

Министерство образования и науки Российской Федерации

Сыктывкарский лесной институт (филиал) федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный  
лесотехнический университет имени С. М. Кирова»

Кафедра теплотехники и гидравлики

## **ГИДРАВЛИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА**

Сборник описаний лабораторных работ  
для студентов специальности 280201 «Охрана окружающей среды и рациональное ис-  
пользование природных ресурсов», направлений бакалавриата 280200 «Защита окру-  
жающей среды» и 280700 «Техносферная безопасность» (профиль: Инженерная защита  
окружающей среды) всех форм обучения

*Издание 2-е, переработанное*

*Самостоятельное учебное электронное издание*

**СЫКТЫВКАР 2012**

УДК 621.1  
ББК 30.123  
Г46

Рекомендованы к изданию в электронном виде кафедрой теплотехники и гидравлики  
Сыктывкарского лесного института.

Утверждены к изданию в электронном виде советом технологического факультета  
Сыктывкарского лесного института.

Составители:

**Е. Г. Казакова**, старший преподаватель;

**Т. Л. Леканова**, кандидат химических наук, доцент (отв. редактор)

**Гидравлика и теплотехника** [Электронный ресурс] : сборник описаний лабораторных работ для студентов специальности 280201 «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов», направлений бакалавриата 280200 «Защита окружающей среды» и 280700 «Техносферная безопасность» (профиль: Инженерная защита окружающей среды) всех форм обучения : самост. учеб. электрон. изд. / Сыкт. лесн. ин-т ; сост. Е. Г. Казакова, Т. Л. Леканова. – Изд. 2-е, перераб. – Электрон. дан. – Сыктывкар : СЛИ, 2012. – Режим доступа: <http://lib.sfi.komi.com>. – Загл. с экрана.

Сборник описаний лабораторных работ составлен в соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования для подготовки студентов по специальности 280201 «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов», для подготовки бакалавров направления 280200 «Защита окружающей среды» и бакалавров по направлению 280700 «Техносферная безопасность» (профиль: Инженерная защита окружающей среды) всех форм обучения.

Даны сведения о дисциплине «Гидравлика и теплотехника», ее целях, задачах, месте в учебном процессе. Приведены описания десяти лабораторных работ и список литературы для самоподготовки.

Издание второе, переработанное. Первое издание вышло в 2007 г.

УДК 621.1  
ББК 30.123

---

*Самостоятельное учебное электронное издание*

Составители: **Казакова** Елена Геннадиевна, **Леканова** Тамара Леонардовна

### **ГИДРАВЛИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА**

Электронный формат – pdf

Разрешено к публикации 27.11.12. Объем 6,5 уч.-изд. л.

Сыктывкарский лесной институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова» (СЛИ),  
167982, г. Сыктывкар, ул. Ленина, 39, [institut@sfi.komi.com](mailto:institut@sfi.komi.com), [www.sli.komi.com](http://www.sli.komi.com)  
Редакционно-издательский отдел СЛИ. Заказ № 112.

© СЛИ, 2012

© Казакова Е. Г., Леканова Т. Л., составление, 2012

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

Цель и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе.....	4
1. Лабораторная работа № 1. Определение гидравлических сопротивлений напорного трубопровода.....	6
2. Лабораторная работа № 2. Определение характеристик циклона.....	21
3. Лабораторная работа № 3. Изучение процесса разделения суспензии фильтрованием.....	34
4. Лабораторная работа № 4. Определение характеристик центробежного насоса. Работа центробежного насоса на сеть.....	47
5. Лабораторная работа № 5. Исследование процессов перемешивания в жидкой среде.....	59
6. Лабораторная работа № 6. Определение коэффициента теплопроводности материалов методом бесконечной пластины.....	72
7. Лабораторная работа № 7. Определение коэффициента теплоотдачи при свободном движении воздуха около горизонтального цилиндра.....	87
8. Лабораторная работа № 8. Изучение процесса теплопередачи в теплообменнике типа «труба в трубе».....	101
9. Лабораторная работа № 9. Изучение процесса простой перегонки.....	116
10. Лабораторная работа № 10. Изучение процесса жидкостной экстракции.....	130
Библиографический список.....	140

## Цель и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе

### Цель преподавания дисциплины

Целью преподавания дисциплины "Гидравлика и теплотехника" является обеспечение теоретической подготовки и фундаментальной базы инженеров-экологов. Данный курс формирует будущего специалиста и обеспечивает глубокое понимание сущности основных и физико-химических процессов различных технологий, знакомит с наиболее распространенными типовыми конструкциями аппаратов применяемых в этих технологиях и методами их расчета и подбора соответствующего оборудования.

### Задачи изучения дисциплины

В результате изучения курса "Гидравлика и теплотехника" студент должен иметь представление:

- о методах образования неоднородных систем;
- о методах разделения жидких неоднородных систем;
- о методах разделения газовых неоднородных систем;
- о перемешивании жидких и газовых систем;
- о процессах, идущих без изменения агрегатного состояния;
- о процессах, идущих с изменением агрегатного состояния;
- о методах составления тепловых и материальных балансов технологических аппаратов, установок, процессов и производств;
- о тепло-массообменных процессах;
- об экстракционных процессах;
- о мембранных процессах;
- о кристаллизационных процессах;
- о конвективной и контактной сушке.

Знать и уметь использовать:

- основные понятия, законы и модели механики жидкости и газа /пара/; физические свойства капельных и упругих жидкостей; практические приложения законов гидростатики и гидродинамики; приемы масштабирования, т.е. перехода от лабораторных опытов и образцов к промышленным процессам и аппаратам;
- процессы передачи теплоты: теплопроводностью, конвекцией, излучением; сложный теплообмен, теплопередача через различные поверхности; конструкции теплообменных аппаратов; нагревающие агенты и способы нагревания; охлаждающие агенты и способы охлаждения;
- массообменные (диффузионные) процессы на примере: физической и химической абсорбции, дистилляции и ректификации; жидкост-

ной экстракции, адсорбции, кристаллизации, сушки, растворения и экстрагирования; мембранного разделения;

- определять основные размеры аппаратов: диаметр, высоту, поверхность теплообменников, отстойников, фильтров, абсорберов, сушилок и т. п. Подбирать по ГОСТам, отраслевым нормам, справочникам и каталогам типовое технологическое оборудование;
- читать и уметь выполнять чертежи аппаратов и технологические схемы соответствующих производств.

### **Норма государственного образовательного стандарта**

Основы теории переноса импульса, теплоты, массы; теория физического и математического моделирования процессов переноса; гидродинамика и гидродинамические процессы: основные уравнения движения жидкостей гидродинамическая структура потоков, перемещение жидкостей, сжатие и перемещение газов; разделение жидких и газовых неоднородных систем; перемешивание в жидких средах; тепловые процессы и аппараты: основы теории передачи теплоты, промышленные способы подвода и отвода теплоты; массообменные процессы и аппараты в системах со свободной границей раздела фаз; основы теории массопередачи и методы расчета массообменной аппаратуры: абсорбция, перегонка и ректификация, экстракция; массообменные процессы с неподвижной поверхностью контакта фаз: адсорбция, сушка, ионный обмен, растворение и кристаллизация; мембранные процессы.

## Лабораторная работа № 1

### Определение гидравлических сопротивлений элементов напорного трубопровода

2 часа

**Цель работы:** исследование гидравлических сопротивлений элементов напорного трубопровода.

**Задачи работы:**

1. Опытное определение коэффициента трения  $\lambda$  в трубопроводе при различных скоростях движения жидкости.
2. Установление величины коэффициентов местных сопротивлений  $\xi_{м.с.}$ .
3. Ориентировочная оценка эквивалентной шероховатости трубопровода  $\Delta_{эк.}$ .
4. Определение полного перепада давления в системе  $\Delta P$ .
5. Расчет мощности двигателя насоса  $N$ .

**Обеспечивающие средства:** лабораторный стенд, состоящий из напорного бака с центробежным насосом; пяти объектов исследования (местные сопротивления) – участок внезапного расширения, внезапного сужения, запорного вентиля, муфтового закругления, диафрагмы и прямого участка трубы. Контрольно-измерительные приборы – семь дифференциальных манометров; дифференциальный мембранный манометр с вторичным прибором КСД2-16; термометр.

**Задание:** на каждом из участков трубопровода, где установлены местные сопротивления и на линии с прямым участком провести замеры показаний манометров, изменяя расход потока воды; рассчитать коэффициенты сопротивления трения  $\lambda$  при различных скоростях движения жидкости в трубопроводе; установить величины коэффициентов местных сопротивлений  $\xi_{м.с.}$ ; оценить эквивалентную шероховатость трубопровода  $\Delta_{эк.}$ ; определить полный перепад давления в системе  $\Delta P$ ; рассчитать мощность двигателя  $N$  для одного из режимов по заданию преподавателя.

**Требования к отчету:** итоги лабораторной работы должны быть представлены на листах формата А4, графики – на миллиметровой бумаге, выполненные в карандаше. Работа выполняется побригадно (4 чел.), каждый студент в бригаде составляет свой собственный отчет. В отчете указывается название института, кафедры, лабораторной работы, фамилия и инициалы студента, название специальности и группы, вида обучения, факультета., а также: цель работы, схема установки, методика проведения работы, основные формулы расчетов с расшифровкой символов, подробные расчеты значений одного из режимов, таблица 1.1 «Экспериментальные данные и расчетные данные», построение графика зависимости коэффици-

ента гидравлического трения  $\lambda$  от числа  $Re$  ( $\lambda - \lg Re$ ); построение графика зависимости  $\xi_{m.c.} - \lg Re$ . Написать выводы по работе и защитить отчет.

**Технология работы:** устанавливают первоначально наименьший из требуемых расход воды, и поток направляют через заданные объекты исследования и потери давления (напора) на соответствующих участках замеряют по показаниям манометров и заносят в отчетную таблицу.

### **Контрольные вопросы**

1. На преодоление каких потерь затрачивается энергия при движении жидкости по трубопроводу?
2. В какую форму переходит механическая энергия потока, теряемая при движении?
3. Что такое средняя скорость потока?
4. Как влияет шероховатость на потери энергии?
5. Как экспериментально определить коэффициент трения и коэффициент местного сопротивления?
6. Как проявляются на изменение величины коэффициента трения условия протекания жидкости при различных режимах движения?
7. Как определить шероховатость трубы?
8. Почему сужение, расширение, вентиль, муфтовое закругление оказывают различные сопротивления?
9. Как в работе измеряют расход воды, текущей по трубопроводу?
10. Физический смысл критериев Эйлера и Рейнольдса?
11. Как определить полный перепад давления (напор) в системе?

**Библиографический список** приведен в конце сборника описаний лабораторных работ.

## Описание лабораторной работы

### Теоретическая часть

Одним из важнейших вопросов гидромеханики является определение потерь энергии при движении жидкости. При движении жидкости по трубопроводам возникают потери энергии, которые зависят от длины трубопроводов (пропорциональные длине канала), и потери энергии в местных сопротивлениях – запорная арматура, повороты, расширения и сужения трубопроводов – вызываемые изменениями скорости потока либо по величине, либо по направлению. Потери энергии потока как на преодоление сопротивлений по длине трубопроводов, так и на преодоление местных сопротивлений, в конечном счете, обусловлены вязкостью жидкости, а, следовательно, теряемая механическая энергия рассеивается и переходит в тепловую.

Важность определения потери напора  $h_n$  (или потери давления  $\Delta P$ ) связана с необходимостью расчета затрат энергии, требуемых для компенсации этих потерь и перемещения жидкостей, например, с помощью насосов, компрессоров, воздуходувок и т. д.

Потерянный напор является суммой двух слагаемых:

$$h_n = h_{Tp} + h_{mc}, \quad (1.1)$$

где  $h_{Tp}$  и  $h_{mc}$  – потери напора вследствие трения и местных сопротивлений, соответственно, *м.ст.ж.*

Для вычисления потерь напора обычно пользуются частными эмпирическими формулами

$$h_{Tp} = \lambda \frac{lw^2}{d2g} \quad (1.2)$$

и

$$h_{mc} = \zeta \frac{w^2}{2g}, \quad (1.3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения;  $\zeta$  – коэффициент местного сопротивления;  $l$  – длина трубы, *м*;  $d$  – диаметр трубы, *м*;  $w$  – средняя скорость движения потока, *м/с*.

Средняя скорость, входящая в формулы (1.2) и (1.3), – это такая, одинаковая для всех точек сечения, скорость, при которой за единицу времени через данное сечение проходит тот же расход жидкости, что и при

действительном распределении скоростей по сечению потока. Среднюю скорость определяют по уравнению расхода

$$w = V/S, \quad (1.4)$$

где  $V$  – объемный расход, т. е. объем жидкости, проходящий через живое сечение потока за единицу времени,  $m^3/c$ ;  $S$  – живое сечение потока, в случае течения по трубе равно площади поперечного сечения трубы,  $m^2$ .

Из формул (1.2) и (1.3) следует, что потери энергии на трение и местные сопротивления пропорциональны скоростному или динамическому напору ( $w^2/2g$ ), который является мерой кинетической энергии потока, отнесенной к единице объема жидкости. В действительности эта зависимость значительно сложнее, так как коэффициент трения и коэффициент местного сопротивления не являются постоянными величинами, а существенно зависят от скорости течения жидкости, ее плотности и вязкости, а также диаметра и шероховатости трубы, по которой движется поток.

Значительно более полно можно описать напорное движение потока, если исходить из общих положений гидродинамики.

Установившееся движение потока определяется уравнением

$$Eu = A Re^m \Gamma_1^n \Gamma_2^q, \quad (1.5)$$

которое представляет собой критериальную форму уравнения Навье – Стокса для установившегося движения жидкости при напорном течении по прямому трубопроводу. В этом уравнении:

$Eu = \frac{\Delta P}{\rho w^2}$  – критерий Эйлера, являющийся мерой отношения сил давления

и сил инерции;

$Re = \frac{wd\rho}{\mu}$  – критерий Рейнольдса, являющийся мерой отношения сил

инерции и сил вязкости;

$\Gamma_1 = \frac{l}{d}$  – симплекс геометрического подобия по длине;

$\Gamma_2 = \frac{\Delta_{эк}}{d}$  – симплекс геометрического подобия по шероховатости;

$\Delta_{эк}$  – эквивалентная шероховатость,  $m$ ;

$\rho$  – плотность жидкости,  $kg/m^3$ ;

$A, m, n, q$  – коэффициенты, зависящие от режима движения потока, т. е. такая условная постоянная по длине трубы шероховатость, образованная выступами одинаковой высоты  $\Delta_{эк}$ , при которой потери энергии потока на трение будут теми же самыми, что и при данной реальной шероховатости с выступами различной величины.

Прохождение потока через местные сопротивления может быть охарактеризовано аналогичными критериальными уравнениями, однако выражение симплексов геометрического подобия для этих случаев пока не установлено и константы уравнения не определены.

Влияние характеристик, входящих в уравнение (1.5), на величину трения проявляются по-разному при различных режимах потока в трубе. В одном диапазоне изменения чисел Рейнольдса, характеризующих режим движения, на величину  $\lambda$  влияет в большей степени скорость, в другом диапазоне преобладающее внимание оказывают геометрические характеристики – диаметр и шероховатость трубы (высота выступов шероховатости  $\Delta$ ).

В связи с этим различают четыре области сопротивления, в которых изменение  $\lambda$  имеет свою закономерность.

*Первая область* – область ламинарного потока, ограниченная значениями  $Re < 2320$ , в которой  $\lambda$  зависит от числа Рейнольдса ( $Re$ ) и не зависит от величины  $\Delta$ , определяется по формуле Пуазейля

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (1.6)$$

При этом значении  $\lambda$  потери напора по длине трубы пропорциональны скорости в первой степени. Все остальные области сопротивления находятся в зоне турбулентного режима с различной степенью турбулентности.

*Вторая область* – гидравлически гладкие трубы. Поток в трубе при этом турбулентный, но у стенок трубы сохраняется слой жидкости, в пределах которого движение остается ламинарным. Трубы считаются гидравлически гладкими, если толщина ламинарного слоя  $\delta$  больше высоты  $\Delta$  выступов шероховатости. В этом случае ламинарный слой покрывает неровности стенок трубы, и последние не оказывают тормозящего влияния на основное турбулентное ядро потока.

Границу зоны гидравлически гладких труб можно определить из зависимости

$$Re \leq 27 \left( \frac{d}{\Delta} \right)^{1,14}. \quad (1.7)$$

Для гидравлически гладких труб, т. е. при условии  $\delta > \Delta$ , коэффициент  $\lambda$  может быть определен по формуле

$$\lambda = 0,316 Re^{-0,25} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}}, \quad (1.8)$$

которая применима при значениях чисел Рейнольдса  $Re \leq 10^5$ .

*Третья область* – переходная от области гидравлически гладких труб к квадратичной области. В этой области толщина ламинарного слоя  $\delta$  равна или меньше выступов шероховатости  $\Delta$ , которые в этом случае выступают как препятствия у стенок, увеличивая турбулентность, а, следовательно, и сопротивление в потоке.

Для определения  $\lambda$  в переходной области сопротивления применима формула

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[ \frac{\Delta}{3,7d} + \left( \frac{6,81}{Re} \right)^{0,9} \right]. \quad (1.9)$$

Потери напора по длине трубы в переходной области сопротивления пропорциональны скорости в степени от 1,75 до 2,0.

*Четвертая область* – гидравлически шероховатых труб или квадратичного сопротивления (автомодельная область). Основное влияние на сопротивление потоку оказывает шероховатость стенок трубы. Чем больше выступы шероховатости  $\Delta$ , тем большую турбулентность они вызывают, тем больше будут затраты энергии в потоке на преодоление сопротивлений. В квадратичной области сопротивления коэффициент  $\lambda$  не зависит от скорости, а становится функцией только относительной шероховатости  $\varepsilon$ , выражаемой отношением абсолютной шероховатости  $\Delta$  к диаметру  $d$  трубы

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d}. \quad (1.10)$$

Для автомодельной области в уравнении (1.9) можно пренебречь вторым слагаемым в квадратных скобках, и оно принимает вид

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \frac{3,7}{\varepsilon}. \quad (1.11)$$

Коэффициент местного сопротивления  $\zeta$  при установившемся напорном движении жидкости, в общем случае, зависит от формы местного сопротивления, относительной шероховатости стенок  $\Delta/d$ , распределения скоростей в граничных сечениях потока перед местным сопротивлением и после него, и значения числа  $Re$ .

Ввиду большой сложности структуры потока в местных сопротивлениях значения  $\zeta$ , как правило, могут быть определены только опытным путем.

Основные виды местных потерь напора можно условно разделить на следующие группы:

а) потери, связанные с изменением сечения потока, или, что то же, его средней скорости. Сюда относятся случаи внезапного расширения, сужения, а также постепенного расширения и сужения потока;

б) потери, вызванные изменением направления потока. К таким сопротивлениям относятся: колена, угольники, отводы, используемые на трубопроводах;

в) потери, вызванные с протеканием жидкости через арматуру различного типа (вентили, краны, обратные клапаны, сетки, отборы и т. д.).

Рассмотрим некоторые случаи местных сопротивлений

#### Внезапное расширение потока

При внезапном расширении поперечного сечения трубы возникают так называемые потери на «удар», рис. 1.1.

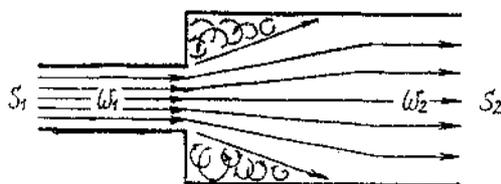


Рис. 1.1. Схема потока при внезапном расширении

Коэффициент сопротивления «удара» в случае равномерного распределения скоростей по сечению трубы перед ее расширением и турбулентного течения ( $Re > 3500$ ) зависит только от отношения площадей узкого и широкого сечения  $S_1 / S_2$ , и вычисляется по формуле

$$\zeta_{в.р.} = \frac{h_{в.р.}}{w_1^2 / 2g}, \quad (1.12)$$

где  $\zeta_{в.р.}$  – коэффициент сопротивления при внезапном расширении;  $h_{в.р.}$  – потери напора при внезапном расширении, м;  $w_1, w_2$  – средние скорости потока соответственно в узкой и широкой части трубы, м/с;  $S_1, S_2$  – площади сечения соответственно в узкой и широкой части трубы, м<sup>2</sup>.

При числе Рейнольдса в пределах  $10 < Re < 3500$  (ламинарный и переходный режим течения) коэффициент сопротивления «удара» зависит не только от отношения площадей  $S_1 / S_2$ , но и от числа  $Re$ , а при  $Re < 10$  – только от этого числа.

#### Внезапное сжатие потока

Во входных участках, в которых осуществляется внезапное сужение, т. е. внезапный переход от большого сечения с площадью  $S_1$ , рис. 1.2, по-

тери энергии главным образом зависят от степени сжатия струи.

