиша «Вниз/Назад»	
11	Клавиша «Вверх/Вперёд»	
12	Клавиша печати	
13	Ножка для выравнивания	
14	Порт интерфейса	
15	Разъём питания	
	Не показаны:	
16	Пылезащитный чехол для клавиатуры	6960MA02
17	Пинцеты	69MA0072

Методика проведения работы

Работа на анализаторе влажности серии МА-30: Первый этап (5 секунд)
оператор устанавливает режим сушки,

устанавливает в прибор бюксу,

размещает навеску вещества.

Прибор автоматически фиксирует начальную массу с точностью 0,001 г.

Второй этап (не более 15 минут)

Оператор закрывает крышку.

Прибор автоматически начинает процесс инфракрасной сушки,
постоянно автоматически взвешивает и на табло отражает текущее значение влажности.

Третий этап (мгновенно).

Оператор считывает готовый результат с точностью до 0,01%.

Результат может быть выведен на принтер или сохранен в памяти.

Прибор готов к следующему анализу.

Сушку проводить до постоянного веса образца G_p - это вес образца в условиях равновесия с окружающим воздухом. Первое значение времени, при котором перестает изменяться вес образца, отвечает времени достиже-

ния равновесного состояния τ_p . Закончив эксперимент, выключить тумблеры "основной нагрев" и "сеть". Результаты наблюдений заносят в таблицу экспериментальных данных:

размеры высушиваемого образца - $a \times b$;

вес воздушно-сухого образца - $G_{вс}$;

температура сушки - $t, ^\circ\text{C}$.

Таблица 9.2

Время от начала сушки, τ_i , мин	0	τ_1	...	τ_i	...	τ_p
Вес образца, G_i , г	G_0	G_1	...	G_i	...	G_p

Обработка опытных данных

1. Вычислить массу абсолютно сухого волокна в высушиваемом образце целлюлозы. Поскольку общепринятое значение влажности воздушно-сухого образца составляет 12%, то масса абсолютно сухого образца равна $G_{ac} = (1 - 0,12) \cdot G_{вс}$.
2. Пересчитать экспериментальные данные изменения массы образца в процессе сушки в конкретный момент времени:
 - на содержание влаги в образце по формуле $W_i = G_i - G_{ac}$;
 - на содержание влаги, отнесенное к 1 м^2 поверхности высушиваемого образца, по уравнению $u_i = W_i / F$, где F - поверхность высушиваемого образца, при расчете которой необходимо учесть, что испарение влаги из образца происходит с обеих его сторон, т.е. $F = 2 \cdot (a \cdot b)$, где a , b - длина и ширина образца. Результаты расчета оформить в виде следующей таблицы:

Таблица 9.3

Время от начала сушки, τ , мин	Масса влаги в образце, W , г	Содержание влаги, отнесенное к 1 м^2 поверхности образца, u , кг/м^2

3. Все рассчитанные значения u_i при времени τ_i нанести на график $u=f(\tau)$ и, в соответствии с нанесенными на график точками плавно провести кривую сушки. Построенная кривая сушки должна быть аналогична кривой сушки на рис.4.27 [1] или на рис.157 [4]. На кривой сушки отметить критические точки: В - начало периода постоянной скорости сушки; С - переход к периоду падающей скорости сушки и D - установления равновесной влажности образца. Участок ВС - прямая линия. После точки D линия идет параллельно оси ординат. При этом участок АВ (прогрев материала до температуры сушки) может отсутствовать.
4. Рассматривая скорость сушки как количество влаги (воды), удаляемой 1 м² поверхности в единицу времени (за 1 час), построить график скорости сушки при дифференцировании кривой сушки графическим методом. Графическое дифференцирование проводят следующим образом. На кривой $u=f(\tau)$ рис.7 продолжить прямую линию ВС до пересечения с осями координат. Эта линия отсекает отрезки ОЕ на оси ординат и ОF на оси абсцисс. Отношение ОЕ/ОF определенное с учетом масштаба осей равно скорости сушки v_{bc} для периода сушки от τ_b до $\tau_{кр}$ (в точке С) при этом τ_b может быть равно нулю. Далее взять несколько точек на участке кривой для периода от $\tau_{кр}$ до τ_p и провести к ним касательные до пересечения с осями координат. Например, для точки L получаем отрезки ОМ и ОN. Их отношение представляет мгновенную скорость сушки v_L в момент времени τ_L . Аналогично строят касательные еще в 2 - 3 любых точках кривой сушки и получают мгновенные скорости сушки в этих точках. *Указанные расчеты целесообразно представить в правом верхнем углу графика кривой сушки.* По рассчитанным значениям скорости сушки построить графики скорости сушки, аналогичные графикам на рис.4.28 [1] или рис.159

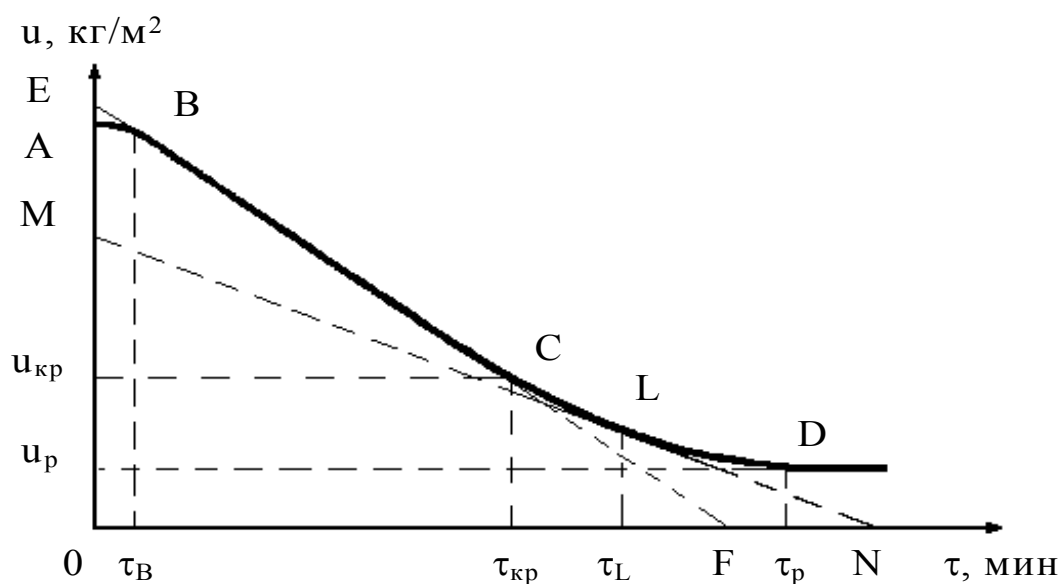


Рис.9.2. К расчету скорости сушки методом графического дифференцирования кривой сушки

- [4]. На графиках отметить критические точки. При времени τ_p скорость сушки становится равной нулю.
5. По графику кривой сушки найти значения времени τ_B , $\tau_{кр}$ и τ_p . Из таблицы обработки экспериментальных данных при найденных значениях времени определить соответствующие значения массы влаги в образце W_B , $W_{кр}$ и W_p , по которым рассчитать влажность материала в долях от массы сухого волокна в высушиваемом образце по формуле $u' = W/G_{ac}$. Получим три значения влажности материала: u'_B в точке B, $u'_{кр}$ в точке C и u'_p в точке D. Поскольку в промышленных условиях сушку ведут не до равновесного состояния, а до воздушно-сухого состояния материала, то в таблице экспериментальных данных найти значение массы материала G_{BC} и для этой массы определить время τ_k . Влажность воздушно-сухого материала в долях от массы сухого волокна равна $u'_k = 0,12 / 0,88 = 0,136 \text{ кг}_{\text{влаги}} / \text{кг}_{\text{а.с.м.}}$.
6. Решая совместно уравнения (10.26) и (10.27) [5], в которых $\tau_1 = \tau_{кр} - \tau_B$, а $\tau_2 = \tau_k - \tau_{кр}$, по аналогии с примером (10.20) [5], рассчитать значение N,

которое определяет скорость сушки в период ее постоянного значения. Рассчитать теоретическое значение постоянной скорости сушки по формуле $v'_{\text{вс}} = (N \cdot G_{\text{ас}}) / F$, найти отношение $v'_{\text{вс}} / v_{\text{вс}}$, сравнить его с рекомендуемым в пункте 14 главы 10 [5]. Не забывайте следить за размерностями величин.

Расчет ленточной промышленной сушилки для целлюлозы

Задание на расчет сушилки предусматривает, что условия сушки, структура и толщина высушиваемого материала в эксперименте и в промышленной установке аналогичны. Исходные данные для расчета:

- производительность установки по воздушно-сухой целлюлозе G ;
- содержание абсолютно сухого волокна (сухость) во влажном материале $x_{\text{н}}$ на входе в сушилку и в высушенном материале $x_{\text{к}}$ на выходе из нее (в массовых долях);
- предельно возможная высота установки H ;
- расстояние по высоте между двумя соседними горизонтальными лентами целлюлозы δ ;
- ширина целлюлозной ленты b .

При расчете определить: длину сушилки L , ее ширину B , число лент целлюлозы в ней n и скорость движения целлюлозной ленты в сушилке w .

Возможны и другие варианты задания.

Последовательность расчета следующая.

1. Для заданных значений сухости влажного и высушенного материала рассчитать их влажность от массы сухого вещества по формуле $u' = (1 - x) / x$. Полученные значения $u'_{\text{н}}$ и $u'_{\text{к}}$ пересчитать на содержание влаги, отнесенное к 1 м^2 поверхности экспериментального образца целлюлозы, применяя зависимость $u = (u' \cdot G_{\text{ас}}) / F$, где $G_{\text{ас}}$ - масса абсолютно сухого образца целлюлозы, F - его поверхность испарения, рассчитанные ранее. В результате расчета получены значения $u_{\text{н}}$ и $u_{\text{к}}$.

2. Найденное из опыта значение скорости сушки в период постоянной ее скорости $v_{\text{вс}}$ с единицы поверхности материала в единицу времени пересчитать на скорость, выражаемую массой воды на единицу массы сухого волокна, испаряемой в единицу времени по уравнению $N = (v_{\text{вс}} \cdot F) / G_{\text{ас}}$.
3. По формулам (10.26) и (10.27) [5] при найденном N , полученным из эксперимента $u'_{\text{кр}}$ и u'_p и рассчитанным для промышленной сушилки u'_n и u'_k , определить продолжительность сушки в промышленной сушилке для периода постоянной скорости τ_1 , для периода падающей скорости τ_2 и общую продолжительность сушки $\tau = \tau_1 + \tau_2$.
4. Рассчитать среднюю скорость удаления влаги из материала в промышленной сушилке по уравнению $v_{\text{ср}} = (u_n - u_k) / \tau$, где u_n и u_k - влажности материала, рассчитанные по заданным значениям x_n и x_k .
5. Рассчитать количество влаги, которое необходимо удалить из целлюлозной ленты в промышленной сушилке по уравнению

$$W = 0,88 \cdot G \cdot \left(\frac{1}{x_n} - \frac{1}{x_k} \right), \quad (9.1)$$

где 0,88 - коэффициент, учитывающий содержание сухого волокна в воздушно-сухой целлюлозе.

6. Определить требуемую поверхность сушки в промышленной установке по формуле $F = W / v_{\text{ср}}$. Тогда при заданной ширине b бумажной ленты, учитывая, что влага испаряется с обеих ее сторон, длина целлюлозной ленты в сушилке составит $l = F / 2 \cdot b$.
7. Число лент целлюлозы n (как целое число), одновременно находящихся в сушильной камере, определяется из условия $N \geq (n+1) \cdot \delta$, где δ - заданное расстояние между лентами.
8. С учетом ширины двух проходов $\Delta l = (1,5 \div 1,8)$ м, расположенных с торцов внутри сушилки и необходимых для ее обслуживания, длина

сушильной камеры равна $L=(l/n)+\Delta l$, а ширина сушилки с учетом ширины двух боковых зазоров $\Delta b=(0,4 \div 0,6)$ м составит $B=b+\Delta b$. Значения Δl и Δb выбрать так, чтобы округлить L и B .

9. Скорость движения целлюлозной ленты по сушилке определить по уравнению $w=l/\tau$.