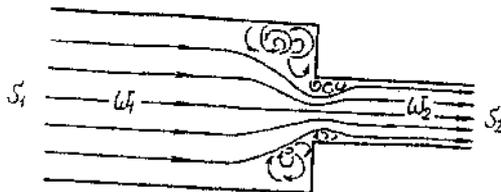


Рис. 1.2. Схема потока при внезапном сужении

При больших числах Рейнольдса ( $Re > 10^4$ ) коэффициент сопротивления зависит от отношения площадей  $S_1 / S_2$ . Этот коэффициент вычисляется по формуле

$$\zeta_{в.с.} = \frac{h_{в.с.}}{w_2^2 / 2g}, \quad (1.13)$$

где  $\zeta_{в.с.}$  – коэффициент сопротивления участка при внезапном сужении;  $h_{в.с.}$  – потеря напора при внезапном сужении, м;  $w_1, w_2$  – средние скорости потока соответственно в широкой и узкой части трубы, м/с;  $S_1, S_2$  – площади сечения соответственно в широкой и узкой части трубы, м<sup>2</sup>.

При числах Рейнольдса в пределах  $10 < Re < 10^4$  коэффициент сопротивления выхода с внезапным сужением зависит не только от отношения площадей  $S_1 / S_2$ , но и от числа Рейнольдса, а в пределах  $Re < 10$  – только от этого числа.

Изменение направления потока (муфтовое закругление)

Особенностью потока на повороте, рис. 1.3, являются вторичные течения, возникающие в поперечном сечении, рис. 1.4, и накладывающиеся на основной поток.

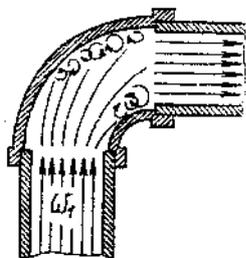


Рис. 1.3. Муфтовое закругление

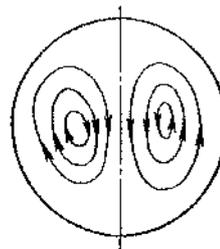


Рис. 1.4. Вторичное движение потока при закруглении

В случае соединения стальных отводов на резьбе и в месте стыка прямого участка с изогнутой частью образуется уступ, приводящий к резкому изменению поперечного сечения в этом месте, что является источником дополнительного сопротивления. Для колен и отводов величину коэффициента сопротивления можно практически считать постоянной при всех значениях числа Рейнольдса ( $Re > 2 \cdot 10^5$ ) и вычислять по формуле

$$\zeta_{м.з.} = \frac{h_{м.з.}}{w_1^2 / 2g}, \quad (1.14)$$

где  $\zeta_{м.з.}$  – коэффициент сопротивления на муфтовом закруглении;  $h_{м.з.}$  – потеря напора на муфтовом закруглении, м;  $w_1$  – средняя скорость потока во входном сечении изогнутого трубопровода, м/с.

При меньших значениях числа  $Re$  его влияние на сопротивление начинает сказываться в тем большей степени, чем меньше  $Re$ . Зависимость эта сложная и в силу малой изученности не поддается пока точному определению.

#### Движение потока через вентиль

Величина коэффициента сопротивления запорных (дроссельных или регулирующих) устройств зависит от их конструкции и конфигурации, внутренних каналов, определяющих прямолинейность потока, постоянства сечения и т. д. Сопротивление каждого типа запорного устройства в значительной степени зависит от положения закрывающего органа. Кроме того, на коэффициент сопротивления сказывается шероховатость отливки корпуса, которая тем больше, чем меньше размер вентиля. Коэффициент сопротивления вентиля существенно зависит от числа Рейнольдса. При этом в области малых значений  $Re$  по мере его возрастания происходит заметное уменьшение  $\zeta_v$ , которое достигает минимума при  $Re = 5 \cdot 10^4$ . Дальнейшее увеличение числа Рейнольдса сопровождается замедленным ростом коэффициента  $\zeta_v$ , а при очень больших коэффициентах сопротивления становится постоянным и независимым от этого числа.

На рис. 1.5 приведена схематическая картина потока в запорном устройстве типа вентиль.

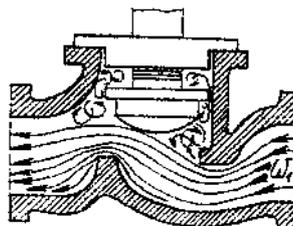


Рис. 1.5. Схема потока жидкости в вентиле

В этом случае коэффициент сопротивления можно определить из формулы

$$\zeta_{\text{в}} = \frac{h_{\text{в}}}{(w_1^2 / 2g)}, \quad (1.15)$$

где  $\zeta_{\text{в}}$  – коэффициент сопротивления вентиля;  $h_{\text{в}}$  – потеря напора при прохождении через вентиль, м;  $w_1$  – средняя скорость потока в трубопроводе перед запорным устройством, м/с.

### Описание установки

Вода из напорного бака 1 центробежным насосом 2 подается через систему различных гидравлических сопротивлений и поступает обратно в бак, рис. 1.6. Бак установлен выше насоса и соединен всасывающим трубопроводом 3 с насосом и снабжен указателем уровня 27.

На установке имеется пять объектов исследования. Жидкость центробежным насосом 2 по нагнетательному трубопроводу 4 подается в трубопровод – участок, где можно исследовать сопротивление внезапного расширения 5, внезапного сужения 6, запорного вентиля 7 и муфтового закругления 8. Затем поток изменяет направление и поступает в прямой участок трубы 9, где можно изучить зависимость коэффициента трения от режима движения. После чего поток по сливному трубопроводу 13 возвращается в напорный бак. Условные проходы трубопроводов с объектами исследования указаны непосредственно на месте.

Изменение скорости движения воды на рабочих участках трубопровода достигается соответствующей регулировкой расхода вентилем 10 на нагнетательном патрубке насоса.

Расход жидкости в системе измеряют с помощью диафрагмы 14, установленной на нагнетательном трубопроводе. Диафрагма соединена с дифференциальным мембранным манометром ДМ-3583-15, который работает в комплекте с вторичным прибором дифтрансформаторной системы типа КСД2-16.

Потери давления (напора) при прохождении потока через расширение, сужение, запорную арматуру, поворот и участок с сопротивлением по длине трубопровода измеряются манометрами 17-23. Температуру воды контролируют термометром 28. Воздух из системы трубопроводов стравливается при помощи спускного крана 12.

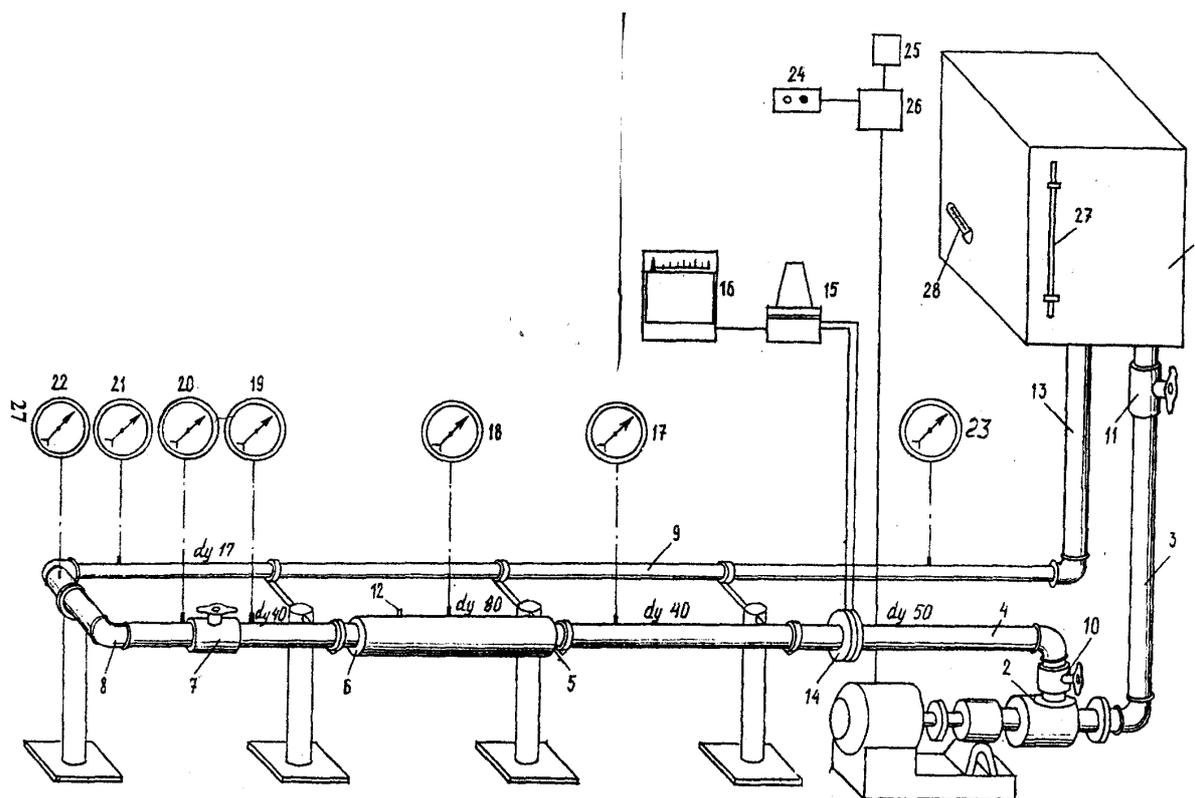


Рис. 1.6. Схема установки:

1 – напорный бак; 2 – центробежный насос; 3 – всасывающий трубопровод; 4 – нагнетательный трубопровод; 5 – внезапное расширение; 6 – внезапное сужение; 7 – запорный вентиль; 8 – муфтовое закругление; 9 – прямой участок; 10, 11 – вентили; 12 – спускной кран; 13 – сливной трубопровод; 14 – диафрагма; 15 – дифференциальный манометр; 16 – показывающий прибор; 17-23 – пружинные манометры; 24 – кнопка пуска; 25 – автоматический выключатель; 26 – магнитный пускатель; 27 – указатель уровня; 28 – термометр.

### Методика проведения работы

Перед пуском установки проверяют заполнение напорного бака 1 с помощью указателя уровня 27. Количество воды в напорном баке должно быть не менее половины его объема; при меньшем количестве необходимо добавить воду. После этого открывают вентиль 11 и кнопкой пуска 24 приводят в действие центробежный насос 2 при закрытом вентиле 10. Вентиль 11 во избежание разрушения насоса от кавитации должен быть полностью открыт во время работы насоса. По показаниям вторичного прибора КСД-2 16, соединенного с дифференциальным манометром 15, подключенного к диафрагме 14 устанавливают первоначально наименьший из требуемых расходов при помощи вентиля 10. Поток направляют через заданные объекты исследования, и потери давления (напора) на соответствующих участках замеряют по показаниям манометров 17 – 23. Затем увеличивают

расход, доводя его до следующего заданного значения, и снова проводят отсчеты показаний манометров. Таким образом, на каждом из участков трубопровода, где установлены местные сопротивления, и на линии с прямым участком трубы в среднем производят 5-7 замеров. Последний замер производят непосредственно при полностью открытом вентиле 10. Все показания манометров заносятся в таблицу 1.1.

### Обработка опытных данных и составление отчета

Среднюю скорость потока в трубопроводе при заданных расходах воды находят по уравнению (1.4).

Коэффициент сопротивления трения  $\lambda$  рассчитывают, пользуясь формулой (1.2), а коэффициенты местных сопротивлений  $\zeta_{м.с.}$  – по формуле (1.3) с учетом формул (1.12-1.15).

Перед вычислением значений критерия Рейнольдса рекомендуется привести общее выражение

$$Re = \frac{wd\rho}{\mu} \quad (1.16)$$

к виду

$$Re = A \frac{V}{\mu}, \quad (1.17)$$

где  $V$  – расход,  $м^3/с$ ;  $\mu$  – вязкость,  $Па \cdot с$ ;  $\rho$  – плотность,  $кг/м^3$ , и найти значение постоянного коэффициента  $A$ .

Для оценки полученных результатов необходимо сопоставить найденные опытным путем значения коэффициентов  $\lambda$  со справочными данными. Эти величины можно найти по вычисленным значениям числа Рейнольдса, пользуясь соответствующими графиками, рис. 1.7.

Чтобы установить шероховатость трубопровода по экспериментально найденным величинам коэффициентов трения  $\lambda$ , следует опытные значения  $\lambda$  в квадратичной области сопротивления подставить в формулу (1.11), откуда вычислить соответствующие значения  $\Delta_{ЭК}/d$  и  $\Delta_{ЭК}$ .

Полученные в результате исследования значения коэффициентов местного сопротивления  $\zeta_{м.с.}$  нанести на графики (обычно в полулогарифмических координатах  $\zeta_{м.с.} - \lg Re$ ) и по графику установить границы квадратичной зоны для данного местного сопротивления, в которой  $\zeta_{м.с.} = const$ .

Необходимо построить зависимость коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  от числа  $Re$  (также в полулогарифмических координатах  $\lambda - \lg Re$ ).

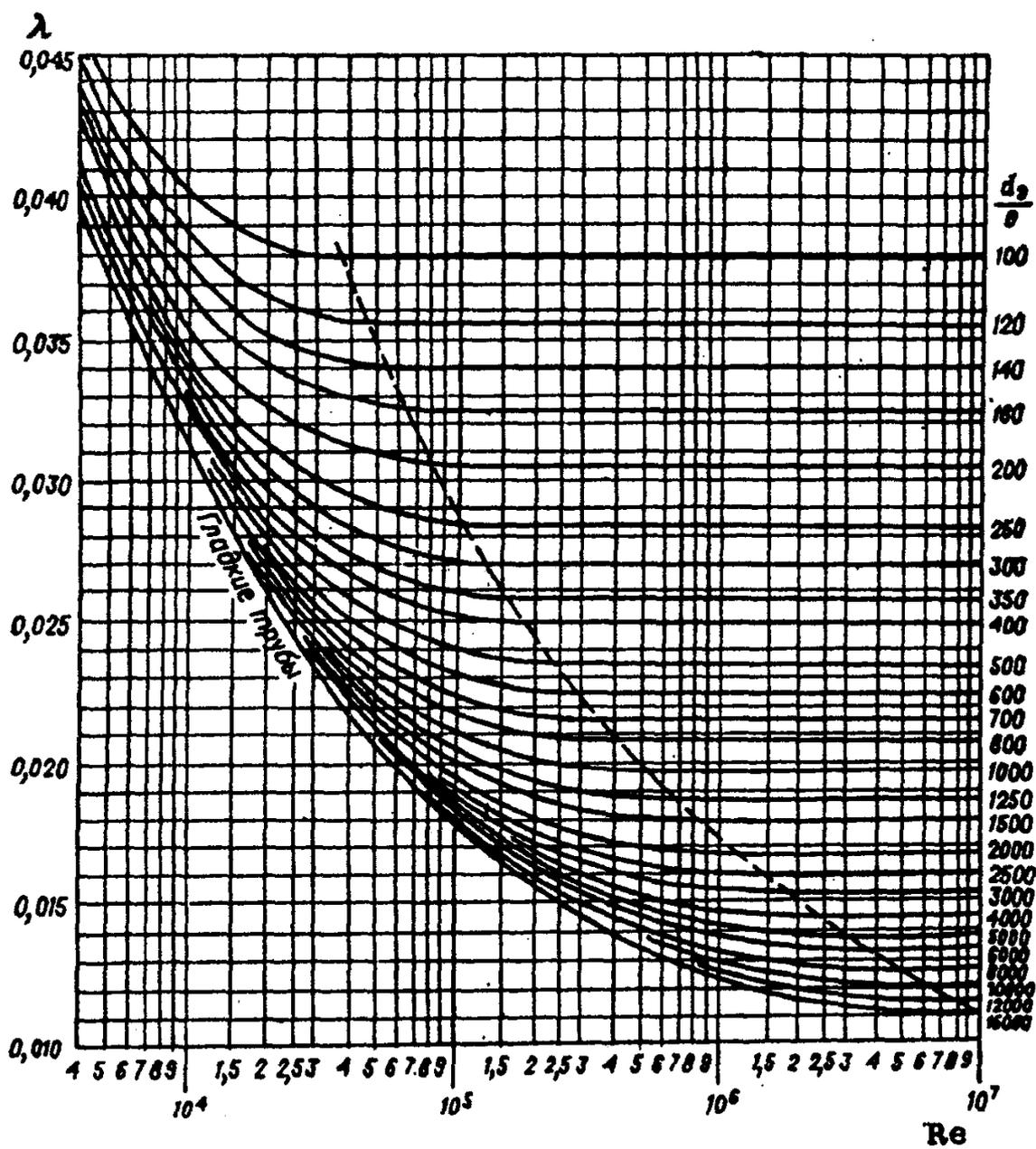


Рис. 1.7. Зависимость коэффициента трения  $\lambda$  от критерия  $Re$  и степени шероховатости  $d / \Delta_{эк}$

Определение полного перепада в системе необходимо вычислить для одного из расходов с учетом всех местных сопротивлений и сопротивления по длине

$$\Delta P = \lambda \left( \frac{l}{d} \right) \left( \frac{\rho w^2}{2} \right) + \sum \zeta_i \left( \frac{\rho w_i^2}{2} \right), \quad (1.18)$$

где  $w$  – скорость воды на прямом участке,  $м/с$ ;  $w_i$  – скорость воды на участке установки  $i$ -го местного сопротивления,  $м/с$ ;  $\sum \zeta_i$  – сумма всех местных сопротивлений (вход и выход жидкости из бака, повороты, диафрагма, вентиль, сужения и расширения).

Мощность двигателя насосной установки ( $N$ , кВт) рассчитать по формуле

$$N = \frac{\Delta P V}{\eta 10^3}, \quad (1.19)$$

где  $\eta = 0,9$  – коэффициент полезного действия насоса.

Расчетные параметры заносятся в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

## Экспериментальные и расчетные данные

№ п/п	Наименование величины	Обозначение и размерность	Опыты					
			1	2	3	4	5	6
1.	Расходы воды	$V, \text{ м}^3/\text{с}$						
2.	Средняя скорость потока в трубах при диаметре: $d_y = 17 \text{ мм}$ $d_y = 40 \text{ мм}$ $d_y = 50 \text{ мм}$ $d_y = 80 \text{ мм}$	$w_{17}, \text{ м/с}$ $w_{40}, \text{ м/с}$ $w_{50}, \text{ м/с}$ $w_{80}, \text{ м/с}$						
3.	Средняя температура воды	$t, \text{ }^\circ\text{C}$						
4.	Вязкость воды	$\mu, \text{ Па} \cdot \text{с}$						
5.	Число Рейнольдса	Re						
6.	Показания манометров	$R_{и17}, \text{ кгс/см}^2$ $R_{и18} \text{ — / —}$ $R_{и19} \text{ — / —}$ $R_{и20} \text{ — / —}$ $R_{и21} \text{ — / —}$ $R_{и22} \text{ — / —}$ $R_{и23} \text{ — / —}$						
7.	Потери напора при внезапном расширении	$h_{в.р.}, \text{ м}$						
8.	Потери напора при внезапном сужении	$h_{в.с.}, \text{ м}$						
9.	Потери напора на вентиле	$h_{в.}, \text{ м}$						
10.	Потери напора на муфтовом закруглении	$h_{м.з.}, \text{ м}$						
11.	Потери напора на прямом участке	$h_{тр.}, \text{ м}$						
12.	Эквивалентная шероховатость	$\Delta_{эк}, \text{ мм}$						
13.	Полный перепад давления в системе	$\Delta P, \text{ Па}$						
14.	Мощность двигателя	$N, \text{ кВт}$						

## Лабораторная работа № 2

### Определение характеристик циклона

2 часа

**Цель работы:** практическое ознакомление с работой установки по пылеулавливанию.

**Задачи работы:**

1. Определение аэродинамического сопротивления циклона.
2. Установление удельных энергозатрат.
3. Определение влияния концентрации пыли на эффективность и аэродинамическое сопротивление циклона.
4. Исследование зависимости степени очистки  $\eta$  от фиктивной скорости газового потока в циклоне;

**Обеспечивающие средства:** лабораторный стенд, состоящий из циклона, вентилятора, дозатора, воздухопроводов, шибера, патрон фильтровальный и пробоотборная трубка; питатель. Контрольно-измерительные приборы – два дифференциальных манометра, мерная диафрагма, аспиратор.

**Задание:** исследовать работу циклона в два этапа: на первом этапе определить гидравлическое сопротивление циклона, на втором этапе – определить степень очистки циклона в зависимости от скорости газового потока при постоянной концентрации твердых частиц в нем и установить эффективность очистки газа от величины удельных энергозатрат (провести на запыленном воздухе при таких же расходах, как и на первом этапе исследований) и определить прирост массы уловленного твердого материала  $\Delta G$ , массовую концентрацию пыли на входе и на выходе ( $C_H$  и  $C_K$ ) и степень очистки  $\eta$ .

**Требования к отчету:** итоги лабораторной работы должны быть представлены на листах формата А4, графики – на миллиметровой бумаге, выполненные в карандаше. Работа выполняется побригадно (4 чел.), каждый студент в бригаде составляет свой собственный отчет. В отчете указывается название института, кафедры, лабораторной работы, фамилия и инициалы студента, название специальности и группы, вида обучения, факультета., а также: цель работы, схема установки, методика проведения работы, основные формулы расчетов с расшифровкой символов, подробные расчеты значений одного из режимов, таблица 2.1 «Экспериментальные данные» и таблица 2.2 «Расчетные данные», график зависимости  $\Delta P_{\text{ц}}$  от скорости воздуха; построить график зависимости  $\eta - \Delta P_{\text{ц}}/\rho$ . Написать выводы по работе и защитить отчет.

**Технология работы:** на первом этапе определяют гидравлическое сопротивление циклона – снимают показания дифманометров при установленном расходе воздуха (на незапыленном воздухе); на втором этапе

определяют степень очистки циклона в зависимости от скорости газового потока при постоянной концентрации твердых частиц в нем и эффективность очистки газа от величины удельных энергозатрат – проводят серию экспериментов на запыленном воздухе при таких же расходах, как и на первом этапе исследования.

### ***Контрольные вопросы***

1. Какие системы в гидромеханике называют неоднородными?
2. В каких технологических процессах механической и химико-механической переработки древесины возможно образование газопылевых потоков?
3. Какие аппараты применяются для улавливания пыли?
4. Как устроен циклон?
5. За счет чего в циклоне возникает центробежная сила?
6. Что такое фактор разделения?
7. Как влияют диаметр циклона и скорость газового потока на его разделяющую способность?
8. Что называется степенью очистки или коэффициентом полезного действия циклона?
9. Как определить концентрацию твердых частиц в газовом потоке на входе и на выходе из циклона?
10. Что понимается под гидравлическим сопротивлением циклона, как оно рассчитывается, какие факторы влияют на его величину?
11. Как рассчитать коэффициент гидравлического сопротивления циклона и как определяются удельные энергозатраты на очистку газа?
12. Указать последовательность действий при выполнении соответствующих этапов работы.
13. Из каких элементов состоит стендовая установка (основные узлы и контрольно-измерительные приборы)?

***Библиографический список*** приведен в конце сборника описаний лабораторных работ.

## Описание лабораторной работы

### Теоретическая часть

Очистка промышленных пылегазовых потоков от взвешенных в них твердых частиц пыли может осуществляться путем осаждения твердых частиц под действием различных сил: тяжести, центробежных, электростатических, акустических и др. Одним из наиболее простых и широко распространенных способов очистки неоднородных пылегазовых систем является центробежное разделение рассматриваемых неоднородных систем. В качестве аппаратов-пылеуловителей, в которых можно осуществить такое разделение, используются циклоны различных конструкций.

Циклоны конструкции НИИОГАЗ типа ЦН-11, ЦН-15, ЦН-24 предназначены для сухой очистки газовых потоков от твердых частиц, выделяющихся в некоторых технологических процессах (например, в процессе сушки сыпучих твердых материалов, обжига, агломерации, сжигания топлива и др.), а также для очистки аспирационно отсасываемого из мест повышенной запыленности воздуха в различных отраслях промышленности.

Их нельзя использовать для улавливания сильно слипающейся пыли, а также в условиях токсичных или взрывоопасных сред.

В зависимости от требований, предъявляемых к очистке газов, циклоны могут иметь самостоятельное применение или использоваться в качестве аппарата первой ступени очистки в сочетании с другими газоочистными аппаратами (например, электрофильтрами, рукавными фильтрами или аппаратами мокрой очистки).

Процесс разделения неоднородных систем *газ–твердые частицы* под действием центробежных сил обуславливается разностью плотности газового потока и твердых частиц, находящихся во вращающемся движении. Центробежные силы, возникающие при этом, обеспечивают большую эффективность процесса по сравнению с процессом разделения, проходящим в поле только сил тяжести. Соотношение этих сил называют фактором разделения:

$$K_p = \frac{G_u}{G_m} = \frac{mw^2 / R}{mg} = \frac{w^2}{Rg}, \quad (2.1)$$

где  $G_u$  – центробежная сила, отбрасывающая твердую частицу из вращающегося газового потока к стенкам циклона, Н;  $G_m$  – сила тяжести, Н;  $m$  – масса твердой частицы, кг;  $w$  – окружная скорость частицы (условно принимается равной скорости газового потока во входном патрубке циклона), м/с;  $R$  – радиус циклона, м;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>.

Из выражения (2.1) следует, что эффективность разделения повышается с увеличением скорости газового потока и уменьшением радиуса циклона. Однако значительное увеличение скорости связано с резким возрастанием гидравлического сопротивления циклона и усиления местных завихрений, срывающих уже осевшие на внутренней поверхности стенки циклона твердые частицы, что приводит к ухудшению очистки газа. Обычно наиболее эффективным являются скорости газа на входе в циклон в интервале 15–25 м/с или в расчете на полное сечение (поперечное сечение) цилиндрической части циклона в интервале 2,5–4,0 м/с.

Работа циклона оценивается по совокупности его основных характеристик:

- эффективности разделения (степени очистки или коэффициента полезного действия);
- аэродинамического сопротивления циклона;
- зависимости эффективности циклона от величины удельных энергозатрат;
- влияния концентрации пыли на эффективность и аэродинамическое сопротивление циклона.

Степень очистки ( $\eta$ , %) можно рассчитать, зная начальную  $C_n$  и конечную  $C_k$  концентрации твердых частиц в газовом потоке, проходящем через циклон:

$$\eta = \frac{C_n - C_k}{C_n} \cdot 100, \% . \quad (2.2)$$

Степень очистки газового потока зависит от размера и плотности твердых частиц, от плотности и вязкости газового потока, от типа циклона и его геометрических размеров и, конечно, от скорости газового потока на входе в циклон.

На рис. 2.1 показана принципиальная схема работы циклона типа ЦН.

Запыленный воздух входит в циклон 1 через тангенциально встроенный патрубок 2 под определенным углом к корпусу циклона и, приобретая вращательное движение, опускается спиралеобразно вниз, вдоль внутренней поверхности стенок цилиндрической и конической частей корпуса аппарата. Вращаясь вначале в кольцевом пространстве, образованном цилиндрической частью корпуса циклона и выхлопной трубой 3, а затем в конической зоне, расположенной ниже торца выхлопной трубы, газовый поток образует внешний вращающийся вихрь. При этом развиваются центробежные силы, под действием которых твердые частицы, находящиеся в газовом потоке и обладающие значительно большей плотностью, чем газ, отбрасываются к стенкам корпуса циклона. Движение твердых частиц по

внутренней поверхности циклона к бункеру 4 обусловлено не только влиянием силы тяжести, но и воздействием силы давления газового потока, направленного вниз. Достигнув нижнего торца конической части корпуса циклона, твердые частицы поступают в бункер. В конической части корпуса циклона газовый поток начинает менять направление и перемещаться вверх к выхлопной трубе, образуя внутренний вращающийся вихрь. Освобожденный от основной массы твердых частиц газовый поток попадает в выхлопную трубу 3 и, поднимаясь по ней винтообразно вверх, удаляется из циклона.

Оптимальное значение скорости газа на входе в аппарат, обеспечивающей высокую степень очистки пылегазового потока, определяют в каждом конкретном случае с учетом свойств разделяемых неоднородных систем (например, фракционного состава твердой фазы, слипаемости твердых частиц и др.) и его аэродинамического сопротивления.

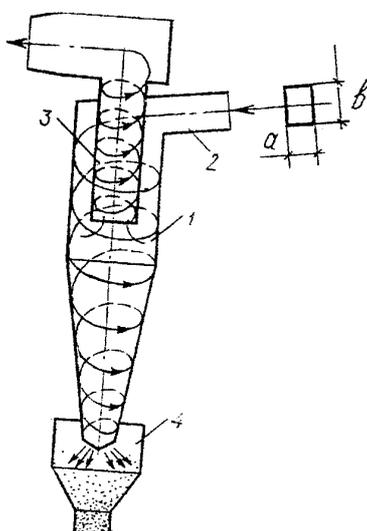


Рис. 2.1. Принципиальная схема действия циклона ЦН:  
1 – корпус циклона; 2 – входной патрубок; 3 – выхлопная труба;  
4 – бункер (сборник уловленных твердых частиц)

Общее аэродинамическое (гидравлическое) сопротивление циклона складывается из потерь на вязкостное трение и на преодоление местных сопротивлений:

$$\Delta P_{\text{ц}} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4, \quad (2.3)$$

где  $\Delta P_1$  – сопротивление входа в осадительное пространство, Па;  $\Delta P_2$  – сопротивление трения слоев газа о стенку аппарата, Па;  $\Delta P_3$  – сопротивление перехода среды из внешней зоны во внутреннюю зону (в выхлопную трубу);

бу) с поворотом на  $180^\circ$ , Па;  $\Delta P_4$  – сопротивление трения слоев газа между собой во внутренней спирали и о стенку выхлопной трубы, Па.

Выражая общее гидравлическое сопротивление через динамический напор во входном патрубке и заменяя суммы частных коэффициентов гидравлических сопротивлений общим коэффициентом гидравлического сопротивления циклона  $\xi_u$ , получим:

$$\Delta P = \xi_u \frac{\rho w_\phi^2}{2}, \quad (2.4)$$

$$w_\phi = \frac{4V}{\pi D^2}, \quad (2.5)$$

где  $\rho$  – плотность газовой среды в рабочих условиях,  $\text{кг/м}^3$ ;  $w_\phi$  – фиктивная скорость газа, отнесенная к полному поперечному сечению цилиндрической части аппарата,  $\text{м/с}$ ;  $V$  – расход газового потока через циклон,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $D$  – диаметр циклона,  $\text{м}$ .

Степень улавливания пыли (твердых частиц) при всех прочих одинаковых условиях зависит от скорости газового потока, следовательно, и от соотношения  $\Delta P_u / \rho$ . При  $\Delta P_u / \rho = 500\text{--}750 \text{ м}^2/\text{с}^2$  обеспечиваются наилучшие условия очистки запыленного газа. Выше этих значений имеет место перерасход энергии при практически постоянной степени очистки  $\eta$ , ниже – степень очистки будет заметно снижаться.

Удельные энергозатраты на очистку газа можно определить из выражения:

$$E' = E / W = N / V = \Delta P_u, \quad (2.6)$$

при условии

$$E = N\tau, \quad (2.7)$$

$$W = V\tau, \quad (2.8)$$

где  $E$  – энергозатраты на очистку газа за время  $\tau$ , Дж;  $N$  – расход мощности на очистку газа, Вт;  $W$  – объем очищенного газа,  $\text{м}^3$ .

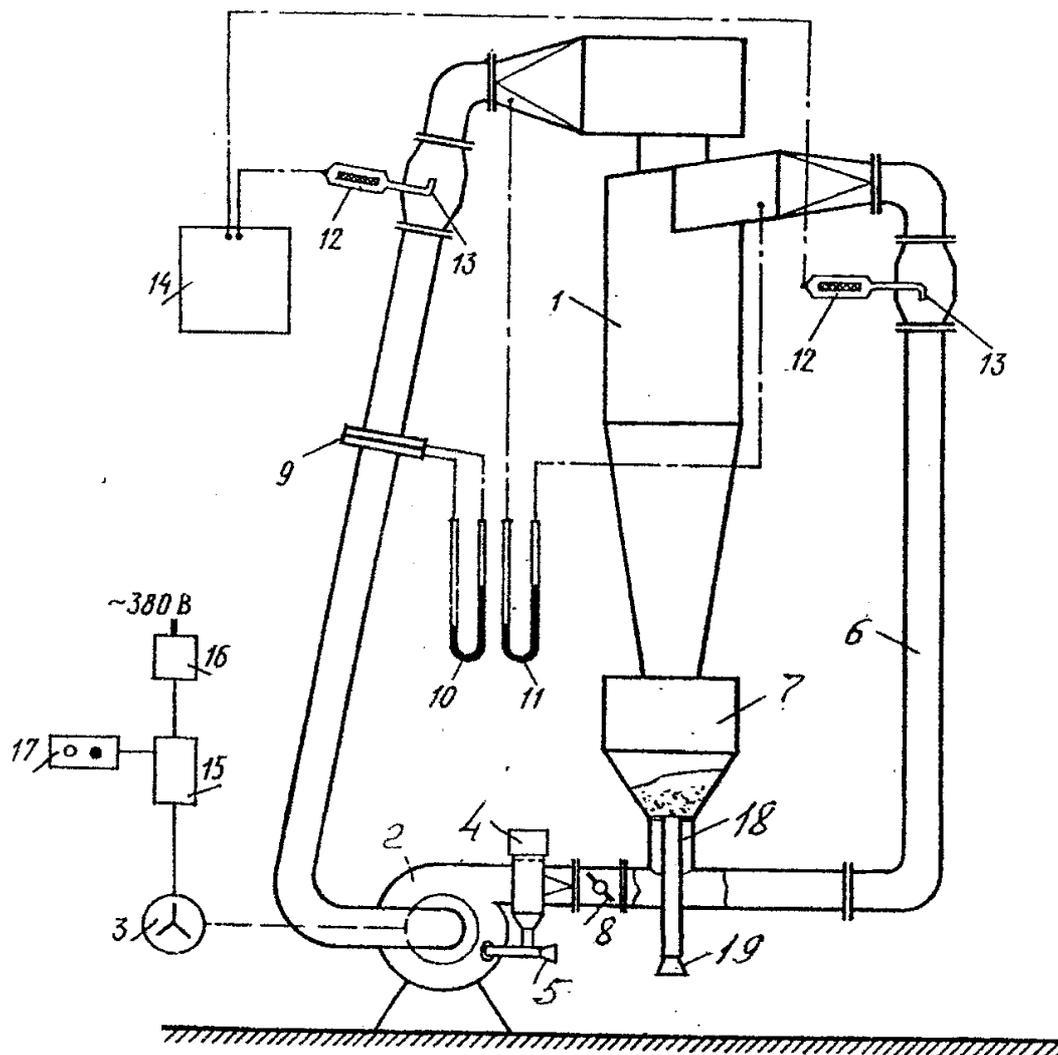


Рис. 2.2. Схема установки:

1 – циклон; 2 – вентилятор; 3 – электродвигатель; 4 – питатель; 5 – дозатор; 6 – воздуховод; 7 – бункер; 8 – шибер; 9 – диафрагма; 10, 11 – дифманометр; 12 – патрон фильтровальный; 13 – пробоотборная трубка; 14 – аспиратор; 15 – автоматический выключатель; 16 – магнитный пускатель; 17 – кнопки управления; 18 – патрубок; 19 – заглушка

### Описание установки

Установка включает в себя циклон 1, рис. 5.2, типа ЦН-15 с внутренним диаметром 400 мм, изготовленный из стали. Для подачи в циклон воздуха служит вентилятор 2 с электродвигателем 3. Твердые частицы из питателя 4 с помощью дозатора 5 поступают в воздуховод 6 и образуют с движущимся в этом воздуховоде запыленный воздушный поток. Уловленные в циклоне твердые частицы собираются в бункере 7. Регулирование расхода газа через циклон производится посредством шибера 8, величина расхода газа измеряется диафрагмой 9, работающей в комплексе с дифма-

нометром *10*. Гидравлическое сопротивление циклона измеряется дифманометром *11*, соединенным шлангами со штуцером для замера давления на входе и выходе из циклона. Определение концентрации пыли в воздушном потоке на входе и выходе из циклона осуществляется по величине привеса фильтровальных патронов (алонжей) *12*, установленных на пробоотборных трубках *13* и соединенных с аспиратором *14*. Погруженные внутрь воздухопроводов Г-образные части пробоотборных трубок выполнены поворотными, чтобы избежать попадания пыли в пробоотборные трубки при отсутствии измерений. Запыленный воздух, проходя через фильтровальный патрон с набивкой из фильтроткани и защитной сеткой, оставляет на них содержащиеся в потоке твердые частицы пыли. Зная скорость прохождения воздуха и время его прохождения, определяют объем воздуха, прошедшего через фильтровальный патрон. При отборе запыленного воздуха должен соблюдаться принцип изокинетичности – равенства скоростей потока в пробоотборной трубке и в месте отбора пробы в воздуховоде.

На лицевой панели щита управления смонтирован автоматический выключатель *15* электрического питания установки с магнитным пускателем *16* и кнопками управления *17* электродвигателя вентилятора. Патрубок *18* с заглушкой *19* служит для удаления твердых частиц из бункера.

### **Методика проведения работы**

Исследование работы циклона проводят в два этапа. На первом этапе определяют гидравлическое сопротивление циклона в зависимости от скорости газового потока. На втором – степень очистки циклона в зависимости от скорости газового потока при постоянной концентрации твердых частиц в нем, а также эффективность очистки газа от величины удельных энергозатрат.

В первой части работы исследования проводят после удаления твердых частиц через патрубок *18* с помощью заглушки *19*, т. е. на незапыленном воздухе. Включают вентилятор *2* с помощью магнитного пускателя *16*, кнопки управления *17* и устанавливают шибером *8* минимальный расход воздуха. Показания дифманометров *10* и *11* снимаются при установленном расходе воздуха одновременно по команде «отсчет» и заносятся в отчетную таблицу 5.1.

Во второй части работы исследования проводят на запыленном воздухе при таких же расходах воздуха, как и на первом этапе исследований, при этом патрубок должен быть закрыт заглушкой. В качестве твердой фазы для создания запыленного потока воздуха используется твердый сыпучий материал – кварцевый песок со средним размером частиц *25 мкм*. Перед началом второго этапа взвешивают на аналитических весах с точностью до *1 мг* фильтрующие элементы патронов и заносят в таблицу 2.1.

После чего их устанавливают в фильтровальные патроны 12, которые присоединяют к пробоотборным трубкам 13 и ставят в рабочее положение.

Аналогично, как и на первом этапе, включают вентилятор 2 и с помощью шибера 8 устанавливают первый заданный перепад давления на дифманометре 11.

Включают aspirator 14, переместив движок тумблера 1, рис. 2.3, в положение «сеть», и открывают вентили 3, регулирующие скорость прохождения воздуха. Путем вращения ручек вентиляей устанавливают необходимую скорость прохождения воздуха через ротаметры 4. Затем открывают дозатор 5 и подают кварцевый песок из питателя 4 в улиткообразный канал вентилятора, фиксируют время отбора проб. Следят, чтобы в питателе на время отбора проб находился песок, и при необходимости его добавляют. Отбор проб через алонжи производят в течение 5 мин, после чего тумблером 1 aspirator отключают, вентили 3 закрывают, отключают питание электродвигателя вентилятора. Далее снимают алонжи, осторожно вынимают фильтрующие элементы с навесками пыли, собирают твердые частицы находящиеся в фильтровальном патроне и взвешивают на аналитических весах.

После этого приступают к подготовке установки для проведения очередного опыта с установкой следующей серии фильтровальных патронов. Исследования проводят при 5–6 значениях расхода воздуха в той же последовательности. Полученные данные в каждом опыте заносятся в таблицу 2.1.

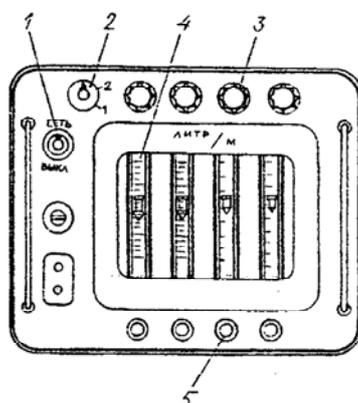


Рис. 2.3. Передняя панель аспиратора 14 (к рис. 2.2):

- 1 – тумблер включения и выключения аппарата;
- 2 – разгрузочный клапан;
- 3 – ручка вентиля ротаметра;
- 4 – ротаметр;
- 5 – штуцер для подсоединения к фильтрам

### Обработка опытных данных и составление отчета

По экспериментальным данным отчетной таблицы 2.1 для каждого опыта:

1. Определяют расход воздуха ( $V$ , м<sup>3</sup>/с) по градуировочному графику дифманометра  $10$  и заносят в таблицу 2.2.

2. Рассчитывают скорость газового потока во входном патрубке циклона по уравнению

$$w_{ex} = \frac{V}{a \cdot b}, \quad (2.8)$$

где  $a \cdot b = 0,1 \cdot 0,185 = 1,85 \cdot 10^{-2}$  м<sup>2</sup>, а фиктивную скорость – по уравнению (2.5) и также заносят в таблицу 2.2.

3. Рассчитывают соответствующие коэффициенты гидравлических сопротивлений  $\xi_u$  и  $\xi_u'$  по уравнению (2.4) и уравнению

$$\Delta P_u = \xi_u' \frac{\rho w_{ex}^2}{2}, \quad (2.9)$$

где  $\rho = \frac{M}{22,4} \cdot \frac{273}{273 + t}$ , кг/м<sup>3</sup> ( $M_g = 29$  кг/кмоль – молекулярная масса воздуха;

$t_g$  – температура воздуха, °С).

4. Рассчитывают величину  $\Delta P_u / \rho$ .