Контрольные вопросы

1. Что является движущей силой процесса сушки?
2. Что называют скоростью сушки?
3. Какие существуют формы связи влаги с материалом? Какая влага удаляется при сушке?
4. Что такое равновесное влагосодержание материала и от чего зависит его значение? Что такое критическое влагосодержание материала?
5. Как графически изобразить изменение влажности материала, его температуры и скорости сушки во времени?
6. Чем определяется скорость сушки в первом периоде? Как иначе называют этот период сушки?
7. Чем определяется скорость сушки во втором периоде? Как иначе называют этот период сушки?
8. За счет чего переносится влага внутри материала? Что такое влагопроводность и термовлагопроводность?
9. В чем состоит особенность кинетики контактной сушки? Чем отличаются низко- и высокотемпературная контактные сушки?
10. Что представляют собой принципиальные схемы туннельной, пневматической, аэрофонтанной, барабанной, распылительной сушилок и сушилки с псевдоожиженным (кипящим) слоем? Каковы особенности сушки материала в этих сушилках?
11. Какие сушилки применяют для высушивания бесконечной ленты бумажного полотна? Как они работают?

12. Как устроен сушильный цилиндр? Почему необходим наиболее полный отвод конденсата из него? Как осуществляется отвод конденсата? Ответы на эти вопросы можно найти в [2] (с. 590-592, 608-631).

РАБОТА №10

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ПРОСТОЙ ПЕРЕГОНКИ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ СПИРТ-ВОДА

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

Задачи работы:

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

Общие теоретические сведения

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

$$p_A = P_A \cdot x_A; p_B = P_B \cdot x_B = P_B(1 - x_A) \quad (10.1)$$

и Дальтона:

$$p_A = \Pi \cdot y_A, \quad (10.2)$$

где p_A и p_B – парциальные давления низкокипящего (А) и высококипящего (В) компонентов; P_A и P_B – давление насыщенных паров

чистых компонентов А и В при данной температуре; x_A и x_B – мольные доли низкокипящего и высококипящего компонентов в жидкой смеси; P – полное (общее) давление смеси паров ($P = p_A + p_B$); y_A – концентрация (мольная доля) легколетучего компонента в паровой фазе.

При равновесии ($y_A = A$)

$$y_A^* = \frac{P_A}{P_A + P_B} = \frac{P_A \cdot x_A}{P_A \cdot x_A + P_B \cdot (1 - x_A)} = \frac{a \cdot x_A}{a \cdot x_A + (1 - x_A)} \quad (10.3)$$

Экспериментальная установка

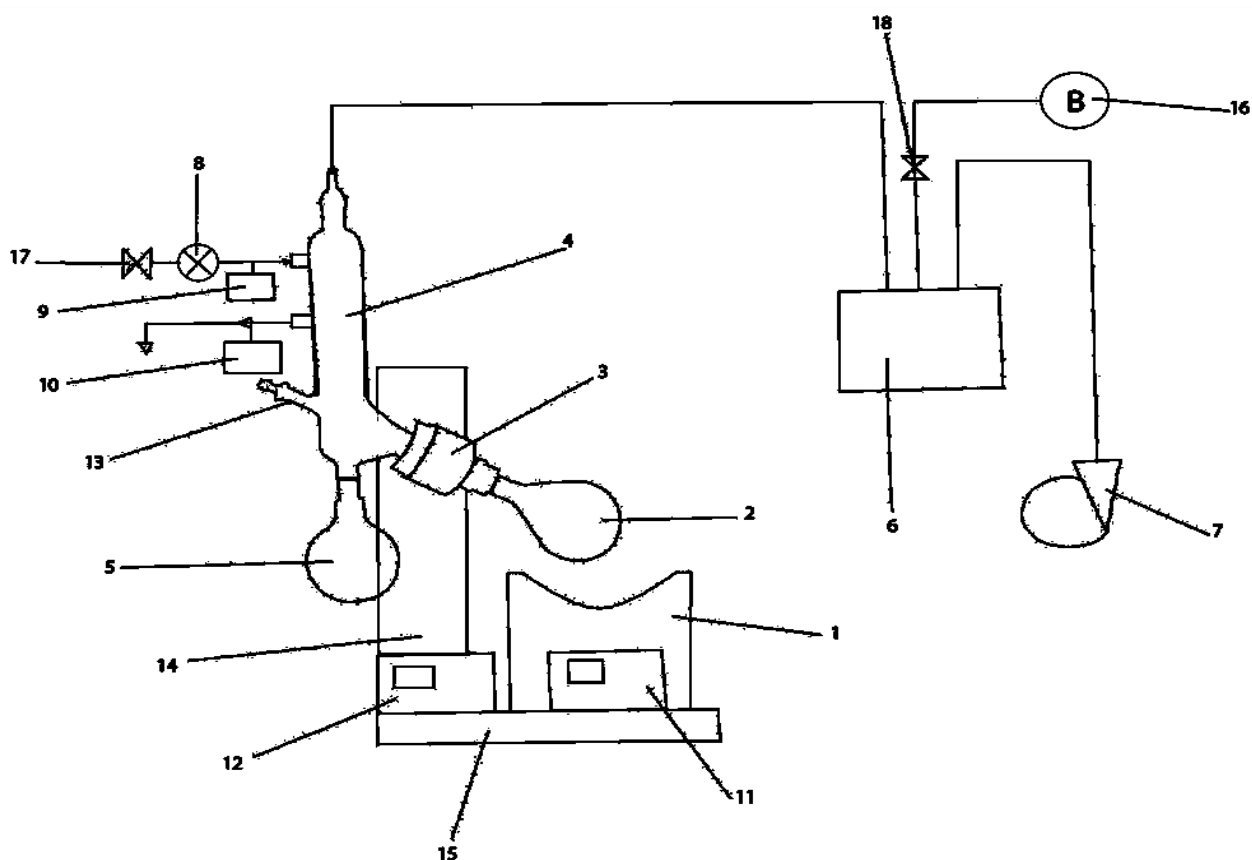


Рис. 10.1. Схема экспериментальной установки:

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

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

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

Уравнение материального баланса простой перегонки по низкокипящему компоненту имеет вид

$$Lx = (L - dL) \cdot (x - dx) + dL \cdot y^*, \quad (10.4)$$

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

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

$$dL \cdot dx = dL \cdot (y^* - x) \text{ или } \frac{dL}{L} = \frac{dx}{y^* - x} \quad (10.5)$$

Интегрируем уравнение (2.8) в пределах изменения количества жидкости в кубе от начального $L = F$ до конечного $L = W$ и соответствующего падения ее концентрации от x_F до x_W за весь цикл перегонки:

$$\int_F^W \frac{dL}{L} = \int_{x_F}^{x_W} \frac{dx}{y^* - x} \quad \text{или} \quad \int_W^F \frac{dL}{L} = \int_{x_W}^{x_F} \frac{dx}{y^* - x} \quad (10.6)$$

После интегрирования получим:

$$\ln \frac{F}{W} = \int_{x_F}^{x_W} \frac{dx}{y^* - x} \quad (10.7)$$

Вид функции $y^* = \varphi(x)$ определяется формой кривой равновесия и обычно не может быть установлен аналитически. Поэтому интегрирование правой части уравнения (10.7) проводят графически – путем построения зависимости $1/(y^* - x)$ от x .