5. Определяют прирост массы уловленного твердого материала,  $\Delta G$ , кг, по выражениям:

$$\text{на входе в циклон} \quad \Delta G_1 = G_{1k} - G_{1н}, \quad (2.10)$$

$$\text{на выходе из циклона} \quad \Delta G_2 = G_{2к} - G_{2н}, \quad (2.11)$$

где  $G_{1н}$ ,  $G_{2н}$  – вес фильтровальных элементов без пыли, соответственно, на входе и на выходе, кг;  $G_{1к}$ ,  $G_{2к}$  – вес фильтровальных элементов с пылью, соответственно, на входе и на выходе, кг;

6. Определяют массовую концентрацию пыли в воздушном потоке на входе  $C_n$  и на выходе  $C_k$ , соответственно:

$$C_n = \frac{\Delta G_1}{KV\tau_{OT}} \quad (2.12)$$

и

$$C_k = \frac{\Delta G_2}{KV\tau_{OT}}, \quad (2.13)$$

где  $V$  – расход воздуха через алонж, л/мин;  $\tau_{OT}$  – время отбора пыли, с;  $K$  – переводной коэффициент ( $K = 16,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ).

7. Рассчитывают и определяют степень очистки  $\eta$  по уравнению (2.2), фактор разделения – по уравнению (2.1).

8. Рассчитывают удельные энергозатраты на очистку газа по уравнениям (2.6), (2.7) и (2.8).

9. Строят график зависимости  $\Delta P_u$  от скорости воздуха ( $\Delta P_u - w_\phi$ ) или ( $\Delta P_u - w_{ex}$ ).

10. Строят график зависимости  $\eta - \Delta P / \rho$  (из графика определяют оптимальную скорость воздушного потока, соответствующую высокой степени очистки при малом гидравлическом сопротивлении циклона).





## Лабораторная работа № 3

### Исследование процесса разделения суспензий фильтрованием

2 часа

**Цель работы:** ознакомление с устройством и принципом работы фильтра периодического действия.

**Задачи работы:**

1. Построение кривой фильтрования и определение максимальной производительности фильтра.
2. Определение констант фильтрования на лабораторном фильтре.
3. Расчет времени промывки осадка.

**Обеспечивающие средства:** лабораторный стенд, состоящий из бака с центробежным насосом; фильтра с фильтровальной перегородкой, системы трубопроводов. Контрольно-измерительные приборы – манометр, мерный сосуд со шкалой.

**Задание:** исследовать работу фильтра в два этапа; на первом этапе – при определенном перепаде давления  $\Delta p$  фильтровальной перегородке производится отсчет времени и количество собранного фильтрата. На втором этапе – при ( $\Delta P = const$ ) провести серию опытов.

**Требования к отчету:** итоги лабораторной работы должны быть представлены на листах формата А4, графики – на миллиметровой бумаге, выполненные в карандаше. Работа выполняется побригадно (4 чел.), каждый студент в бригаде составляет свой собственный отчет. В отчете указывается название института, кафедры, лабораторной работы, фамилия и инициалы студента, название специальности и группы, вида обучения, факультета, а также: цель работы, схема установки, методика проведения работы, основные формулы расчетов с расшифровкой символов, подробные расчеты значений одного из режимов; результаты замеров заносят в таблицу 3.1. «Экспериментальные данные», а результаты расчетов в таблицу 3.2 «Расчетные данные», график зависимости « $\frac{\Delta \tau}{\Delta V}$  от  $V$ » и « $V$  от  $\tau$ ». Написать выводы по работе и защитить отчет.

**Технология работы:** исследовать работу фильтра в два этапа; на первом этапе – при определенном перепаде давления  $\Delta p$  фильтровальной перегородке производится отсчет времени и количество собранного фильтрата. В результате необходимо построить кривую фильтрования и определить максимальную производительность фильтра. На втором этапе – при ( $\Delta P = const$ ) провести серию опытов и построить зависимость  $\frac{\Delta \tau}{\Delta V}$  от  $V$ , определить константы фильтрования  $K$  и  $C$  в уравнении процесса фильтрования.

***Контрольные вопросы***

1. Что называется процессом фильтрования?
2. Движущая сила процесса фильтрования. Какими способами она может быть создана?
3. Какие применяют фильтрующие перегородки и чем обусловлен их выбор?
4. Как определяется скорость фильтрования?
5. Из чего складывается сопротивление фильтрованию?
6. Константы фильтрования и их определение.
7. Как определяется максимальная производительность фильтра?

***Библиографический список*** приведен в конце сборника.

## Описание лабораторной работы

### Теоретическая часть

Процесс разделения неоднородных систем с твердой дисперсной фазой пористыми перегородками, способными пропускать жидкость или газ и задерживать частицы твердой фазы; называется фильтрованием.

Фильтрование широко используется в различных отраслях промышленности. В целлюлозно-бумажной промышленности его применяют для сгущения целлюлозной и бумажной массы, осветления оборотной воды и т.д. В лесохимической промышленности фильтрование служит для получения канифольных продуктов, производства камфары, витаминной муки, биологически активных веществ из сульфатного мыла и др.

Для инженерных расчетов промышленной фильтровальной аппаратуры необходимо знать так называемые константы фильтрования, характеризующие гидравлическое сопротивление осадка и фильтрующей перегородки. Так как при фильтрации жидкость должна преодолеть гидравлическое сопротивление перегородки и слоя осадка, толщина которого увеличивается в процессе фильтрации, то скорость фильтрации непостоянна во времени. Скорость фильтрации зависит от ряда факторов:

- движущая сила процесса фильтрации, т. е. разность давлений на перегородке;
- толщина слоя осадка на фильтре;
- структура фильтрующей перегородки;
- структура осадка;
- вязкость фильтрата.

Рассматривая параметры влияющие, на процесс фильтрования, уравнение фильтрования обычно записывается в виде:

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta P}{R} \quad (3.1)$$

где  $dV$  – объем фильтрата, проходящего через  $1 \text{ м}^2$  поверхности фильтра,  $\frac{\text{м}^3}{\text{м}^2}$ ;  $\tau$  – продолжительность процесса, с;  $\Delta P$  – движущая сила процесса фильтрования, Па;  $R$  – сопротивление фильтрования,  $\text{Па} \cdot \frac{\text{с}}{\text{м}}$ .

Сопротивление фильтрования складывается из сопротивления осадка  $R_{OC}$  и сопротивления фильтрующей перегородки  $R_{Ф.П.}$ , т. е.

$$R = R_{OC} + R_{Ф.П.}$$

Так как сопротивление осадка пропорционально количеству отложившегося осадка, а, следовательно, пропорционально количеству фильтрата, то

$$R_{OC} = K' \cdot V$$

Сопротивление фильтрующей перегородки можно заменить сопротивлением слоя осадка, оказывающего такое же сопротивление процессу фильтрования, какое оказывает перегородка, и выразить соответствующим количеством фильтрата  $C$ ,  $\frac{M^3}{M^2}$ , т. е.

$$R_{\phi.п.} = K' \cdot C,$$

где  $K'$  – коэффициент пропорциональности.

Тогда

$$R = K' \cdot (V + C) \quad (3.2)$$

Подставив полученное значение  $R$  в уравнение (3.1), разделив переменные и проинтегрировав, после небольших преобразований получим уравнение фильтрования Румса

$$V^2 + 2 \cdot V \cdot C = K \cdot \tau, \quad (3.3)$$

где  $K$  и  $C$  называют константами фильтрования.

Константы фильтрования определяют экспериментально по разделению исследуемой суспензии на фильтре при постоянном давлении  $\Delta P$ .

В уравнении фильтрования (3.3) константа  $K$  определяется как

$$K = \frac{2 \cdot \Delta P}{K'} = \frac{2 \cdot \Delta P}{\mu \cdot r_0 \cdot x_0}, \quad (3.4)$$

где  $\mu$  – вязкость фильтрата,  $Па \cdot с$ ;  $r_0$  — удельное объемное сопротивление осадка,  $м^{-2}$ , характеризующее сопротивление, оказываемое потоку жидкой фазы слоем осадка толщиной 1 м;  $x_0$  – коэффициент пропорциональности (концентрация суспензии), равный отношению объема осадка к объему фильтрата.

Константа фильтрования  $C$  определяется как

$$C = \frac{R_{\phi.п.}}{r_0 \cdot x_0} \quad (3.5)$$

Если известны константы фильтрования  $K$  и  $C$  в уравнении (3.3), то можно рассчитать удельную производительность фильтра и далее определить необходимую поверхность фильтрования при заданной производительности фильтра, а также время промывки осадка, что очень важно для проектирования фильтрованной аппаратуры.

После дифференцирования уравнения (3.3) по  $V$  и замены первой производной отношением конечных разностей получим

$$\frac{d\tau}{dV} = \frac{2}{K} \cdot V + \frac{2}{K} \cdot C$$

или

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta V} = \frac{2}{K} \cdot V + \frac{2}{K} \cdot C \quad (3.6)$$

В уравнении (3.6)  $\Delta\tau$  и  $\Delta V$  представляют собой приращение времени фильтрования и объема полученного фильтрата. Это уравнение выражает линейную зависимость между  $\frac{\Delta\tau}{\Delta V}$  и  $V$ .

Построим прямую по результатам проведенных опытов, рис. 3.1, можно определить

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2}{K},$$

а отсюда значение  $K$ .

Отрезок  $B$  на оси ординат равен  $\frac{2 \cdot C}{K}$ , откуда получаем значение  $C$ .

Константа  $K$  характеризует режим процесса фильтрования (при  $\Delta P = \text{const}$ ), а также физические свойства осадка и жидкости, а константа  $C$  – гидравлическое сопротивление фильтрующей перегородки.

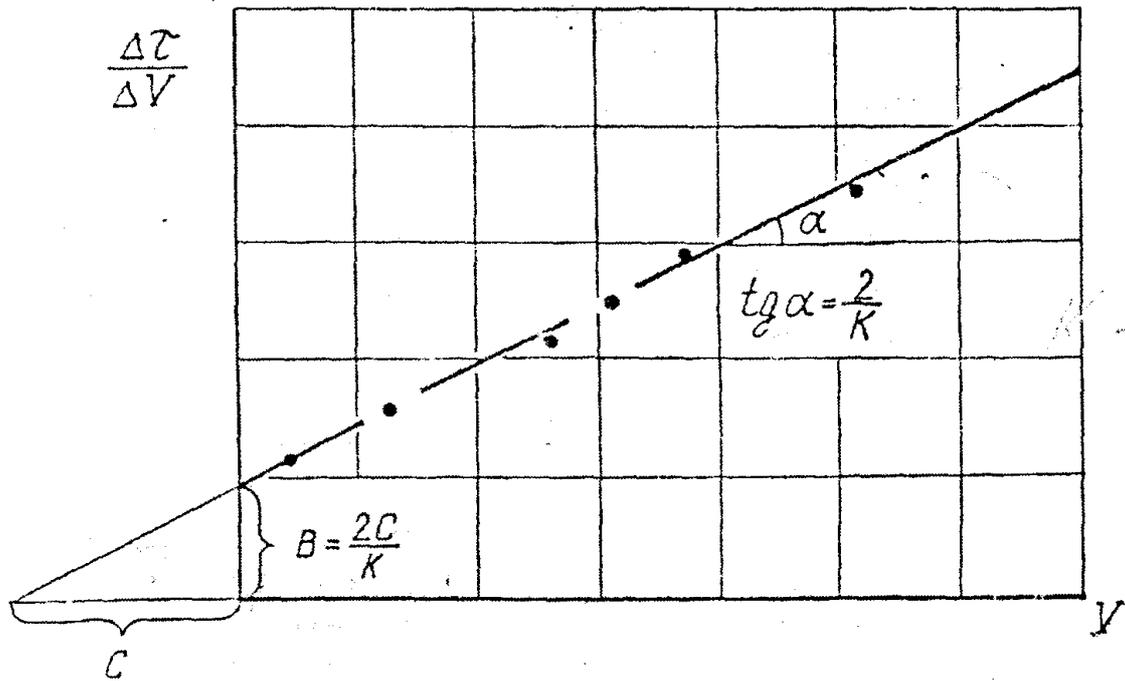


Рис. 3.1. Экспериментальная зависимость для определения констант фильтрования

Константы фильтрования могут быть определены и аналитически. Аналитическое определение констант фильтрования заключается в решении системы двух уравнений

$$V_1^2 + 2 \cdot V_1 \cdot C = K \cdot \tau_1,$$

$$V_2^2 + 2 \cdot V_2 \cdot C = K \cdot \tau_2. \quad (3.7)$$

Во время промывки осадка количество твердой грязи постоянно и, если осадок не сжимается, то и сопротивление его остается так же неизменным. Тогда скорость промывки будет равна скорости фильтрования в конечный момент и

$$\frac{dV}{d\tau} = const$$

в уравнении (3.1) производную можно заменить отношением постоянных величин  $\frac{V_{пр}}{\tau_{пр}}$ .

Таким образом,

$$\frac{V_{\text{ПР}}}{\tau_{\text{ПР}}} = \frac{K'}{2 \cdot (V + C)}.$$

Откуда

$$\tau_{\text{ПР}} = \frac{2 \cdot V_{\text{ПР}} \cdot (V + C)}{K},$$

где  $\tau$  – время промывки, с;  $V$  – объем промывной жидкости на  $1 \text{ м}^3$  фильтра,  $\frac{\text{м}^3}{\text{м}^2}$ .

Уравнение (3.8) справедливо, если, вязкость промывной жидкости равна, вязкости фильтрата и если промывная жидкость проходит через фильтр тем же путем, что и фильтрат, и образовавшийся осадок не сжимается.

### Описание установки

Установка для исследования процесса фильтрования, рис. 3.2, состоит из друк-фильтра 1 с фильтровальной перегородкой 2, поверхность фильтрования которого составляет  $F = 3,14 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ . Создание движущей силы процесса фильтрования обеспечивается центробежным насосом 3. Бак 4 содержит исходную суспензию хвойной небеленой целлюлозы. Корпус фильтра соединен трубопроводом 5 с мерным сосудом 6. Верхняя часть мерного сосуда сообщается с атмосферой, а нижняя, посредством трубопровода 7, с баком исходной суспензия. Бак снабжен водомерным стеклом 8 и специальной насадкой 9, предназначенной для эффективного перемешивания исходной суспензии. Люк 10 на крышке фильтра служит для загрузки исходной суспензии. Корпус фильтра разборный и состоит из двух перфорированных дисков (решеток) 11, между которыми помещен фильтрующий материал 12. Отдельные элементы установки соединены между собой системой трубопроводов 13÷19, вентилями 27,28 и пробковыми кранами 20÷26,29. Манометр 30 предназначен для измерения давления на фильтровальном элементе. Отбор пробы производится через кран 29. В лабораторном фильтре решетка 11 и фильтрующий элемент 12 выполнены съемными, легко заменяемыми. Пульт управления включает в себя магнитный пускатель 31, автоматический выключатель 32 и кнопки управления 33.

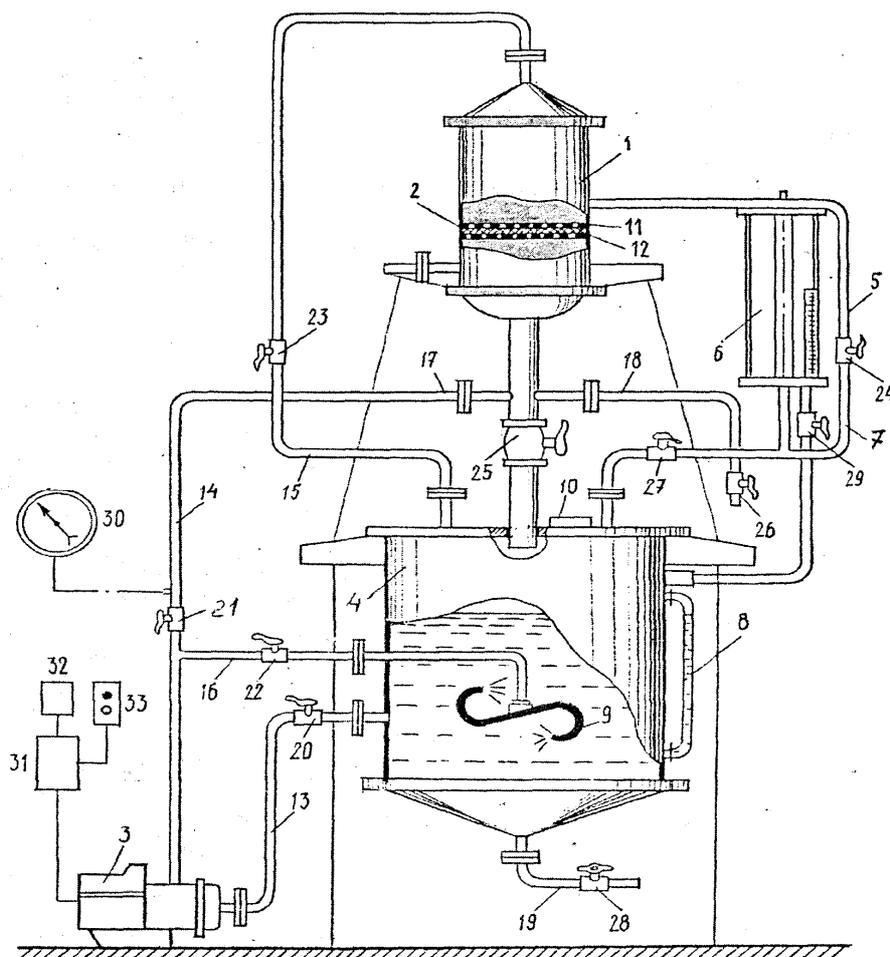


Рис. 3.2. Схема установки:

1 – корпус фильтра; 2 – фильтровальная перегородка; 3 – центробежный насос; 4 – бак; 5, 7, 13÷19 – трубопроводы; 6 – мерный сосуд; 8 – водомерное стекло; 9 – насадка; 10 – люк; 11 – решетка; 12 – фильтровальный элемент; 20÷26, 29 – пробковый кран; 27, 28 – вентиль; 30 – манометр; 31 – магнитный пускатель; 32 – автоматический выключатель; 33 – кнопки управления

## Методика проведения работы

Приготавливают суспензию (или используют готовую суспензию промышленной небеленой целлюлозы) и заливают в бак 4 через загрузочный люк 10. Суспензию готовят с концентрацией твердой фазы  $0,1 \div 0,2\%$  массовых единиц (по указанию преподавателя). Если пользуются готовой суспензией, перед началом работы необходимо определить концентрацию твердой фазы весовым методом.

В режиме подготовки суспензия посредством насоса 3 многократно перекачивается по контуру: линия 13 – насос 3 – напорный трубопровод 14 – фильтр 1 – линия 15 – бак исходной суспензии 4. При этом часть исходной суспензии по линии 16 может возвращаться в нижнюю часть бака 4 через специальную насадку 9.

Перед началом работы проверяют готовность установки к пуску. Пробковые I краны 24, 25, 26, 27 должны быть закрыты. Пробковые краны 21 и 23 находятся в открытом положении. После чего открывают пробковый кран 20, включают центробежный насос 3. С помощью кранов 21, 22 и 23 устанавливают требуемое давление суспензии на фильтровальном элементе – по манометру 30 в пределах  $1-1,5 \text{ кгс/см}^2$ . В ходе этой операции осадок на фильтровальном элементе не образуется, т. к. на ней отсутствует перепад давления. В течение 5-10 минут после включения насоса за счет циркуляционного перемешивания обеспечивается равномерное распределение твердой фазы суспензии и установка может считаться готовой к проведению экспериментов.

*Первый этап* проводится с целью построения кривой фильтрования и определения максимальной производительности фильтра. При этом прикрывается пробковый кран 23 с одновременным открытием крана 24 приемника фильтрата. Регулированием крана 22 корректируется давление на фильтровальной перегородке 2. При появлении в мерном; сосуде 6 первых капель жидкости включается секундомер и производится отсчет времени и количество собранного фильтрата. Все замеры времени и объема фильтрата производят, не выключая секундомера и считая их от начального процесса фильтрования. Результаты замеров заносят в таблицу 3.1.

После окончания опыта отмечают давление в конце процесса фильтрования, открывают вентиль 27 и сливают фильтрат в бак с исходной суспензией. Затем закрывают краны 24, вентиль 27 и открывают краны 23 и 25. В результате обеспечивается циркуляция суспензии и смыв с поверхности фильтра образовавшегося слоя осадка

*Второй этап:* Определение констант фильтрования на лабораторном фильтре проведения минимально двух опытов.

Так как в установке, как и в большинстве промышленных фильтров, суспензия подается на фильтр центробежным насосом, характеристика которого не обеспечивает строгого соблюдения  $\Delta P = const$  в ходе процесса,

поэтому при определении констант фильтрования давления суспензии, поступающей на фильтр, изменяется ступенчато дважды, но в пределах каждой ступени оно поддерживается постоянным. Давления  $\Delta P_1$  и  $\Delta P_2$  могут соответствовать начальному и конечному давлению предыдущего опыта или задаваться.

Опыт в пределах каждой ступени проводится согласно вышеприведенной методике. Однако здесь, в отличие от первого этапа, в ходе процесса давление на фильтре должно поддерживаться постоянным, что достигается регулированием крана 22.

Полученные результаты замеров объемов фильтрата  $V$  и соответствующие им интервалы времени  $\tau$  заносятся в таблицу 3.2. Для установления соотношения между массой осадка и объемом полученного фильтрата

$$x = \frac{m_{OC}}{V}$$

отбирают 300÷500 мл исходной суспензии, которая отфильтровывается на фильтровальной воронке, где фильтрующим материалом должен служить тот же материал, что и в лабораторной установке. Объем фильтрата измеряется мерным цилиндром, а масса твердого осадка ( $m_{OC}$ ) определяется весовым методом.