При графическом вычислении интеграла берут последовательно различные значения x в пределах от x_W до x_F , находят по таблице (Приложения) или диаграмме $y^* = \varphi(x)$ (Приложения) соответствующие им значения y^* , вычисляют $1/(y^* - x)$ и строят кривую (рис.10.2).

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

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

$$F \cdot x_F = W \cdot x_W + (F - W) \cdot x_{Dcp} = W \cdot x_W + D \cdot x_{Dcp}. \quad (10.8)$$

Откуда

$$x_{Dcc} = \frac{F \cdot x_F - W \cdot x_W}{D}, \quad (10.9)$$

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

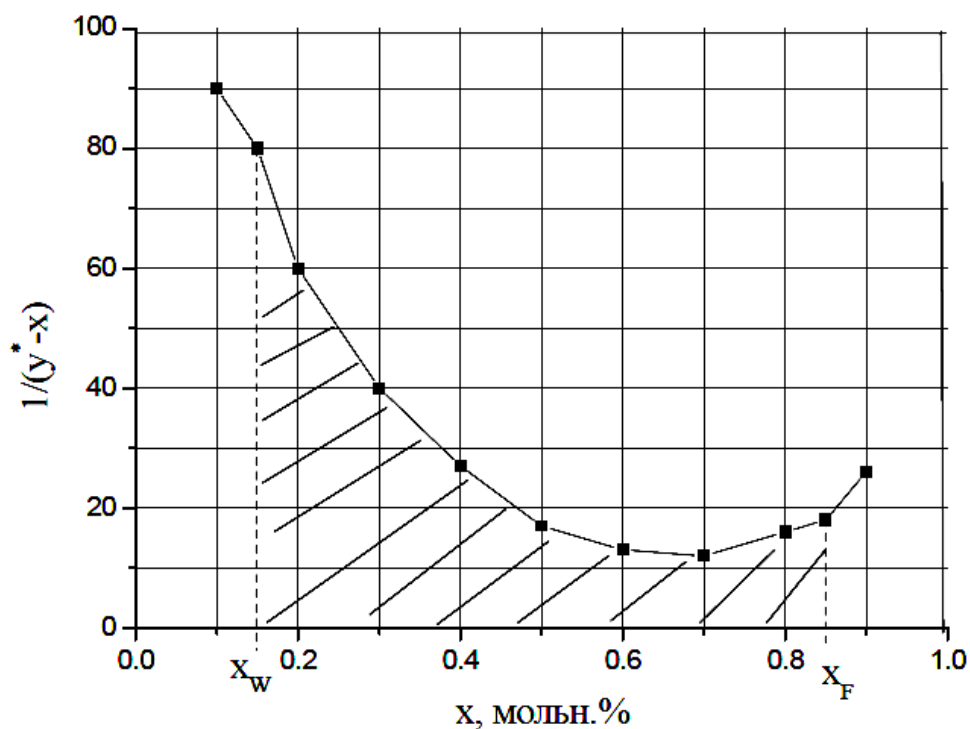


Рис. 10.2. Графическое решение интеграла $\int \frac{dx}{y^* - x}$

Описание экспериментальной установки

Исходная смесь спирт-вода загружается через вентиль загрузки исходной смеси 13 в испарительную колбу 2 (рис.10.1). Подогрев смеси осуществляется с помощью нагревательной бани 1. Регулировка и контроль температуры нагрева в нагревательной бане 1 осуществляется с пульта контроля за подогревом нагревательной бани 11. Интенсификация процесса испарения смеси в ротационном испарителе достигается за счет вращения испарительной колбы 2. Регулировка частоты вращения испарительной колбы 2 осуществляется через регулировку частоты вращения 12. При вращении центробежные силы и силы связи между жидкостью и поверхностью колбы создают плёнку, в связи с этим увеличивается поверхность испарения, за счет чего интенсифицируется процесс. Вращение осуществляется с помощью привода 14 через червячный редуктор. Вакуум в системе создаётся за счет вакуум-насоса 7, который контролируется

с помощью вакуумметра 16. Для улавливания не сконденсировавшихся паров предусмотрена ловушка 6. После открытия вентиля 17 холодная вода подаётся в конденсатор-холодильник 4. В процессе охлаждения контролируется расход воды расходомером 8. Контроль температуры на входе и на выходе осуществляется термopарами 9, 10, конденсат собирается в колбу для отбора конденсата 5. Установка смонтирована на станине 15.

Методика проведения работы

1. Ознакомиться с t - x , y диаграммой для исходной смеси. Данные по равновесию для смесей этиловый спирт и вода представлены в приложении.

2. С помощью ареометра измерить плотность исходной смеси, определить её концентрацию x_f , в масс. % и температуру кипения.

3. Зная количество исходной смеси, её концентрацию по легколетучему компоненту и задавшись концентрацией кубового остатка после перегонки, теоретически по уравнению (2.10) или методом графического интегрирования рассчитать количество кубового остатка W и дистиллята D , получаемых после окончания перегонки ($D = F - W$, где F – количество исходной смеси). По уравнению (2.12) рассчитать среднюю концентрацию легколетучего компонента x_{Dcp} в дистилляте.

При графическом интегрировании необходимо:

а) выписать данные по равновесию и заполнить табл. 10.1 в пределах изменения концентрации исходной смеси от x_F до x_W . Вторая графа табл. 2.1 (x^2) заполняется при расчете на компьютере;

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

в) определить количество кубового остатка W и дистиллята D ;

г) по уравнению (10.8) рассчитать средний состав дистиллята $x_{\text{Дср}}$.

Для расчета интеграла на компьютере надо табличную зависимость $y^* = \varphi(x)$ аппроксимировать кривой, например, квадратным трехчленом вида $y^* = a + bx + cx^2$. Найдя коэффициенты a , b и c , по стандартной программе вычислить определенный интеграл уравнения (рис. 10.2). Теоретически рассчитав количество и среднюю концентрацию дистиллята, приступают к выполнению экспериментальной части работы.

Таблица 10.1

Расчетные данные

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Обработка опытных данных

1. Найденный экспериментально средний состав дистиллята x_d , сравнивают с расчетным $x_{D_{\text{ср}}}$ и рассчитывают ошибку ε , %:

$$\varepsilon = \frac{x_{D_{\text{ср}}} - x_{D_{\text{э}}}}{x_{D_{\text{ср}}}} \cdot 100\%, \quad (10.10)$$

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

а) расхода тепла на подогрев исходной смеси:

$$Q_1 = F \cdot c_F \cdot (t_{\text{кF}} - t_{\text{н}}), \quad (10.11)$$

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

Удельная теплоемкость исходной смеси определяется по формуле:

$$c_F = c_c \cdot x_F + c_b \cdot (1 - x_F), \quad (10.12)$$

где x_F – концентрация исходной смеси, масс.доли;

б) расхода тепла на испарение дистиллята:

$$Q_2 = D \cdot r_D, \quad (10.13)$$

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

масс.доли.Теплота парообразования дистиллята определяется по формуле:

$$r_D = r_c \cdot x_{Dэ} + r_b \cdot (1 - x_{Dэ}), \quad (10.14)$$

в) расхода тепла на нагрев кубового остатка:

$$Q_3 = W \cdot c_W \cdot (t_{кВ} - t_{кФ}), \quad (10.15)$$

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

Удельная теплоемкость кубового остатка определяется по формуле

$$c_W = c_c \cdot x_W + c_b \cdot (1 - x_W), \quad (10.16)$$

где x_W – концентрация кубового остатка, массовой доли.

Тогда общий расход тепла:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3. \quad (10.17)$$

Опытные и расчетные данные

Таблица 10.2

№ п/п	Наименование	Обо- значе- ние	Еди- ницы измере- ния	Зна- чение вели- чины
1	2	3	4	5
1. Опытные данные				
1	Количество исходной смеси	F	кг	
2	Концентрация исходной смеси по низкокипящему компоненту	x_F	масс. доли	
3	Средняя концентрация дистиллята	$x_{Dэ}$	масс. доли	

Окончание табл.10.2

1	2	3	4	5
4	Концентрация кубового остатка	x_W	масс. доли	
5	Начальная температура исходной смеси	t_H	$^{\circ}\text{C}$	
6	Температура кипения исходной смеси	t_{KF}	$^{\circ}\text{C}$	
7	Температура кипения кубового остатка	t_{KW}	$^{\circ}\text{C}$	
8	Время нагрева исходной смеси	τ_H	мин (с)	
9	Время перегонки	τ_P	мин (с)	
10	Количество кубового остатка	W	кг	
11	Количество дистиллята	D	кг	
12	Давление	P	Па	
2. Расчетные данные				
13	Количество кубового осадка	W_p	кг	
14	Количество дистиллята	D_p	кг	
15	Средняя концентрация дистиллята	x_{Dcp}	масс. доли	
16	Процент ошибки в определении концентрации дистиллята	ε	%	

Контрольные вопросы

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 изображение.

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?

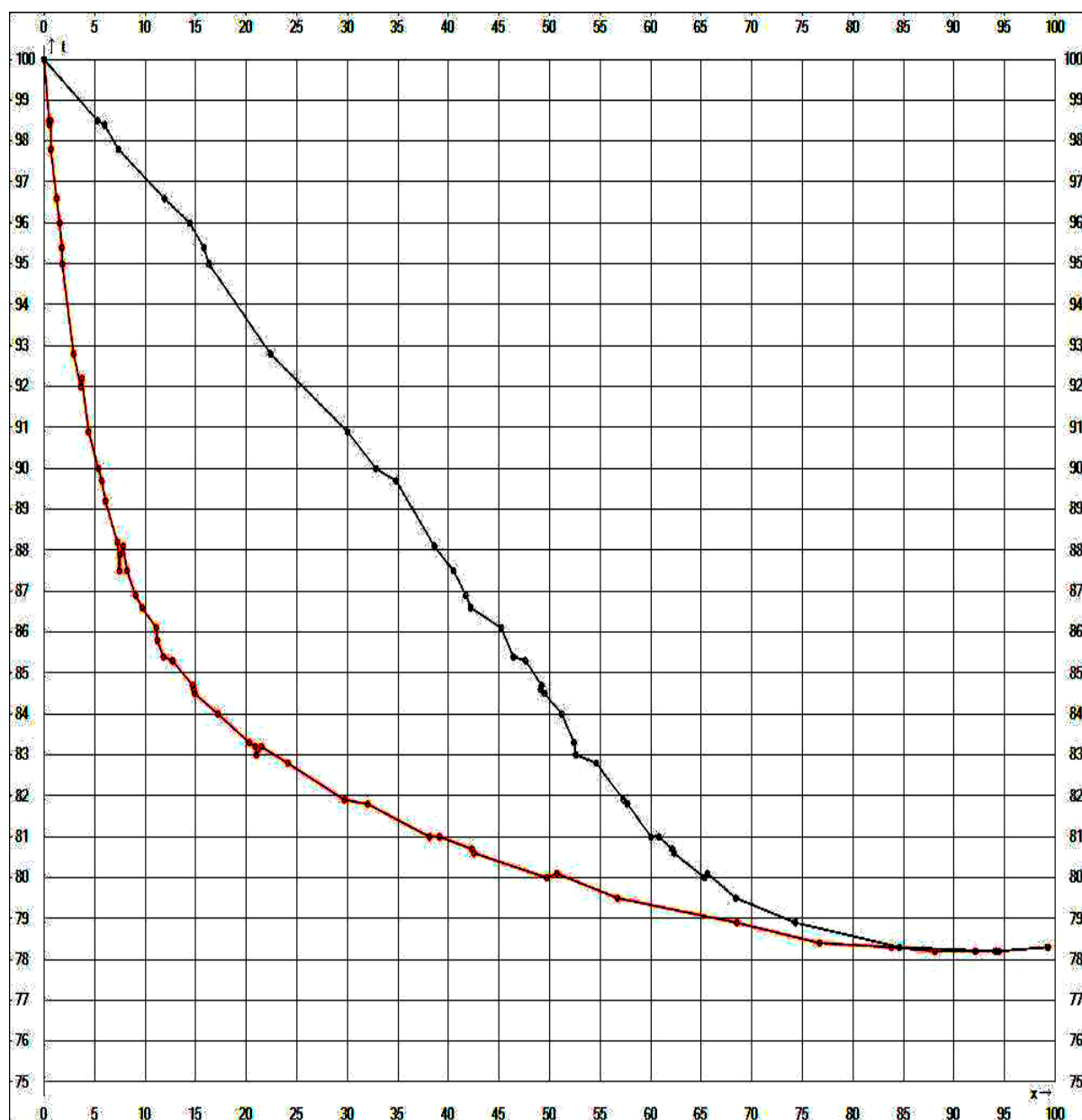
Ответы на эти вопросы можно найти в [2] (с. 471-482).