Учитывая, что фильтрующий материал обеспечивает практически полное разделение суспензии величину  $x$  в первом приближении можно оценить по значению начальной концентрации суспензии. Если концентрация исходной суспензии составляет  $c$ ,  $\frac{кг\ тв}{кг\ ж}$ , то

$$x = \rho_{\phi} \cdot c,$$

где  $\rho_{\phi}$  – плотность фильтрата,  $кг/м^3$ .

После окончания опытов следует слить суспензию из корпуса фильтра 1, а фильтрат из мерного сосуда в исходный бак, для чего открыть краны 25 и 27.

### Обработка опытных данных

Для нахождения максимальной производительности фильтра  $V_{MAX}$  (первый опыт) то экспериментальным данным отчетной таблицы строят график (рис. 3.3), откладывая по оси абсцисс время процесса фильтрования от  $\tau_1$  до  $\tau_2$ , а по оси ординат объем фильтрата, полученного с  $1 м^2$  по-

верхности фильтрования от  $V_1$  до  $V_2$ . Затем, на оси абсцисс, слева от начала координат, откладывается значение времени процесса фильтрования  $\tau$ , отмечается точка  $A$ , и через эту точку проводится касательная к кривой фильтрования. В точке касания (т.  $M$ ) определяют максимальную производительность фильтра  $V_{MAX}$  по уравнению

$$V_{MAX} = V_{ОПТ} \cdot F,$$

где  $V_{ОПТ}$  оптимальная удельная производительность фильтра,  $\frac{M^3}{M^2}$ .

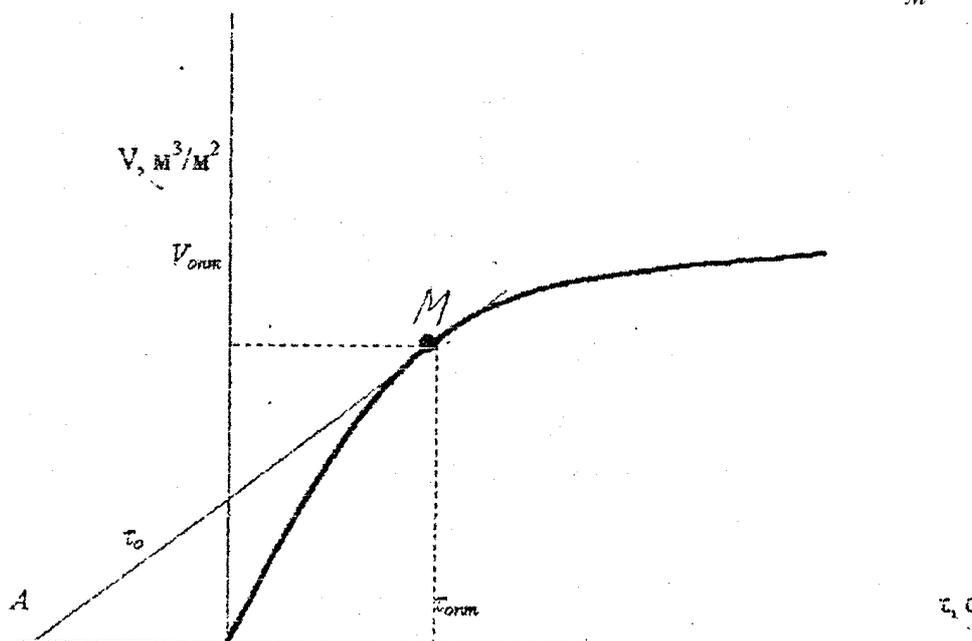


Рис. 3.3. График зависимости для определения оптимальной производительности фильтра

Опустив перпендикуляр из точки  $M$  на ось абсцисс, определяют оптимальную продолжительность процесса фильтрования  $\tau_{ОПТ}$ .

Скорость в конце процесса фильтрования  $w_{\phi}$  определяется тангенсом угла наклона касательной  $AM$  к оси абсцисс.

Количество полученного осадка, соответствующего максимальной производительности, находим по уравнению:

$$m_{OC} = V_{MAX} \cdot x,$$

а количество суспензии, прошедшей через фильтр,

$$m_C = m_{OC} + m_\phi = V_{MAX} \cdot (x + \rho_\phi).$$

Для определения констант процесса фильтрования  $K$  и  $C$  в течении каждого опыта ( $\Delta P = const$ ) отмечают несколько значений объемов полученного фильтрата  $V_1, V_2, V_3$  и продолжительности фильтрования  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  определяют приращение объемов фильтрата

$$\Delta V_1 = V_1; \quad \Delta V_2 = V_2 - V_1; \quad \Delta V_3 = V_3 - V_2, \dots$$

и приращение продолжительности фильтрования

$$\Delta \tau_1 = \tau_1; \quad \Delta \tau_2 = \tau_2 - \tau_1; \quad \Delta \tau_3 = \tau_3 - \tau_2,$$

после чего вычисляют отношения  $\frac{\Delta \tau}{\Delta V}$  для всех опытов и строят график согласно рис. 3.1. Полученные точки соединяют прямыми линиями, каждая из которых отвечает своему перепаду давлений на фильтровальной перегородке. Линии продолжают до пересечения с осью ординат и находят отрезки  $B_1$  и  $B_2$ . По найденным значениям отрезков для каждой ступени опыта вычисляют константы фильтрования  $K$  и  $C$ . Затем проводят усреднение значений констант фильтрования

$$K_{CP} = \frac{(K_1 + K_2)}{2},$$

$$C_{CP} = \frac{(C_1 + C_2)}{2}.$$

Кроме того, эти константы рассчитывают, решая систему уравнений (3.7). Сравнивают полученные графически и аналитически значения констант фильтрования.

Далее рассчитывают время процесса фильтрования  $\tau$  по уравнению (3.3) и время промывки осадка по уравнению (3.8) при заданной преподавателем производительности.

Таблица 3.1

## Экспериментальные данные

№ опыта	Время замера, $\tau, c$		Высота жидкости в мерном цилиндре, $h, m$		Движущая сила про- цесса, $\Delta P, Pa$	
	Первый этап	Второй этап	Первый этап	Второй этап	1 этап	2 этап
1						
2						
....						

Таблица 3.2

## Расчетные данные

№ опыта	Объем фильтрата		Прираще- ние объема, $\Delta V, \frac{m^3}{m^2}$	Прираще- ние времени, $\Delta \tau, c$	$\frac{\Delta \tau}{\Delta V}$	Константы фильтрования	
	$V, m^3$	$\frac{V}{m^2}$				$K$	$C$
Первый этап, $\Delta P_1 = const$							
1							
2							
...							
Второй этап, $\Delta P_2 = const$							
1							
2							
...							

## Лабораторная работа № 4

### Определение характеристик центробежного насоса.

#### Работа центробежного насоса на сеть

2 часа

**Цель работы:** практическое ознакомление с насосной установкой; определение по экспериментальным данным зависимостей  $V - H$ ,  $V - N$ ,  $V - \eta$ ,  $V - H_c$  и параметров рабочей точки.

**Задачи работы:**

1. Умение определять энергетические характеристики насоса ( $H$ ,  $N$ ,  $\eta$ ).
2. Приобретение навыков построения характеристик сети ( $V - H_c$ ) и графика работы насоса на сеть ( $V - N$ ,  $V - \eta$ ,  $V - \Delta P$ ).

**Обеспечивающие средства:** стенд насосной установки включает – центробежный насос; ЛАТР для изменения частоты вращения насоса; расходный бак; всасывающий и нагнетательный трубопроводы; задвижка для регулирования расхода воды. Контрольно-измерительные приборы – стробоскопический тахометр, для определения частоты вращения насоса; мерная диафрагма с дифференциальным манометром; ртутный дифференциальный манометр; манометр, вакууметр; амперметр переменного тока; вольтметр переменного напряжения.

**Задание:**

1. Получить экспериментальные характеристики центробежного насоса ( $V - N$ ,  $V - \eta$ ,  $V - H$ ), проводя первую серию опытов при постоянном числе оборотов насоса  $n$ , но при разных расходах воды;
2. Определить характеристики сети ( $V - H_c$ ), проводя вторую серию опытов при постоянном открытии задвижки, но при разных числах оборотов насоса;
3. Построить две характеристики сети ( $V - H_c$ ) и график работы насоса ( $V - H$ ,  $V - N$ ,  $V - \eta$ );
4. Определить параметры рабочих точек и параметры экономичной работы насосной установки.

**Требования к отчету:** итоги лабораторной работы представить в виде таблицы 4.1. «Характеристика насоса при постоянном числе оборотов»; таблицы 4.2. «Характеристики сети при постоянном открытии задвижки»; совмещенного графика характеристики насоса и сети.

**Технология работы:** на первом этапе определяют величины для построения экспериментальных характеристик центробежного насоса ( $V - H$ ,  $V - N$ ,  $V - \eta$ ). На втором этапе определяют величины для сети.

**Контрольные вопросы**

1. Как устроен центробежный насос?
2. Какое назначение имеет спиральный улиткообразный канал?
3. Какие зависимости называются энергетическими характеристиками насоса?
4. Что представляют собой законы пропорциональности?
5. Из чего складывается напор  $H_c$ , теряемый в сети?
6. Какой физический смысл имеет рабочая точка?
7. Какой физический смысл имеет характеристика сети?

**Библиографический список** приведен в конце сборника.

## Описание лабораторной работы

### Теоретическая часть

Во всех отраслях народного хозяйства, в том числе и в химических производствах, для транспортирования капельных жидкостей по трубопроводам используют гидравлические машины, которые сообщают потоку скорость необходимую для преодоления сопротивлений на пути перемещения. Такие гидравлические машины получили название насосов. По принципу действия, независимо от свойств перемещаемой жидкости насосы делятся на: лопастные, объемные и струйные. В группу лопастных насосов входит и центробежный насос.

Одноступенчатый центробежный насос имеет улиткообразный корпус *1*, внутри которого находится рабочее колесо *2*, рис. 4.1. Рабочее колесо центробежного насоса состоит из двух дисков, соединенных изогнутыми лопатками *3*. Жидкость, находящаяся между ними, приводится во вращение вместе с рабочим колесом. При этом каждая частица перемещается по сложной траектории. Во-первых, центробежная сила, отбрасываемая жидкость, заставляет ее двигаться радиально, вдоль лопаток от оси колеса к периферии. Во-вторых, увлекаемая лопатками вращающегося колеса жидкость, помимо радиальной скорости, приобретает еще и окружную скорость, одинаковую со скоростью колеса. Так как окружная скорость на периферии колеса больше, чем у входа в лопатки, то абсолютная (равнодействующая) скорость жидкости на выходе из колеса больше, чем на входе. Таким образом, жидкость, проходящая через рабочее колесо центробежного насоса, приобретает добавочное количество энергии.

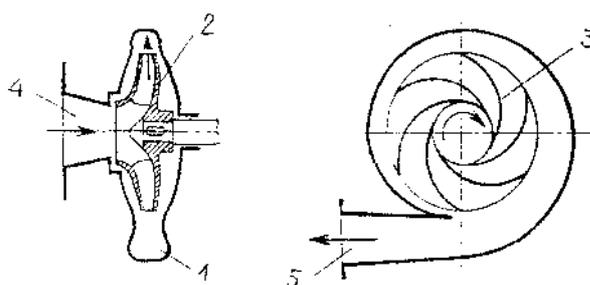


Рис. 4.1. Схема центробежного насоса:  
*1* – корпус; *2* – рабочее колесо; *3* – лопатка;  
*4* – всасывающий патрубок; *5* – нагнетательный патрубок

Жидкость, стремительно выбрасываемая с периферии рабочего колеса, поступает в улиткообразный направляющий аппарат, который кольцом охватывает рабочее колесо. Увеличивающееся к выходному патрубку поперечное сечение направляющего аппарата приводит к плавному сниже-

нию большой скорости, полученной жидкостью на выходе с лопаток рабочего колеса, до нормальной скорости в трубопроводе. При этом часть кинетической энергии жидкости преобразуется в потенциальную энергию давления, что сопровождается увеличением напора (давления) жидкости.

Для правильной эксплуатации центробежных насосов и их подбора необходимо знать, как изменяются основные параметры насосов в различных условиях их работы. Величины, характеризующие работу центробежного насоса при данном числе оборотов, обычно представляют в виде графических зависимостей напора  $H$ , мощности  $N$  и КПД  $\eta$  от производительности  $V$ , рис. 4.2.

Зависимости  $V - H$ ,  $V - N$  и  $V - \eta$  называются энергетическими характеристиками насоса. Основой считают  $V - H$  характеристику, так как расход мощности  $N$  и КПД  $\eta$  являются следствием работы по созданию подачи  $V$  и напора  $H$ , которые, соответственно, и являются целью применения насоса.

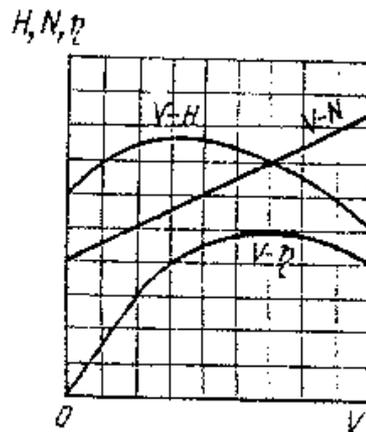


Рис. 4.2. Энергетические характеристики центробежного насоса

При изменении в небольших пределах числа оборотов центробежного насоса (приблизительно в 1,5–2 раза) его подача  $V$ , напор  $H$  и потребляемая мощность  $N$  изменяются в следующих соотношениях, называемых законами пропорциональности:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2}; \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2; \quad \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3. \quad (4.1)$$

Как следует из рис. 4.2, с увеличением подачи  $V$  мощность  $N$ , потребляемая насосом, непрерывно возрастает. При закрытой задвижке на нагнетательном трубопроводе ( $V = 0$ ) насос потребляет минимальную

мощность (на преодоление трения в подшипниках и сальнике и на перемещение жидкости рабочим колесом в корпусе насоса). Поэтому, чтобы не перегружать электродвигатель, необходимо пускать центробежный насос при закрытой задвижке.

Выбор насоса и установление числа его оборотов зависят от условий работы насоса на сеть – трубопровод. Эти условия определяются так называемой характеристикой сети ( $V - H_c$ ), т. е. зависимостью между расходом  $V$  и напором сети  $H_c$ , необходимым для преодоления всех сопротивлений данного трубопровода.

В случае несжимаемой жидкости

$$H_c = \left(1 + \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta\right) \frac{w^2}{2g} + H_{\text{под}} + H_{\text{дон}}. \quad (4.2)$$

Подставляя в это выражение значение скорости из уравнения расхода

$$w = \frac{V}{S}, \quad (4.3)$$

получаем

$$H_c = \frac{1 + \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta}{2gS^2} V^2 + H_{\text{под}} + H_{\text{дон}} = \kappa V^2 + b, \quad (4.4)$$

где

$$\kappa = \frac{1 + \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta}{2gS^2} - \text{величина, близкая к постоянному значению для данно-}$$

го трубопровода (сети).

Полученное уравнение

$$H_c = \kappa V^2 + b \quad (4.5)$$

в координатах  $H_c - V$  представляет собой параболу, рис. 4.3, вершина которой расположена на оси ординат, на высоте  $b = H_{\text{под}} + H_{\text{дон}}$  от начала координат ( $H_{\text{под}}$  – геометрическая высота подъема жидкости;  $H_{\text{дон}}$  – разность напоров в пространствах нагнетания и всасывания).

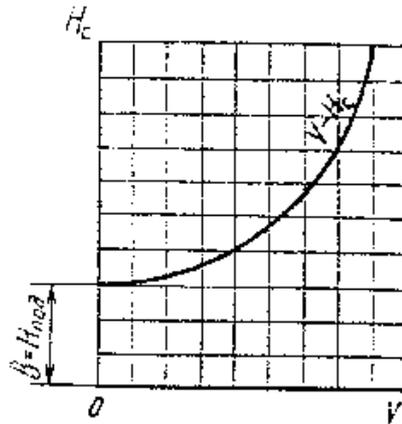


Рис. 4.3. Характеристика трубопровода (сети)

Характеристика насоса и характеристики сети представлены на общем графике, рис. 4.4.

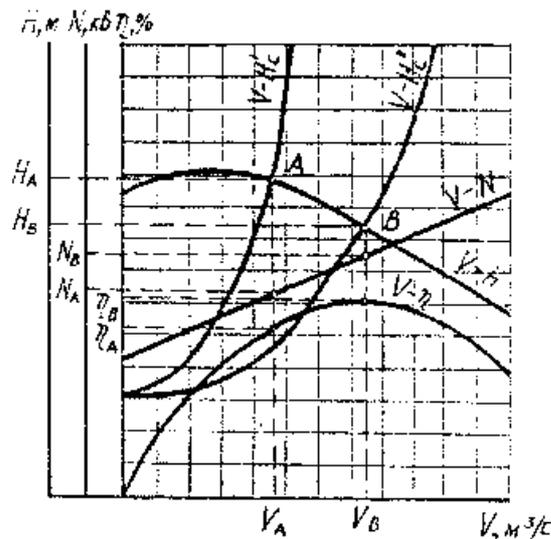


Рис. 4.4. Совмещенные характеристики насоса и сети

Пересечение характеристик насоса  $V - H$  и сети  $V - H_c$  определяет так называемую «рабочую точку». Эта точка показывает условия совместной работы системы «насос – трубопровод (сеть)», когда  $H = H_c$ . В этой точке все гидравлические сопротивления трубопровода преодолеваются напором, создаваемым насосом. Вертикальная прямая, проведенная через рабочую точку, пересекает характеристики насоса  $V - N$ ,  $V - \eta$  и ось абсцисс в точках, определяющих показатели работы насоса в данных условиях. Например, для рабочей точки  $A$  (рис. 4.4) параметры работы насоса следующие: расход  $V_A$ , напор  $H_A$ , потребляемая мощность  $N_A$ , КПД  $\eta_A$ . Положение рабочей точки позволяет судить о степени использования возможностей насоса в данных условиях. Если, например, рабочая точка  $B$ , то, следовательно, насос работает на другую сеть с другой характеристикой.

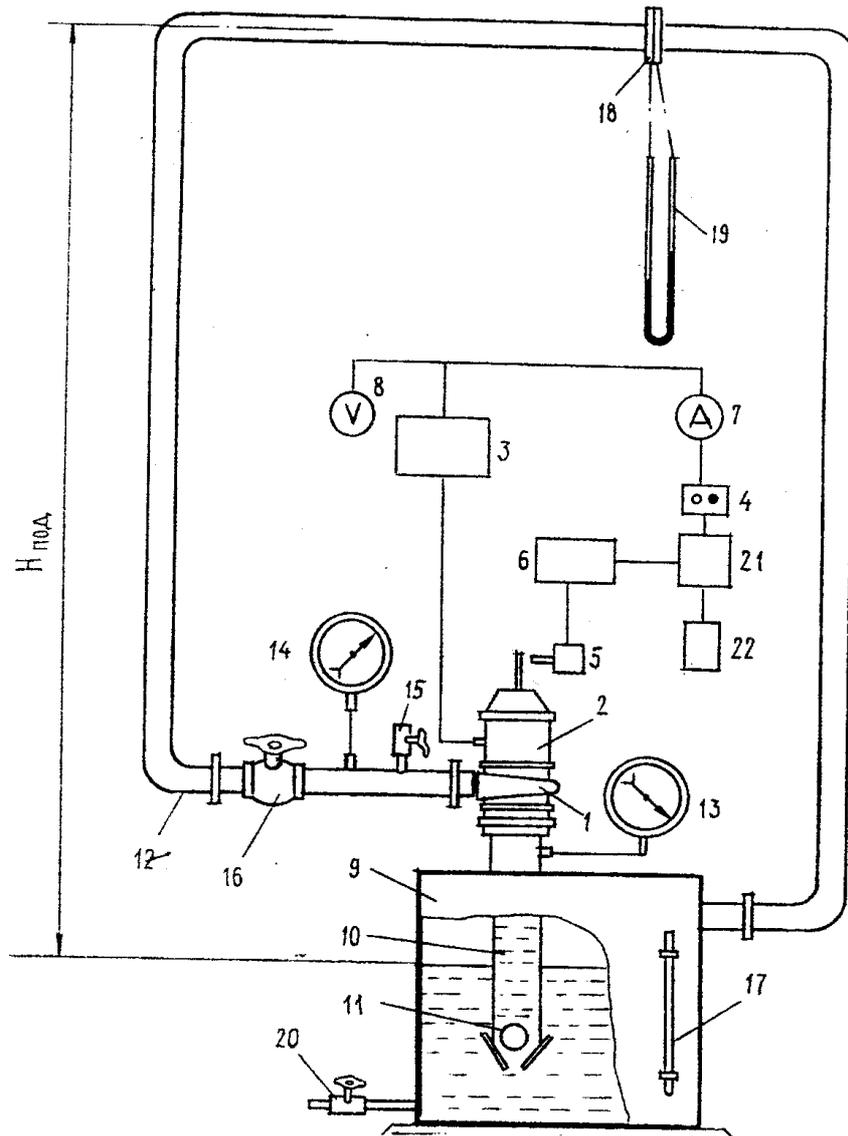


Рис. 4.5. Схема насосной установки:

1 – центробежный насос; 2 – электродвигатель; 3 – ЛАТР; 4 – кнопки пуска (остановки) электродвигателя; 5 – датчик тахометра; 6 – стробоскопический тахометр; 7 – амперметр; 8 – вольтметр; 9 – расходный бак; 10 – всасывающий трубопровод; 11 – обратный клапан; 12 – нагнетательный трубопровод; 13 – вакуумметр; 14 – манометр; 15 – заливной кран; 16 – задвижка; 17 – водомерная трубка; 18 – диафрагма; 19 – дифференциальный манометр; 20 – вентиль; 21 – автоматический выключатель; 22 – магнитный пускатель

## Описание установки

На рис. 4.5 изображена схема насосной установки. Центробежный насос *1* установлен на одном валу с электродвигателем переменного тока *2*, что позволяет проводить испытания насоса при разных числах оборотов, изменения которых осуществляется с помощью ЛАТРа *3*. Включение насоса производится кнопками пуска (остановки) электродвигателя *4*. Числа оборотов измеряют с помощью датчика тахометра *5*, соединенного со стробоскопическим тахометром *6*. Мощность, потребляемая насосом, определяется по показаниям амперметра переменного тока *7* и вольтметром переменного напряжения *8*.