Приложения

Данные по равновесию для смесей этилового спирта и воды

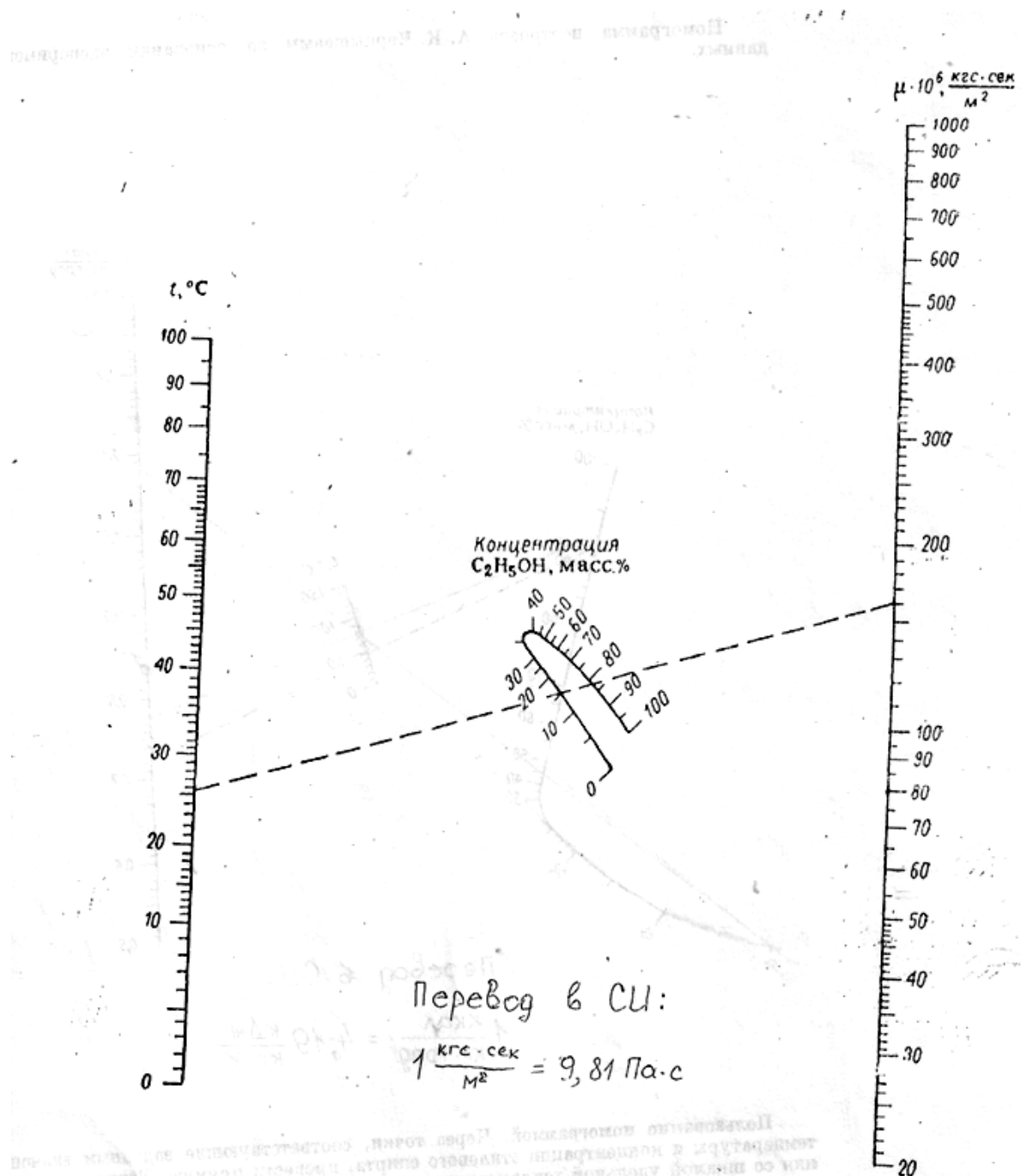
Содержание спирта в жидкой фазе		Температура кипения, °С	Содержание спирта в паровой фазе	
% массо- вый	% моль- ный		% массо- вый	% моль- ный
1,00	0,39	98,75	10,75	4,51
2,00	0,79	97,65	19,7	8,76
3,00	1,19	96,65	27,2	12,75
4,00	1,61	95,8	33,3	16,34
5,00	2,01	95,95	37,0	18,68
6,00	2,43	94,15	41,1	21,45
10,00	4,16	91,3	52,2	29,92
15,00	6,46	89,0	60,0	36,98
20,00	8,92	87,0	65,0	42,09
25,00	11,53	85,7	68,6	46,08
30,00	14,35	84,7	71,3	49,30
35,00	17,41	83,75	73,2	51,67
40,00	20,68	83,1	74,6	53,46
45,00	24,25	82,45	75,9	55,22
50,00	28,12	81,9	77,00	56,71
55,00	32,34	81,4	78,2	58,39
60,00	36,98	81,0	79,5	60,29
65,00	42,09	80,6	80,8	62,22
70,00	47,72	80,2	82,1	64,21
75,00	54,00	79,75	83,8	66,93
80,00	61,02	79,5	85,8	70,29
85,00	68,92	78,95	88,3	74,70
90,00	77,88	78,5	91,3	80,42
95,00	88,15	78,18	95,05	88,25
95,57	89,41	78,15	95,57	89,41

Диаграмма t-x,y



Номограмма для определения коэффициентов вязкости вод- ных растворов этилового спирта

Номограмма построена А.К.Чернышевым на основании экспериментальных данных



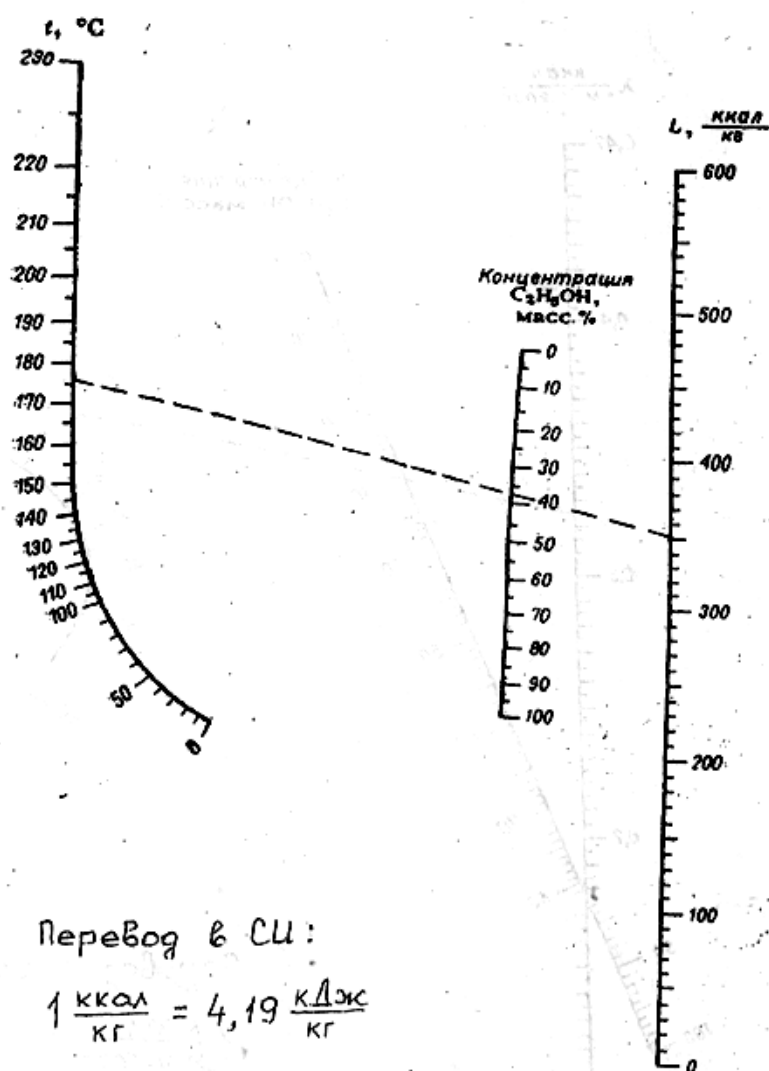
В СИ $1 \text{ кгс/м}^2 = 9,81 \text{ Па} \cdot \text{с}$

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

Номограмма для определения теплоты испарения водных растворов этилового спирта

L или r - скрытая теплота конденсации (испарения)

Номограмма составлена А.К.Чернышевым на основании экспериментальных данных

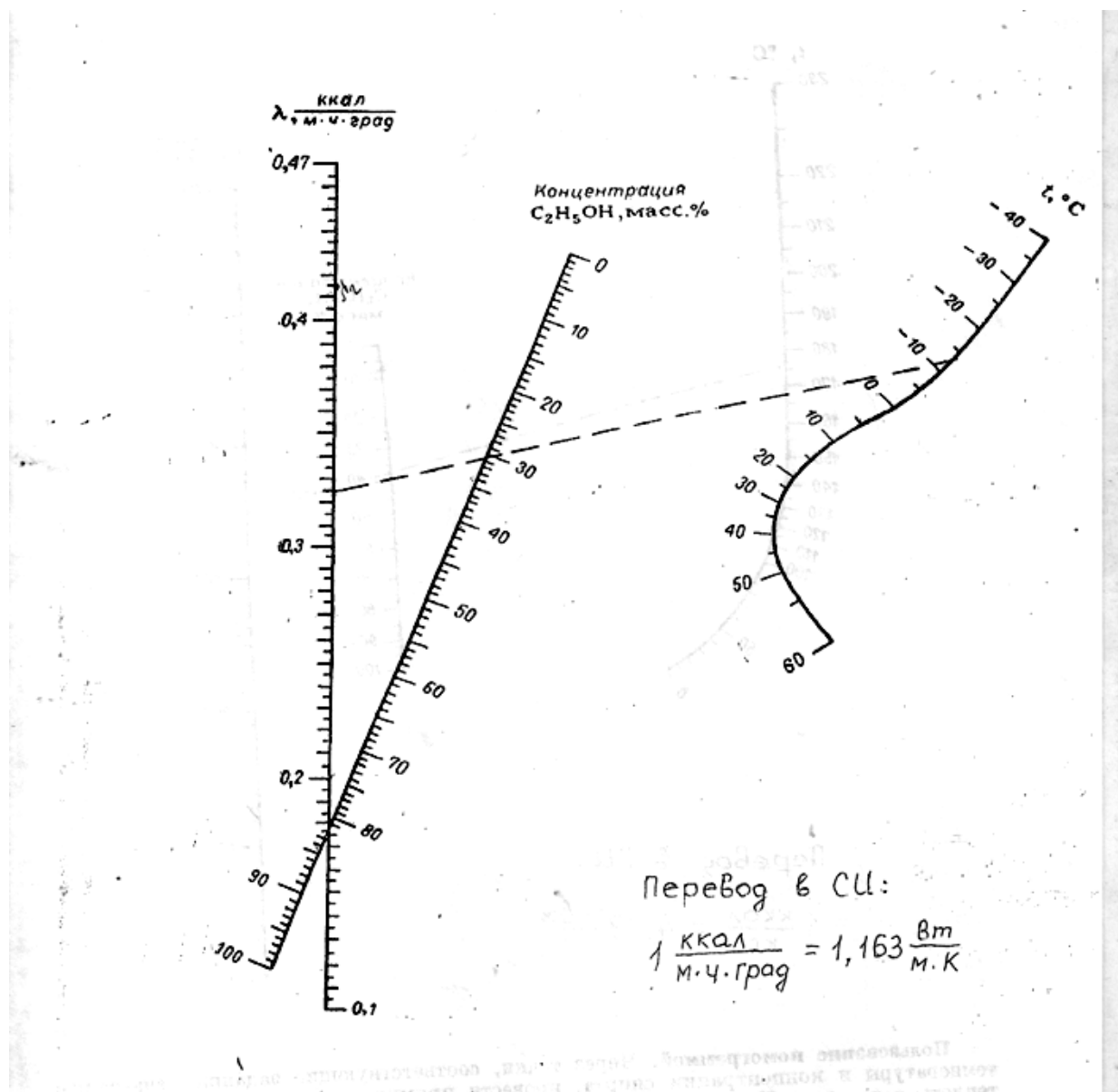


В СИ $1 \text{ ккал/кг} = 4,19 \text{ кДж/кг}$

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

Номограмма для определения коэффициента теплопроводности водных растворов этилового спирта