Вода засасывается насосом из расходного бака *9* с помощью всасывающего трубопровода *10*, где установлены приемный обратный клапан *11*, препятствующий стоку воды при заливе насоса, и вакуумметр *13*. Залив насоса производят через заливной кран *15*. На нагнетательном трубопроводе *12* установлены манометр *14* и задвижка *16* для регулирования расхода воды. Вода из нагнетательного трубопровода возвращается в расходный бак, откуда вновь засасывается насосом. Уровень воды в баке контролируется с помощью водомерной трубки *17*. Расход воды измеряют ртутным дифференциальным манометром *19*, присоединенным к диафрагме *18*, установленной на нагнетательном трубопроводе. Вентиль *20* служит для опорожнения бака. На лицевой панели щита управления смонтирован автоматический выключатель *21* электрического питания с магнитным пускателем *22* и кнопками пуска (остановки) электродвигателя насоса.

## Методика проведения работы

Испытания насосной установки проводят в два этапа. В первую очередь определяют величины, необходимые для построения характеристик насоса:

$V - H$ ,  $V - N$  и  $V - \eta$ ; во вторую – величины, необходимые для построения характеристики сети  $V - H_c$ .

На первом этапе испытания проводят при постоянном числе оборотов насоса (число оборотов задается преподавателем), но при разных расходах воды (подачах насоса). Изменение подачи производят постепенным открытием задвижки *16* на нагнетательном трубопроводе *12*. Первый опыт проводят при полностью закрытой задвижке, последующие – при постепенном ее открытии. Последний опыт на этом этапе проводят при полностью открытой задвижке. Число оборотов насоса снимают с цифрового табло стробоскопического тахометра *6*, это можно увидеть на рис. 4.6. При этом стробоскопический тахометр устанавливают на работу в режиме «датчик» путем нажатия соответствующей кнопки, все остальные кнопки управления тахометра должны быть отжаты.

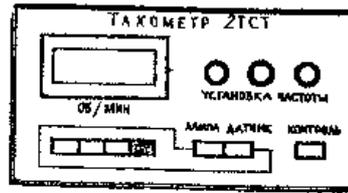


Рис. 4.6. Лицевая панель строботахометра

При этом датчик-осветитель (фотоэлектрический первичный преобразователь) 5 ориентируют на белую контрастную метку, нанесенную на вращающуюся трубку, соединенную с валом электродвигателя и отстоящего на расстоянии не более 10 мм. После чего нажатием кнопки соответствующего поддиапазона фиксируют показания цифрового табло. Изменения регулирования задвижки на нагнетательном трубопроводе необходимо контролировать с помощью строботахометра на заданное число оборотов. При каждом обороте задвижки в сторону открытия число оборотов насоса будет уменьшаться, поэтому после поворота задвижки необходимо с помощью ЛАТРа 3 восстановить заданное число оборотов насоса, а затем одновременно произвести замеры: подачи насоса, разряжения во всасывающей трубе, давления в нагнетательной трубе, напряжения и силы тока.

На втором этапе работы испытания проводят при постоянном (заданном) открытии задвижки, но при разных числах оборотов насоса (не менее 5–7). Для каждого числа оборотов производят замеры: подачи насоса; разряжения во всасывающей трубе и давления в нагнетательной трубе. Затем изменяют положение задвижки (по заданию преподавателя) и проводят вторую серию опытов при тех же 5–7 числах, что и в первой серии.

Выше указывалось, что вершина параболы (характеристики  $V - H_c$ ) располагается по оси ординат на расстоянии  $b$  от начала координат:

$$b = H_{\text{под}} + H_{\text{дон}}.$$

Так как в данной установке дополнительного напора  $H_{\text{дон}}$  нет, то  $b = H_{\text{под}}$ .

По результатам, полученным во втором этапе работы, строят две характеристики  $V - H_c$  и совместно с характеристиками насоса, полученными в первом этапе ( $V - H$ ,  $V - N$  и  $V - \eta$ ), наносят их на общий график, рис. 4.4, на пересечении кривых  $V - H_c$  и  $V - H$  получают рабочие точки  $A$  и  $B$ , по которым определяют параметры работы насосной установки.

Полный напор насоса  $H$ , выражаемый в метрах столба подаваемой жидкости, определяют следующим образом:

$$H = P_M + P_B + h + \frac{w_{наг}^2 - w_{вс}^2}{2}, \quad (4.6)$$

где  $P_M$  и  $P_B$  – показания манометра и вакуумметра, *м. вод. ст*;  $h$  – расстояние между местами присоединения манометра и вакуумметра, *м*;  $w_{наг}$  и  $w_{вс}$  – скорость в нагнетательном и во всасывающем трубопроводах соответственно, *м/с*.

Так как в данной установке всасывающий и нагнетательный трубопроводы имеют одинаковый диаметр, то  $w_{наг} = w_{вс}$ .

Таким образом,

$$H = P_M + P_B + h. \quad (4.7)$$

### Обработка опытных данных и составление отчета

Производительность насоса определяют по тарировочному графику в зависимости от показаний дифференциального манометра.

Мощность, потребляемая насосной установкой, Вт, определяется выражением

$$N = UI, \quad (4.8)$$

где  $U$  – напряжение, *В*;  $I$  – сила тока, *А*.

Коэффициент полезного действия насосной установки  $\eta$  определяют по формуле

$$\eta = \frac{V\rho gH}{N}, \quad (4.9)$$

где  $V$  – производительность (подача) насоса, *м<sup>3</sup>/с*;  $\rho$  – плотность перекачиваемой жидкости, *кг/м<sup>3</sup>*;  $g$  – ускорение свободного падения, *м/с<sup>2</sup>*;  $H$  – полный напор, создаваемый насосом, *м вод. ст*.

Все величины, измеренные в процессе испытания и полученные расчетом, записываются в отчетные таблицы 4.1 и 4.2.

Работа заканчивается построением графика, рис. 4.4, и определением параметров рабочих точек  $A$  и  $B$ .





## Лабораторная работа № 5

### Исследование процессов перемешивания в жидкой среде

#### 4 часа

**Цель работы:** изучить закономерности механического перемешивания.

**Задачи работы:**

1. Установить для двух несмешивающихся жидкостей (масло – вода) зависимость эффективности перемешивания от заданного типа мешалки и числа оборотов.

2. Установить вид зависимости  $\lg K_N = f(\lg Re_u)$ , определить константы перемешивания  $C$ ,  $m$  для данного типа мешалки в указанном диапазоне чисел оборотов мешалки (4 – 5 значений).

3. Определить мощность на перемешивание и для указанных чисел оборотов мешалки установить коэффициент полезного действия.

**Обеспечивающие средства:** лабораторный стенд включает – реактор и мешалку с приводом; ЛАТР для изменения частоты вращения мешалки. Контрольно-измерительные приборы – тахометр, для определения частоты вращения мешалки; тахогенератор, амперметр переменного тока; вольтметр переменного напряжения, автотрансформатор.

**Задание:**

1. Установить вид зависимости  $\lg K_N = f(\lg Re_u)$ , определить константы перемешивания  $C$ ,  $m$  для данного типа мешалки в указанном диапазоне чисел оборотов мешалки (4-5 значений) – с минимальным интервалом времени отбора проб.

2. Установить зависимость эффективности перемешивания от заданного типа мешалки и числа оборотов.

**Требования к отчету:** итоги лабораторной работы должны быть представлены на листах формата А4, графики – на миллиметровой бумаге, выполненные в карандаше. Работа выполняется бригадно (4 чел.), каждый студент в бригаде составляет свой собственный отчет. В отчете указывается название института, кафедры, лабораторной работы, фамилия и инициалы студента, название специальности и группы, вида обучения, факультета, а также: цель работы, схема установки, методика проведения работы, основные формулы расчетов с расшифровкой символов, подробные расчеты значений одного из режимов; результаты представить в виде таблицы 5.1. «Опытные и расчетные данные при определении эффективности перемешивания» и таблицы 5.2. «Опытные и расчетные данные при определении потребляемой мощности» для каждого типа мешалки; построить для каждого типа мешалки графики зависимости  $\lg K_N = f(\lg Re_u)$  и определить коэффициенты  $C$  и  $m$ . Написать вывод по работе и защитить отчет.

**Технология работы:** После установившегося режима перемешивания (3–5 мин) с минимальным интервалом времени необходимо отобрать пробы со всех уровней в пронумерованные мерные цилиндры и определить высоты (или объемы) слоев масла и воды в каждой пробе. Далее установить последующие числа оборотов мешалки в порядке их увеличения и повторить опыт 5 раз. Установить вид зависимости  $\lg K_N = f(\lg Re_u)$ , определить константы перемешивания  $C, m$  для двух типов мешалок. Установить зависимость эффективности перемешивания от заданного типа мешалки и числа оборотов.

**Контрольные вопросы**

1. Промышленное значение и способы перемешивания жидких сред.
2. Особенности течения жидкости при перемешивании вращающимися механическими мешалками.
3. Понятие об интенсивности и эффективности перемешивания.
4. Как зависят физические свойства гетерогенных систем от свойств исходных компонентов?
5. Что влияет на мощность, потребляемую мешалкой?
6. Физический смысл центробежных критериев Рейнольдса и Фруда.
7. Физический смысл критерия мощности.
8. Вид зависимости критерия мощности от центробежного критерия Рейнольдса и определение констант перемешивания.
9. Каким прибором определяют частоту вращения мешалки и на каком принципе он основан?
10. Какое назначение имеют перегородки в аппарате?
11. Методика определения мощности электродвигателя.

**Библиографический список** приведен в конце сборника.

## Описание лабораторной работы

### Теоретическая часть

Перемешивание в гетерогенных (неоднородных) системах *жидкость–газ*, *жидкость–жидкость*, *жидкость–твердое тело* применяется в промышленности для приготовления газожидкостных систем, эмульсий, суспензий, растворов, а также для интенсификации ряда массообменных, тепловых и химических процессов.

Перемешивание заключается в многократном перемещении частиц текучей среды относительно друг друга, происходящем в объеме аппарата под действием импульса, передаваемого среде мешалкой, струей жидкости или газа.

В зависимости от целей и условий проведения процесса применяют аппараты с перемешивающими устройствами различных конструкций. Наиболее распространены в настоящее время аппараты с вращающимися механическими мешалками разных типов. При перемешивании такими мешалками возникает сложное трехмерное течение жидкости. Первичным в этом течении является тангенциальное движение, которое в пространстве, ограниченном дном, стенками аппарата и свободной поверхностью жидкости вызывает радиальные и аксиальные потоки.

Поскольку аналитического описания поля скоростей в аппаратах с мешалками до настоящего времени получить не удалось, то их характеризуют технологической интенсивностью и эффективностью перемешивания.

Интенсивностью перемешивания ( $I$ ) называют возможность достижения некоторого заданного, строго определенного технологического результата за определенное время ( $\tau$ )

$$I_{n=const} = f(n). \quad (5.1)$$

При одинаковой частоте вращения ( $n$ ) действие мешалки будет тем более интенсивным, чем меньше время перемешивания. Если требуемое качество перемешивания может быть обеспечено лишь при частоте вращения, не меньше некоторой определенной величины, то интенсивность будет выражаться

$$I_{\tau=const} = f(n). \quad (5.2)$$

Следовательно, при одинаковом времени достижения заданного технологического результата, действие мешалки будет тем более интенсивным, чем с меньшей частотой она вращается.

Эффективностью перемешивания ( $E$ ) называется возможность достижения заданного технологического результата при затрате определенной работы ( $N\tau$ )

$$E = \Psi(N\tau), \quad (5.3)$$

где  $N$  – мощность, потребляемая мешалкой.

Очевидно, что действие мешалки тем более эффективно, чем меньше работы затрачивается на достижение требуемого технологического результата.

Для определения эффективности перемешивания двух взаимно нерастворимых жидкостей, например, масло–вода, сравнивают содержание масла в пробах, взятых в различных точках аппарата, со средним (расчетным) его содержанием в воде. При этом сравнение обычно ведется по компоненту меньшей концентрации.

В качестве характеристики равномерности распределения фаз в жидкости может быть использована локальная степень перемешивания  $S$ , определяемая из следующих уравнений:

$$S = \frac{\bar{x}}{\bar{x}_{cp}} \quad \text{при } \bar{x} \leq \bar{x}_{cp}, \quad (5.4)$$

$$S = 1 - \frac{\bar{x} - \bar{x}_{cp}}{\bar{x}_{cp}} \quad \text{при } \bar{x}_{cp} \leq \bar{x} \leq 2\bar{x}_{cp}, \quad (5.5)$$

где  $\bar{x}, \bar{x}_{cp}$  – содержание масла в пробе и среднее содержание масла в воде в объеме реактора (массовые доли).

Среднее арифметическое всех локальных значений степени перемешивания, называемое индексом перемешивания  $Y$ , может служить оценкой равномерности распределения фаз в дисперсных системах

$$Y = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k S, \quad (5.6)$$

где  $k$  – число проб.

Как следует из приведенных выражений, в хорошо перемешанных системах величины  $S$  и  $Y$  стремятся к 1.

Для гетерогенных систем, например эмульсий, содержание дисперсной фазы можно выразить в массовых  $\bar{x}_{cp}$  долях

$$\bar{x}_{cp} = \frac{\rho_m V_m}{\rho_v V_v + \rho_m V_m}, \quad (5.7)$$

где  $V_m$ ,  $V_v$  и  $\rho_m$ ,  $\rho_v$  – соответственно объемы и плотности дисперсной фазы (масла) и дисперсной фазы (воды).

Если эмульсия *масло–вода* содержится в цилиндрическом аппарате, то содержание масла можно узнать после расслоения системы по высотам слоев масла  $h_m$  и воды  $h_v$ .

$$\bar{x}_{cp} = \frac{\rho_m h_m}{\rho_v h_v + \rho_m h_m}. \quad (5.8)$$

Локальное содержание масла в пробах, отбираемых в градуированные сосуды (мензурки), может быть определено как по формуле (5.7), так и по формуле (5.8) с заменой обозначения  $\bar{x}_{cp}$  на  $\bar{x}$ .

Распределение одной фазы в другой при перемешивании приводит к существенному изменению свойств получаемой гетерогенной системы. В частности, плотность  $\rho$  и вязкость  $\mu$  эмульсий зависят от концентрации дисперсной фазы, плотности и вязкости исходных жидкостей

$$\rho = \rho_m \bar{x}_{cp} + \rho_v (1 - \bar{x}_{cp}), \quad (5.9)$$

$$\mu = \mu_v \left( 1 + 2,5 \bar{x}_{cp} \frac{\mu_m + 0,4 \mu_v}{\mu_m + \mu_v} \right) \text{ при } \bar{x}_{cp} \leq 0,3, \quad (5.10)$$

$$\mu = \frac{\mu_v}{1 - \bar{x}_{cp}} \left( 1 + \frac{A \bar{x}_{cp} \mu_m}{\mu_m + \mu_v} \right) \text{ при } \bar{x}_{cp} \geq 0,3, \quad (5.11)$$

где  $\mu_v$ ,  $\mu_m$  – вязкости сплошной и дисперсной фаз;  $A$  – коэффициент ( $A = 6$  при  $\mu_v > \mu_m$ ,  $A = -1,5$  при  $\mu_v < \mu_m$ ).

Мощность  $N$ , потребляемая мешалкой  $N$ , тратится на преодоление сил трения, на образование и срыв вихрей с лопастей мешалки и отражательных перегородок, часто устанавливаемых внутри аппарата для повышения эффективности перемешивания. Эта мощность зависит от свойств обрабатываемой среды, основных геометрических размеров рабочих орга-

нов мешалки и аппаратов, скорости вращения мешалки, сил тяжести и в общем виде записывается как

$$N = f(\rho, \mu, d, D, H, b_n, h, n, g), \quad (5.12)$$

где  $d$  – диаметр мешалки, м;  $D$  – диаметр аппарата, м;  $H$  – высота слоя жидкости в аппарате, м;  $b_n$  – ширина отражательных перегородок, м;  $h$  – высота расположения мешалки над дном аппарата, м;  $n$  – число оборотов мешалки,  $\text{с}^{-1}$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ .

Зависимость (5.12) методом анализа размерностей ( $\pi$ -теорема Бэкингема) можно представить в критериальном виде

$$\frac{N}{\rho n^3 d^5} = f\left(\frac{\rho n d^2}{\mu}, \frac{n^2 d}{g}, \frac{D}{d}, \frac{H}{d}, \frac{b_n}{D}, \frac{h}{H}\right), \quad (5.13)$$

где  $\frac{N}{\rho n^3 d^5} = K_N$  – критерий мощности;  $\frac{\rho n d^2}{\mu} = Re$  – критерий Рей-

нольдса (центробежный);  $\frac{n^2 d}{g} = Fr_u$  – критерий Фруда (центробежный);

$\frac{D}{d} = \Gamma_D$ ,  $\frac{H}{d} = \Gamma_H$ ,  $\frac{b_n}{D} = \Gamma_B$ ,  $\frac{h}{H} = \Gamma_h$  – симплексы геометрического подобия.

Влияние силы тяжести сказывается на образовании воронки и волн на свободной поверхности жидкости. В тех случаях, когда на поверхности перемешиваемой жидкости не образуется воронка или при наличии отражательных перегородок, влиянием сил тяжести можно пренебречь и исключить критерий Фруда из уравнения (5.13). Для геометрически подобных аппаратов зависимость (5.13) может быть записана в следующей форме

$$K_N = C Re_u^m, \quad (5.14)$$

где  $C$ ,  $m$  – постоянные, зависящие от типа мешалки и соотношений геометрических размеров, а также от режима движения перемешиваемой жидкости (критерий  $Re_u$ ).

Зависимость (5.14) определяется по опытными данным и обычно изображается графически в логарифмических координатах, где эта зависимость представляется в виде прямых линий. Количественно зависимости

между  $\lg K_N$  и  $\lg Re_u$  отличаются для различных типов мешалок, но имеют четыре характерных области (рис. 5.1).

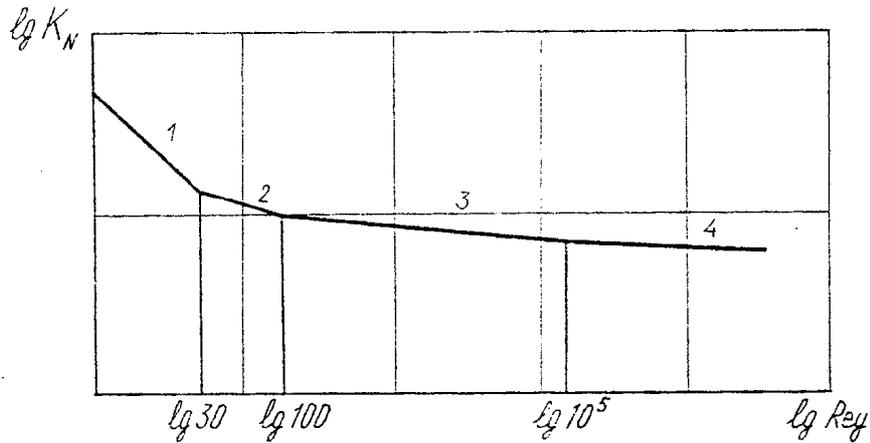


Рис. 5.1. Зависимость коэффициента мощности от режима движения перемешиваемой жидкости:

- 1 – область ламинарного режима (угловой коэффициент для всех типов мешалок практически одинаков,  $m = 1$ );
- 2 – переходная область;
- 3 – область турбулентного режима;
- 4 – автомодельная область, где критерий мощности не зависит или мало зависит от  $Re_u$  т. к. силы инерции значительно превосходят силы трения.

Как видно из графика, значения констант  $C$ ,  $m$  для одной и той же мешалки при различных режимах ее работы не одинаковы.

Рассмотренные зависимости, полученные из опытных данных, позволяют определить рабочую мощность мешалки  $N$ .

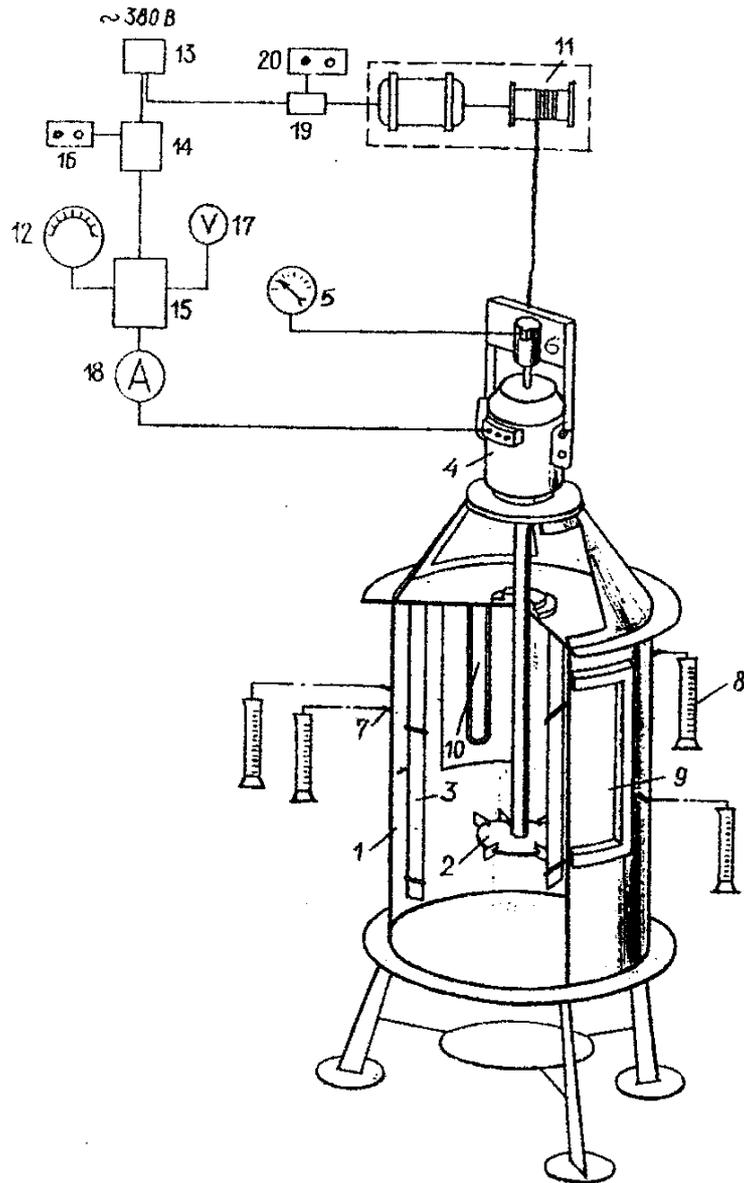


Рис. 5.2. Схема установки:

1 – реактор; 2 – мешалка; 3 – отражательная перегородка; 4 – электродвигатель постоянного тока; 5 – тахометр; 6 – тахогенератор; 7 – пробоотборник; 8 – мерный цилиндр; 9 – смотровое окно; 10 – лампа подсвечивания; 11 – грузоподъемный механизм; 12 – автотрансформатор; 13 – автоматический выключатель; 14, 19 – магнитный пускатель; 15 – выпрямитель; 16, 20 – кнопки управления; 17 – вольтметр; 18 – амперметр

## Описание установки

Установка для исследования процесса перемешивания приведена на рис. 5.2 и состоит из реактора 1 цилиндрической формы с внутренним диаметром  $D = 450$  мм и мешалки 2. Внутри реактора размещены отражательные перегородки 3, которые устанавливаются для быстроходных мешалок, типа пропеллерной и турбинной во избежание образования воронки. Мешалку в действие приводит электродвигатель постоянного тока 4 мощностью 0,25 кВт. Измерение числа оборотов мешалки осуществляется с помощью тахометра 5. В реакторе находятся две нерастворимые друг в друге жидкости (*масло–вода*). Для отбора проб эмульсии, получаемой в процессе перемешивания, на разных уровнях установлены четыре пробоотборника 7, соединенные с мерными цилиндрами 8. С целью визуального наблюдения за характером перемешивания реактор снабжен смотровыми окнами 9, на одном из которых размещено устройство с лампой подсвечивания 10. Для подъема и замены перемешивающего устройства (мешалки), установления отражательных перегородок служит грузоподъемный механизм 11.

Блок контроля и управления электродвигателем постоянного тока для поддержания заданной частоты вращения мешалки состоит из автотрансформатора (ЛАТРа) 12 питаемого от сети переменного тока, автоматического выключателя 13, магнитного пускателя 14, выпрямителя 15 и кнопок управления 16. Для определения мощности потребляемой электродвигателем, установлены вольтметр 17 и амперметр 18.

Управление работой грузоподъемного механизма осуществляется с помощью магнитного пускателя 19 и кнопок управления 20.

## Методика проведения работы

Испытания начинают с первоначального замера высоты слоев жидкостей (масла и воды) в реакторе 1, которые заносят в таблицу 5.1. После чего устанавливают заданную мешалку, предварительно выполнив соответствующие замеры мешалки (диаметр  $d$  и ширину лопастей  $b$ ). Эскиз мешалки с размерами приводят в отчете. Если установлена лопастная мешалка, которая относится к тихоходным, то отражательные перегородки не устанавливают. Затем включают лампу подсвечивания 10, автоматический выключатель 13, кнопку управления 16 и с помощью ручки ЛАТРа 12 плавно выводят мешалку на заданный режим перемешивания (частота вращения мешалки задается преподавателем). Число оборотов мешалки снимают с цифрового табло тахометра 5.

Время перемешивания определяется достижением установившегося режима движения и составляет 3–5 мин (для всех опытов время перемешивания должно быть примерно одинаковым).

Промывают пробоотборники 7 путем слива 10-20 мл эмульсии в мерные цилиндры 8. Промывные объемы жидкости переливают в вспомогательную емкость с целью возвращения обратно в реактор. С минимальным интервалом времени отбирают пробы со всех уровней в пронумерованные мерные цилиндры, не допуская их переполнения. Отобрав пробы, останавливают мешалку. После отстаивания эмульсии в мерных цилиндрах определяют высоты (или объемы) слоев масла и воды в каждой пробе и сливают их в реактор, а мерные цилиндры насухо протирают.

Полученные результаты заносят в таблицу 5.1.

Далее устанавливают последующие числа оборотов мешалки в порядке их увеличения и повторяют опыт. Записав результаты измерений в отчетную таблицу, проводят в той же последовательности измерения на другом типе мешалки (по заданию преподавателя). При этом мешалка пропеллерная или открытая турбинная может работать в аппарате без перегородок и с перегородками. Оба эти варианта должны быть экспериментально проверены.

### Обработка опытных данных и составление отчета

По экспериментальным данным для каждого типа мешалки зная высоту слоев жидкостей в реакторе, по формуле (5.8) определяют среднее содержание масла  $x_{cp}$ .

Локальное содержание масла в пробах рассчитывают по формулам (5.7) или (5.8), а локальную степень перемешивания по формулам (5.4), (5.5).

Индекс перемешивания для заданных чисел оборотов вычисляется по формуле (5.6). По результатам вычислений для каждого типа мешалки строят график зависимости  $Y = f(n)$ . По формулам (5.9), (5.10) или (5.11) определяют плотность и вязкость перемешиваемой среды. Необходимые при этом физические свойства используемого в работе масла и воды берутся по справочнику.

Для определения мощности на перемешивание по формуле  $Re_{\mu} = \frac{nd^2\rho}{\mu}$  и по графику  $K_N = f(Re_{\mu})$ , взятому из справочника для данного типа мешалки, находят критерий мощности  $K_N$ , а из выражения  $K_N = \frac{N}{n^3 d^5 \rho}$  – расход мощности на перемешивание. Зная силу тока  $I$  и напряжение  $U$ , определяют потребляемую электродвигателем мощность

$$N_{дв} = IU \quad (5.15)$$

и КПД

$$\eta = \frac{N}{N_{\partial\delta}}. \quad (5.16)$$

Используя критериальную зависимость (5.14), по рассчитанным значениям  $K_N$  и  $Re_u$  строят график зависимости  $\lg K_N = f(\lg Re_u)$ . Логарифмируя уравнение (5.14), получаем

$$\lg K_N = \lg C + m \lg Re_u. \quad (5.17)$$

Это уравнение прямой линии в логарифмических координатах, где по оси абсцисс отложены значения  $\lg Re_u$ , а по оси ординат  $\lg K_N$ . В результате построения логарифмической зависимости определяют коэффициенты  $C$  и  $m$ , где постоянная  $m$  определяется тангенсом угла наклона прямой к оси абсцисс, а постоянная  $C$  находится из соотношения для любой точки прямой

$$C = \frac{K_N}{Re^m}. \quad (5.18)$$

Результаты расчетов заносят в таблицу 5.2.





## Лабораторная работа № 6

2 часа

### Определение коэффициента теплопроводности материалов методом бесконечной пластины

**Цель работы:**

- определение коэффициента теплопроводности фторопласта методом плоского слоя;
- построение зависимости коэффициента теплопроводности от температуры  $\lambda = f(t)$ .

**Задачи работы:** при различных стационарных режимах снять показания температур на поверхности испытуемого образца и занести их в таблицу. В каждом режиме определить средние значения температур. Произвести расчет коэффициента теплопроводности для всех режимов и занести результаты в таблицу. Построить график зависимости коэффициента теплопроводности материала  $\lambda$  от температуры.

**Обеспечивающие средства:** лабораторный стенд с объектом исследования в аудитории 308-2.

**Задание:** провести четыре серии опытов, увеличивая напряжение электронагрева. Измерения следует снимать при установившемся тепловом режиме (для этого достаточно 15 мин) не менее 2–3 раз через каждые 2 мин. Первый режим можно считать законченным, убедившись в постоянстве показаний всех термопар на протяжении нескольких измерений. Полученные результаты занести в таблицу. Рассчитать тепловой поток от нагревателя; вычислить критерии Нуссельта, Грасгофа и Прандтля; коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности теплозащитного слоя к воздуху с помощью теплового потока, отводимого свободной конвекцией и определить коэффициент теплопроводности фторопластовой пластины. Построить график зависимости коэффициента теплопроводности  $\lambda$  от температуры.

**Требования к отчету:** итоги лабораторной работы должны быть представлены на листах формата А4, графики – на миллиметровой бумаге, выполненные в карандаше. Работа выполняется побригадно (4 чел.), бригада составляет один отчет. В отчете указывается название института, кафедры, лабораторной работы, фамилии и инициалы студентов, название специальности и группы, вида обучения, факультета, а также цель работы, схема установки, основные формулы расчетов с расшифровкой символов, подробные расчеты значений одного из режимов, таблицы «Экспериментальные данные» и «Расчетные данные», график зависимости теплопроводности  $\lambda$  от температуры.

**Технология работы:** при подаче напряжения электронагрева и выходе на стационарный режим снять показания соответствующих термопар и занести их в таблицу. Увеличив напряжения электронагрева и убедившись в стационарности режима снять показания термопар и вновь занести их в таблицу.

**Контрольные вопросы**

1. Какое температурное поле называется установившимся?
2. Определение температурного градиента и теплового потока.
3. Физический смысл коэффициента теплопроводности.
4. Дифференциальное уравнение процесса теплопроводности.
5. Какова общая характеристика используемого метода определения теплопроводности?
6. С помощью, каких приборов производятся измерения при выполнении работы?
7. Какие тепловые потери учитываются работе и методика их определения?

**Библиографический список** приводится в конце сборника описаний лабораторных работ.

## Описание лабораторной работы

### Теоретическая часть

*Теплопроводность* – молекулярный перенос теплоты в теле, обусловленный наличием градиента температуры, что осуществляется вследствие теплового движения и энергетического взаимодействия между частицами, из которых состоит данное тело. Процесс теплопроводности непрерывно связан с распространением температуры в теле. Совокупность мгновенных значений температур во всех точках рассматриваемого пространства в данный момент времени называется *температурным градиентом* и выражается уравнением:

$$t = f(x, y, z, \tau), \quad (6.1)$$

где  $x, y, z$  – пространственные координаты точки, а  $\tau$  – время.

Если температура в любой точке пространства не изменяется с течением времени, а является функцией только ее пространственных координат  $(x, y, z)$ , то такое температурное поле называется *установившимся*, или *стационарным*. Простейшим температурным полем является одномерное стационарное поле  $t = f(x)$ .

Все точки пространства, имеющие одинаковую температуру, образуют *изотермическую поверхность*, следовательно, изменения температур в теле может наблюдаться только в направлениях, пересекающих эту поверхность, причем наиболее сильные изменения наблюдаются в направлении нормали (рис. 6.1).

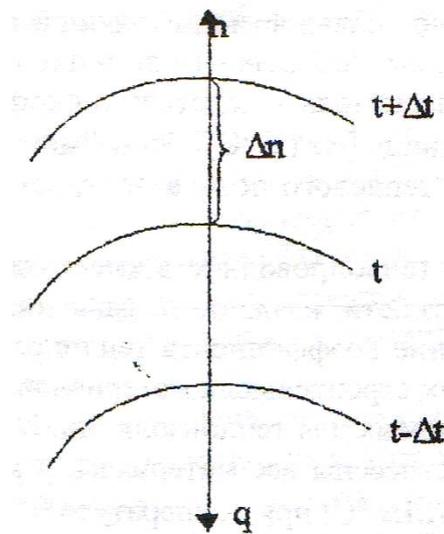


Рис. 6.1. К определению температурного градиента и теплового потока

Предел отношения изменения температуры  $\Delta t$  к расстоянию между изотермами по нормали  $\Delta n$  при условии, что  $\Delta n \rightarrow 0$ , называется *температурным градиентом*:

$$\lim \left[ \frac{\Delta t}{\Delta n} \right]_{\Delta n \rightarrow 0} = \frac{\partial t}{\partial n} = \text{grad } t. \quad (6.2)$$

Значение температурного градиента определяет наибольшую скорость изменения температуры в данной точке температурного поля.

Количество теплоты, переданное через произвольную поверхность в единицу времени, называется *тепловым потоком*  $Q$  [Вт]. Тепловой поток, отнесенный к единице поверхности, называется *поверхностной плотностью* теплового потока  $q$  [Вт/м<sup>2</sup>]. Так как тепловая энергия самопроизвольно распространяется только в сторону убывания температуры, перемещение тепла осуществляется противоположно направлению температурного градиента:

$$\vec{q} \approx - \left( \frac{\vec{\partial t}}{\partial n} \right). \quad (6.3)$$

Согласно закону Био-Фурье, тепловая мощность, передаваемая теплопроводностью, которая в чистом виде имеет место только в твердых телах с малым коэффициентом термического расширения, выражается эмпирической уравнением:

$$\vec{q} = -\lambda \frac{\vec{\partial t}}{\partial n} = \lambda \overrightarrow{\text{grad } t} \quad (6.4)$$

Множитель пропорциональности  $\lambda$ , входящий в это уравнение, называется *коэффициентом теплопроводности* (или *теплопроводностью*) и численно равен плотности теплового потока вследствие теплопроводности при градиенте температуры, равном единице  $\left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$ . Знак «минус» в уравнении (6.4) показывает, что направление теплового потока противоположно направлению градиента температуры.

Для различных тел теплопроводность имеет определенное значение и зависит от структуры, плотности, влажности, давления и температуры этих тел. Наиболее высокое значение коэффициента теплопроводности имеют металлы, ниже – у неметаллических строительных материалов и самые низкие – у пористых материалов, применяемых в теплоизоляции. К числу теплоизоляционных материалов могут быть отнесены все материа-

лы, у которых коэффициент теплопроводности менее  $5 \left[ \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C} \right]$  при температуре  $0^\circ C$ .

Коэффициент теплопроводности существенно зависит от температуры, и для многих материалов, в том числе и теплоизоляционных, зависимость коэффициента теплопроводности от температуры можно принять линейной:

$$\lambda_t = \lambda_0(1 + \beta t), \quad (6.5)$$

где  $\lambda_0$  – коэффициент теплопроводности тела при  $0^\circ C$ ;  $\beta$  – температурный коэффициент, представляющий собой приращение коэффициента теплопроводности материала при повышении его температуры на один градус.

Для определения теплопроводности необходимо решить дифференциальное уравнение, выражающее изменение температуры в любой точке нагреваемого тела в зависимости от времени:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{c_m \rho}, \quad (6.6)$$

где  $a = \frac{\lambda}{c_m \rho}$  – температуропроводность тела,  $\frac{м^2}{с}$ ;  $\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}$  – оператор Лапласа  $q_v$  – объемная плотность теплового потока от внутренних источников,  $\left[ \frac{Вт}{м^3} \right]$ ;  $c_m$  – средняя удельная теплоемкость вещества,  $\left[ \frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C} \right]$ ;  $\rho$  – плотность вещества,  $\left[ \frac{кг}{м^3} \right]$ .

Левая часть этого уравнения характеризует скорость изменения температуры некоторой точки тела во времени, правая – пространственное распределения температуры вблизи этой точки.

Данное дифференциальное уравнение описывает процесс теплопроводности в общем виде. Чтобы получить частное решение, соответствующее конкретному явлению, к дифференциальному уравнению необходимо добавить математическое описание всех частных особенностей рассматриваемого процесса, которые включают в себя:

- геометрическую форму и размеры тела, в котором протекает процесс;
- значение физических параметров тела и окружающей среды;
- распределение температуры в теле в начальный момент времени (начальные условия) и условия протекания процесса;
- условия теплообмена на границе тела (граничные условия);
- интенсивность и распределения внутренних источников теплоты.

При решении уравнения (1.6) обычно используют метод разделения переменных или метод источника.

Лабораторные методы определения теплопроводности материалов основываются чаще всего на стационарном режиме. При исследовании теплоизоляционных материалов, обладающих низкой теплопроводностью, широкое распространение получил метод плоского слоя, когда образцу исследуемого материала придается форма тонкой круглой или квадратной пластинки. Для создания перепада температур одна поверхность пластинки нагревается, а другая охлаждается. При выборе геометрических размеров исследуемых образцов с низкой теплопроводностью необходимо выполнять условие:

$$\delta \leq \left( \frac{1}{7} \dots \frac{1}{10} \right) d, \quad (6.7)$$

где  $\delta$  – толщина пластины,  $m$ ;  $d$  – диаметр круглой пластины (или сторона квадратной),  $m$ .

Для устранения тепловых потерь с боковых или торцевых поверхностей испытуемого образца используют тепловую изоляцию.

При стационарном режиме температура в любой точке тела в течении времени не претерпевает изменений ( $\partial t / \partial \tau = 0$ ). В лабораторной работе передача теплоты осуществляется через плоскую однородную платину толщиной  $\delta$  с  $\lambda = const$ . Температура наружной и внутренней поверхностей пластины поддерживается постоянной и равной соответственно  $t_1$  и  $t_2$ . Так как длина и ширина пластины бесконечно велика по сравнению с ее толщиной, то температура стенки изменяется только в направлении оси  $x$ .

Для определения плотности теплового потока используется уравнение (1.4) в скалярной форме:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}. \quad (6.8)$$

Путем интегрирования этого уравнения определяют плотность теплового потока:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2). \quad (6.9)$$

С учетом площади пластины  $F$ ,  $m^2$ , коэффициент теплопроводности определяется выражением:

$$\lambda = \frac{\delta}{F} \frac{Q}{(t_1 - t_2)}. \quad (6.10)$$

## Описание установки

Установка для определения коэффициента теплопроводности, рис. 1.2, состоит из лабораторного стола 1 с вертикальной панелью, на которой расположен объект исследования 2, вентиль охлаждающей воды 3, автотрансформатор с ручкой управления 4, вольтметр в комплекте с регистрируемым прибором 5, блок температуры 6, а также система тумблеров и кнопок 7–15 включения и управления лабораторным стендом.

Объект исследования, рис. 6.3, представляет собой два образца 1, выполненных в форме дисков толщиной  $\delta = 5$  мм и диаметром  $d = 135$  мм из фторопласта. Испытуемые образцы помещены между нагревателем 3 и двумя холодильниками 2. необходимая плотность контакта испытуемых образцов обеспечивается применением болтового соединения. Нагревательный диск с электрическим сопротивлением  $R = 96,62$  Ом выполнен из двух латунных дисков, один из которых служит крышкой, а другой представляет собой цилиндр с нагревательным элементом 4, уложенным для электрической изоляции на поверхность листового асбеста. Для снижения радиальных тепловых потерь используется теплоизоляционный кожух 5, выполненный из асбоцемента.

При установившемся тепловом режиме выделяющаяся в нагревателе теплота (за исключением радиальных тепловых потерь) проходит через испытуемые образцы, а затем отводится охлаждающей водой, протекающей через спиральные канавки, расположенные в полости двух холодильников. Подаваемое на нагреватель напряжение регулируется автотрансформатором Т1 и измеряется комбинированным цифровым прибором Щ-4313.