Программа построена А.К.Чернышевым на основании экспериментальных данных

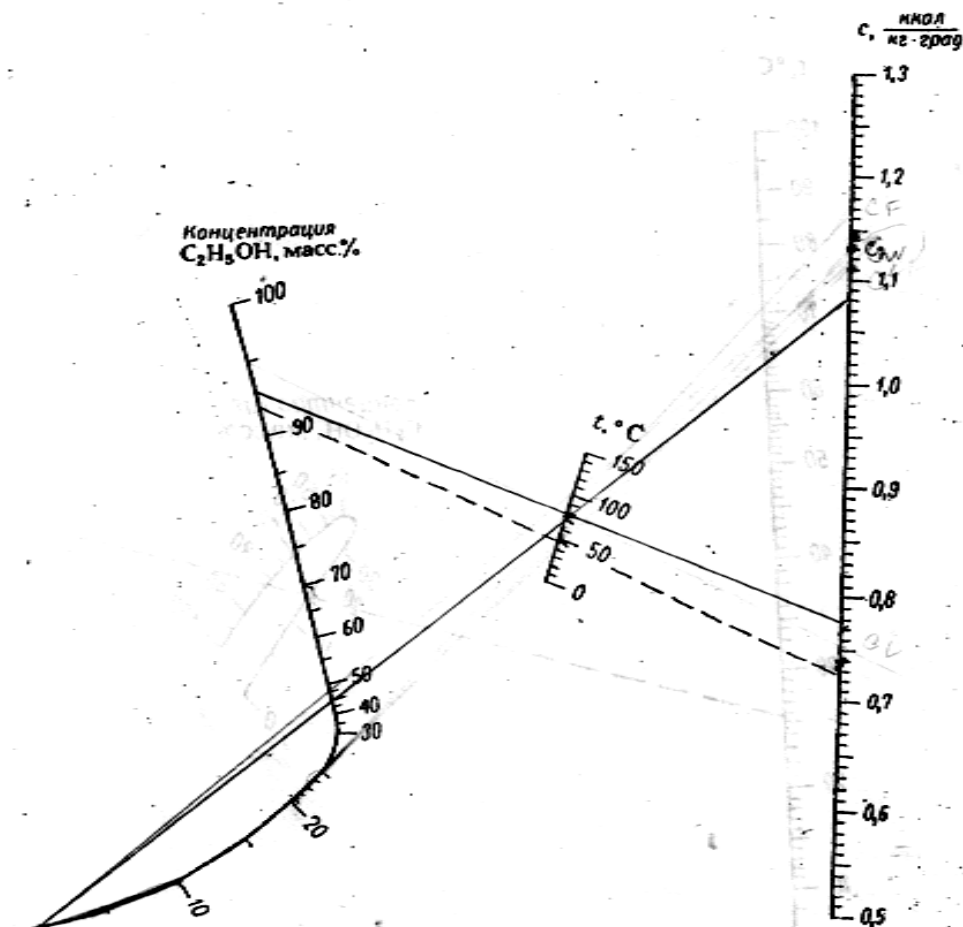


В СИ $1 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}) = 1,163 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$

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

Номограмма для определения удельной теплоёмкости водных растворов этилового спирта

Программа построена А.К.Чернышевым на основании экспериментальных данных



Перевод в СИ:

$$1 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} = 4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

В СИ $1 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{град}) = 4,19 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мидуков Н.П., Куров В.С., Никифоров А.О. Перемешивание в целлюлозно-бумажной промышленности: учеб.пособие/ СПб. СПбГТУРП. 2012.-78 с.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов- М.: Альянс, 2014. - 750 с.
3. Мидуков Н.П., Куров В.С., Никифоров А.О. Массообменные процессы в целлюлозно-бумажной промышленности: учеб. пособие/ СПб. СПбГТУРП, 2015. – 125 с.
4. Куров В.С., Мидуков Н.П., Никифоров А.О. Массообменные процессы. Дистилляция: методические указания к лабораторной работе по курсу «Процессы и аппараты» - СПб. СПбГТУРП, 2013.-23с.
5. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие - 10-е изд., пер. и доп. - М.: Альянс, 2013. 576 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Работа № 1	
1.1. Гидравлические сопротивления элементов напорного трубопровода.....	4
1.1.1. Описание гидравлического стенда.....	4
1.1.2. Основные технические характеристики стенда	7
1.1.3. Подготовка стенда к работе.....	8
1.2. Исследование зависимости коэффициента гидравлического трения от режима движения жидкости.....	11
1.3. Исследование уравнения Бернулли.....	14
1.4. Исследование зависимости коэффициентов местных гидравлических сопротивлений от режима движения жидкости	20
Работа №2. Исследование работы центробежных машин на гидравлическую сеть.....	26
Работа №3. Исследование процесса разделения суспензий методом осаждения.....	35
Работа №4. Исследование процесса разделения суспензий методом фильтрования.....	41
Работа №5. Расход энергии на перемешивание в жидких средах.....	50
Работа №6. Определение коэффициента теплопередачи в теплообменнике типа труба в трубе.....	55
Работа №7. Определение основных показателей работы выпарного аппарата.....	63
Работа №8. Определение основных параметров влажного воздуха и графоаналитический расчет процесса конвективной сушки.....	71
Работа №9. Исследование кинетики конвективной сушки.....	80
Работа №10. Изучение процесса простой перегонки двухкомпонентной смеси спирт-вода.....	89
Приложения	100
Библиографический список	106