Для измерения температур на деталях рабочего элемента установлены хромель-копельные термопары, рис. 1.4. Термопары В1 и В2 зачеканены по центру поверхностей холодильников, а остальные четыре термопары – В3, В4, В5, В6 – расположены на торцевых поверхностях нагревателя. Кроме того, установлены еще три термопары – В7, В8, В9 – в центре боковой поверхности изоляционного кожуха. ЭДС термопар измеряется милливольтметром МВ46-41А, шкала которого проградуирована в  $^{\circ}\text{C}$ .

## Методика проведения работы

Вывести против часовой стрелки ручку трансформатора 4, рис. 6.2, в нулевое положение и включить тумблером 7 электропитание установки (загорается сигнальная лампочка 8). Включить питание прибора Щ-4313 с помощью тумблера 11 и установить род подаваемого напряжения тумблером 12. С помощью тумблеров 13 и 14 установить род работы. Выбрать диапазон измерений, соответствующий ожидаемому значению измеряемой

величины. Подать питание на блок температур 6. Проверить температуру, показываемую термопарами. К милливольтметру 17 термопары подключаются с помощью переключателя ПТИ-М-20, ручка 16 которого выведена на панель управления. Термопар, если они исправны, зарегистрируют температуру окружающей среды. После этого следует открыть вентиль охлаждающей воды 3 и убедиться в перемещении поплавка в ротаметре. Затем, тумблером 9, расположенном на блоке измерения мощности, включить «нагрев» и ручкой автотрансформатора 4 плавно установить минимальное напряжение электронагрева, регистрируемое прибором Щ-4313.

Через 15 мин после включения нагрева снять показания температур не менее 2...3-х раз через каждые 2 мин. Первый режим можно считать законченным, лишь убедившись в постоянстве показаний всех термопар на протяжении нескольких измерений.

Провести измерения температур на трех других режимах, увеличение электронагрева (напряжение задается преподавателем). Измерения на этих режимах следует начинать через 15 мин. после установки соответствующего напряжения и проводить в такой последовательности, как при первом режиме. Полученные результаты занести в таблицу 6.1.

По окончании эксперимента выключить подачу напряжения на нагреватель – тумблер 10, прибор Щ-4313 – тумблер 11, электропитание – тумблер 7, а затем закрыть вентиль подачи охлаждающей воды 3.

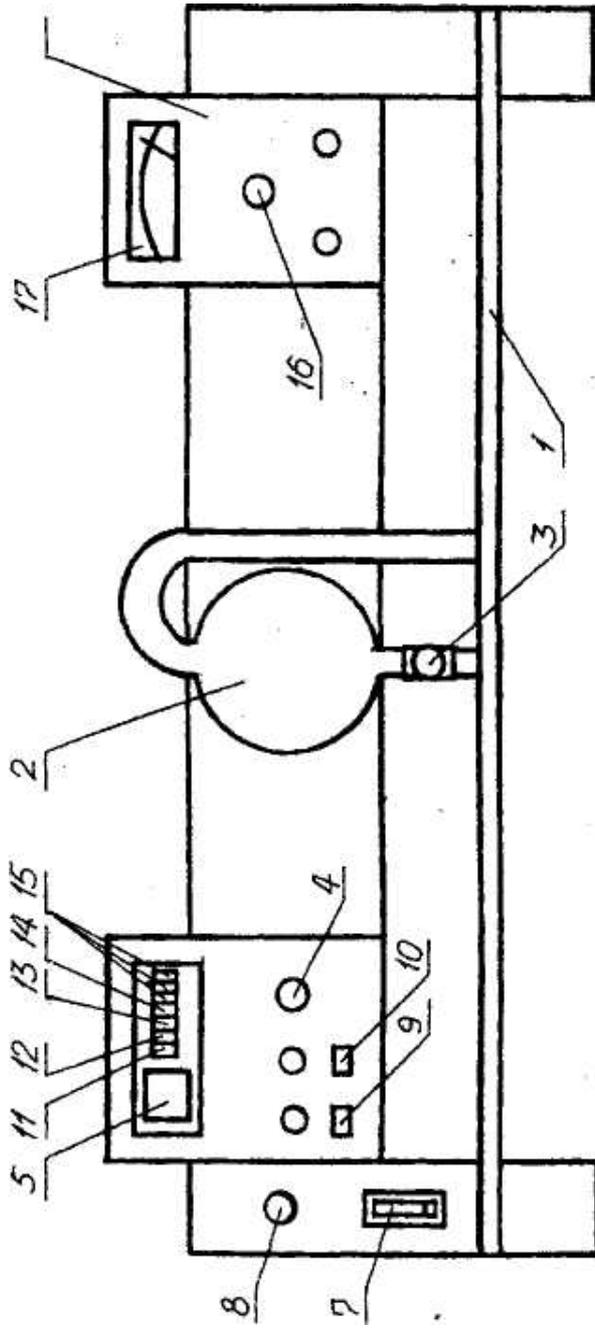


Рис.6.2. Схема установки.

1 – стол; 2 – объект исследования; 3 – вентиль; 4 – ручка автотрансформатора; 5 – вольтметр; 6 – блок температуры; 7 – тумблер электропитания; 8 – сигнальная лампа; 9 – тумблер «нагрева»; 10 – тумблер «напряжения»; 11, 12 – тумблер рода тока; 13, 14 – тумблер рода работы; 15 – кнопки выбора диапазона; 16 – переключатель термомпар; 17 – шкала прибора.

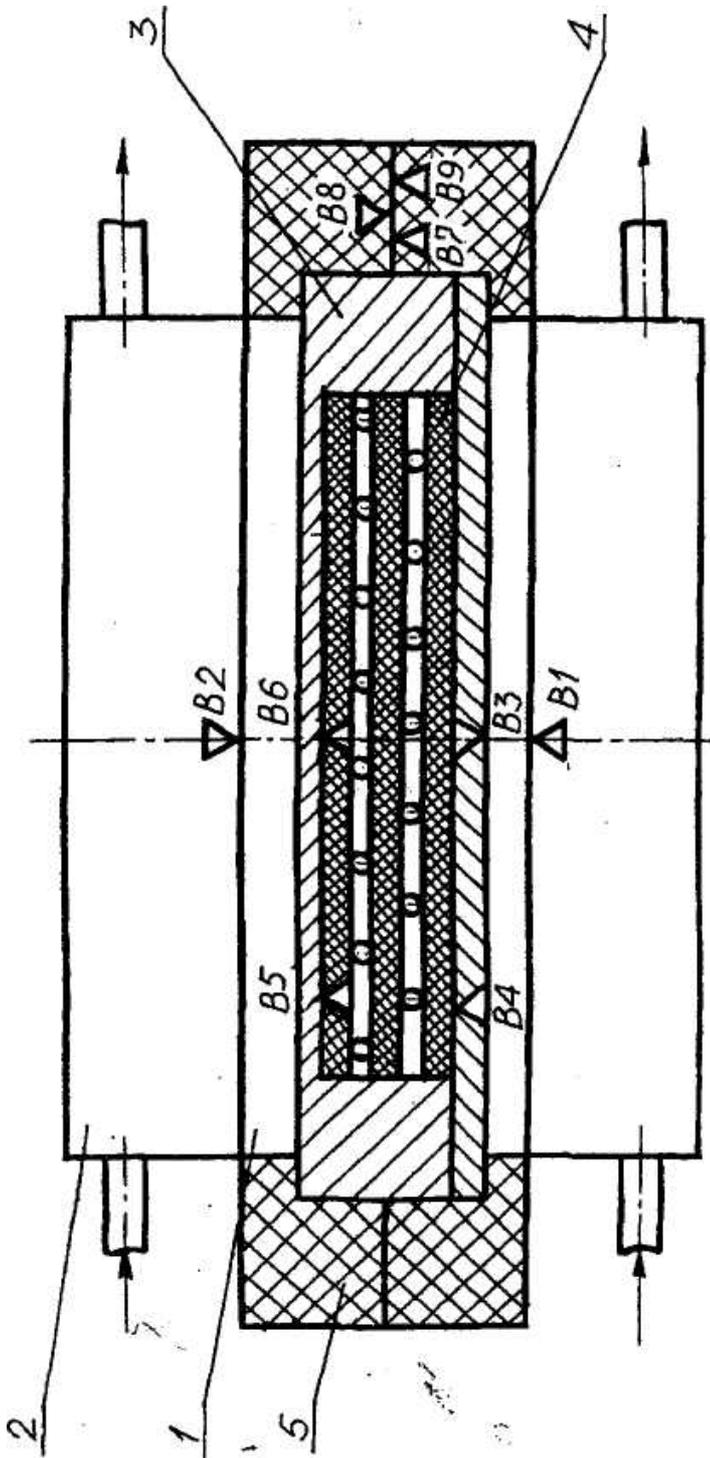


Рис. 6.3. Рабочий участок установки:

1 – образцы; 2 – холодильник; 3 – нагревательный диск; 4 – нагревательный цилиндр;  
5 – теплоизоляционный кожух.

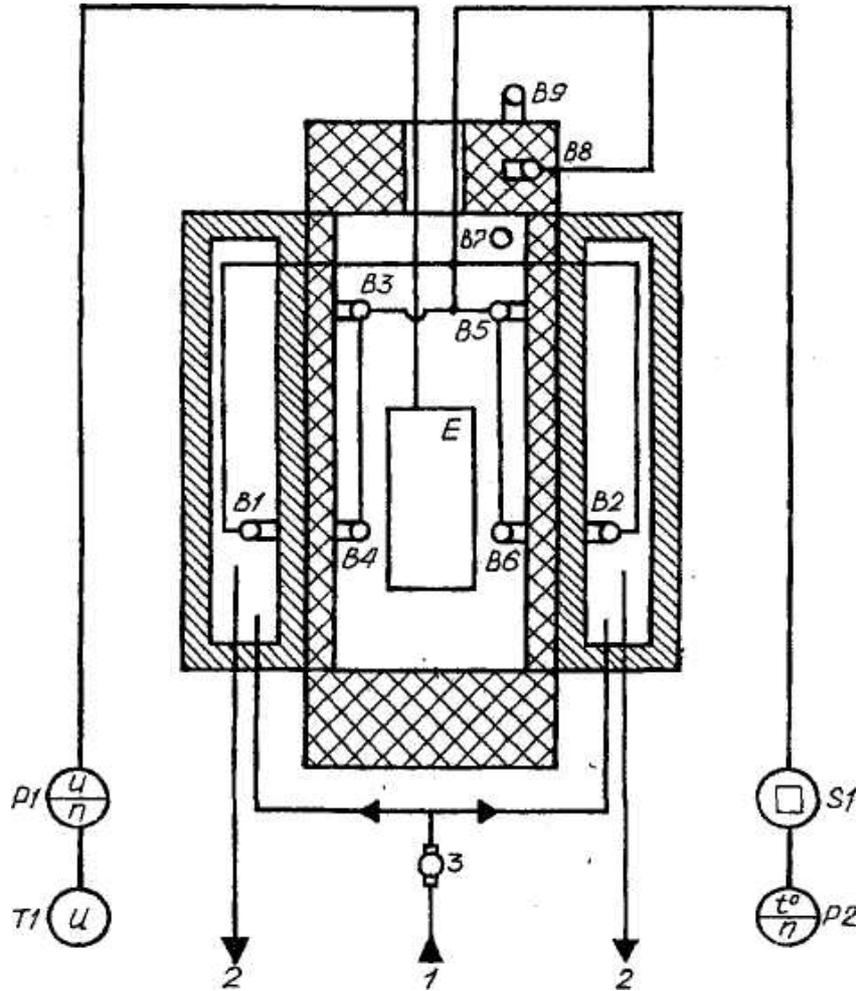


Рис. 6.4. Схема расположения термопар

### Обработка опытных данных

Для обработки результатов используются данные, полученные при установившемся тепловом режиме (таблица экспериментальных данных 6.2). Результаты расчетов заносятся в таблицу 6.3.

Коэффициент теплопроводности материала для каждого из четырех режимов вычисляется по формуле:

$$\lambda = \frac{\delta}{F} \frac{(Q - Q_{\kappa})}{t_2 - t_x}, \quad (6.11)$$

где  $Q$  – тепловой поток от нагревателя, Вт, определяется по электрической мощности, затрачиваемой на нагревание дисков:

$$Q = \frac{U^2}{R}, \quad (6.12)$$

где  $R$  – сопротивление нагревательного диска,  $\text{Ом}$ ;  $U$  – напряжение электронагрева,  $\text{В}$ ;  $Q_k$  – радиальные тепловые потери,  $\text{Вт}$ .

Средняя температура поверхности дисков со стороны нагревателя,  $^{\circ}\text{C}$ :

$$t_2 = \sum_{i=3}^6 \frac{t_i}{4}, \quad (6.13)$$

Средняя температура поверхности дисков со стороны холодильника,  $^{\circ}\text{C}$ :

$$t_x = \frac{t_1 + t_2}{2}. \quad (6.14)$$

В стационарном тепловом режиме поток, который проходит в радиальном направлении внутри пластины, должен быть равен потоку, отводимому в окружающую среду с внешней поверхности теплозащитного слоя. Теплоотдача с поверхности осуществляется механизмом свободной конвекции и излучением. В данной работе при сравнительно умеренных температурах достаточно вычислить одну составляющую теплоотдачи, а именно, за счет конвекции –  $Q_k$ .

Для расчета величины  $Q_k$  используется критериальная зависимость:

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n, \quad (6.15)$$

где  $Nu = \frac{\alpha_k d_{\text{эк}}}{\lambda_g}$  – критерий Нуссельта;  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи с внешней поверхности защитного слоя,  $\left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}} \right]$ ;  $d_{\text{эк}} = 0,06$  – наружный диаметр защитного слоя,  $\text{м}$ ;  $\lambda_g$  – коэффициент теплопроводности воздуха,  $\left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}} \right]$ ;  $Gr, Pr$  – соответственно, критерий Грасгофа и Прандтля, характеризующий данный процесс.

$$Gr = \frac{g d_{\text{эк}}^3}{\nu^2} \beta \Delta t, \quad (6.16)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха  $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ;  $\beta = (t_g + 273)^{-1}$  – коэффициент объемного расши-

рения воздуха,  $m$ ;  $\Delta t = t_k - t_e$  – разность температур наружной поверхности теплозащитного слоя и воздуха,  $^{\circ}C$ ;

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (6.17)$$

где  $a$  – температуропроводность тела,  $\frac{m^2}{c}$ .

Значения коэффициентов  $C$  и  $n$  в уравнении (6.15) определяются по таблице 6.1.

Таблица 6.1

Значение коэффициентов  $C$  и  $n$  в зависимости от  $Gr \cdot Pr$

$Gr \cdot Pr$	$C$	$n$
$1 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8
$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
$> 2 \cdot 10^7$	0,135	1/3

По рассчитанному значению критерия Нуссельта находится коэффициент теплоотдачи  $\alpha_k$  от наружной поверхности теплозащитного слоя  $F_{m.c}$  к воздуху.

Теперь можно рассчитать плотность теплового потока, отводимого свободной конвекцией по закону охлаждения:

$$Q_k = \alpha_k F_{m.c} (t_k - t_e). \quad (6.18)$$

Полученные значения коэффициента теплопроводности следует отнести к средней температуре  $t_{cp}$  исследуемого диска. Определив значения  $\lambda$  для соответствующих температурных режимов, строят зависимость и определяют значения коэффициентов  $a$  и  $v$ .

$$\lambda = a + vt_{cp}, \quad (6.19)$$

где  $t_{cp} = \frac{t_e + t_x}{2}$ ,  $^{\circ}C$ .





## Лабораторная работа № 7

2 часа

### Определение коэффициента теплоотдачи при свободном движении воздуха около горизонтального цилиндра

**Цель работы:**

- экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  при свободном движении воздуха около горизонтального цилиндра;
- построение графика зависимости критерия  $Nu$  от критериев  $(Gr \cdot Pr)$  и определение констант  $C$  и  $n$  в критериальном уравнении теплообмена.

**Задачи работы:** при различных режимах нагрева (не менее 4-х) в пределах снять показания термомпар на поверхности горизонтального цилиндра и занести их в таблицу экспериментальных данных. Найти расчетные величины для всех режимов и занести результаты в таблицу расчетных данных. Решить критериальное уравнение теплообмена  $Nu = C(Gr \cdot Pr)^n$  с определением констант  $C$  и  $n$ . Построить график зависимости критерия  $Nu$  от критериев  $(Gr \cdot Pr)$ .

**Обеспечивающие средства:** лабораторный стенд с объектом исследования в аудитории 308 – 2.

**Задание:** провести четыре серии опытов, увеличивая напряжение электронагрева. Измерения следует снимать при установившемся тепловом режиме (для этого достаточно 15 мин) не менее 2-3-х раз через каждые 2 мин. Первый режим можно считать законченным, убедившись в постоянстве показаний всех термомпар на протяжении нескольких измерений. Полученные результаты занести в таблицу. Рассчитать тепловой поток от нагревателя (горизонтальный цилиндр) к потоку воздуха и определить коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ . Вычислить критерии теплового подобия: числа  $Nu$ ,  $Pr$ ,  $Gr$ ; построить в логарифмических осях уравнения зависимостей  $\lg Nu = f(\lg Pr \cdot Gr)$  и установить величины опытных коэффициентов  $C$  и  $n$ .

**Требования к отчету:** итоги лабораторной работы должны быть представлены на бланках формата А 4 по определенной форме, графики на миллиметровой бумаге. Работы выполняются по бригадно, бригада составляет один отчет. В отчете приводится полный расчет значений для одного (любого) режима. А так же таблицы измеренных и расчетных величин и график  $\lg Nu = f(\lg Pr \cdot Gr)$ . Записать вывод. Приложить схему установки.

**Технология работы:** при подаче напряжения электронагрева и выходе на стационарный режим снять показания соответствующих термомпар и занести их в таблицу. Увеличив напряжения электронагрева и убедив-

шись в стационарности режима снять показания термопар и вновь занести их в таблицу.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что является движущей силой конвективного теплообмена?
2. Какой физический смысл имеет коэффициент теплоотдачи и от чего он зависит?
3. Почему для определения коэффициента теплоотдачи применяют теорию подобия?
4. Какие числа подобия получают из дифференциальных уравнений конвективного теплообмена?
5. Как определяется режим движения теплоносителя в условиях свободной конвекции?
6. Какова методика определения коэффициента теплоотдачи?
7. Как определяются опытные коэффициенты в критериальном уравнении?

***Библиографический список*** приводится в конце сборника описаний лабораторных работ.

## Описание лабораторной работы

### Теоретическая часть

Среди различных видов переноса теплоты (теплопроводность, конвекция, излучение), которые в большинстве случаев осуществляются одновременно, конвективный перенос во многих случаях имеет решающее значение.

При расчетах элементов теплового оборудования под *конвекцией* понимают теплообмен между поверхностью какого-либо тела и движущимся около этой поверхности теплоносителем (жидкостью или газом).

Конвективный теплообмен обусловлен совместным действием конвективного и молекулярного переноса теплоты (теплопроводности) и поэтому зависит от большого числа факторов:

- природы возникновения движения среды вдоль твердой поверхности. Различают свободное движение, обусловленное градиентом плотности слоев движущейся среды и поверхности твердого тела, и вынужденное движение, т. е. движение, вызванное действием внешних сил;

- режима движения среды. Различают ламинарный и турбулентный режимы движения. При ламинарном режиме характер течения спокойный, слоистый, без перемешивания. При турбулентном режиме движение неупорядоченное, вихревое, этот режим характеризуется непостоянством скорости движения частиц в рассматриваемой точке пространства;

- физических свойств среды;

- формы, размеров и состояния омываемой поверхности.

Теплообмен при свободном движении теплоносителя имеет большое значение во многих отраслях техники (при расчетах тепловых потерь трубопроводами и аппаратами, обмуровкой котлов и печей, отопительных и нагревательных приборов, при определении теплоотдачи строительных сооружений и т. п.).

Конвективный тепловой поток от нагретой поверхности в окружающую среду определяется по уравнению Ньютона-Рихмана (закон охлаждения):

$$Q_k = \alpha F(t_n - t_c), \quad (7.1)$$

где  $Q_k$  – мощность теплового потока, переданного конвекцией, Вт;  $F$  – поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;  $t_n$  – температура поверхности тела, °С;  $t_c$  – температура окружающей среды, °С;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°С}} \right]$ .

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  определяет интенсивность конвективного теплообмена и представляет собой мощность теплового потока, про-

ходящего через единицу поверхности ( $1 \text{ м}^2$ ) при разности температур между поверхностью и средой в 1 градус. Величина  $\alpha$  зависит от множества переменных:

$$\alpha = f(c_p, \mu, \rho, \lambda, w, \beta, t_n, t_c, \Delta t, \Gamma, \dots). \quad (7.2)$$

Таким образом, расчет мощности теплового потока, переданного конвекцией, сводится к определению коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ .

Совокупность тепловых и гидродинамических явлений, определяющих процесс теплоотдачи, описывается системой дифференциальных уравнений.

Рассмотрим физическую картину свободной конвекции воздуха около горизонтального цилиндра, рис. 7.1, для стационарного режима. Стационарный режим характеризуется постоянством температуры и скорости во всех точках рассматриваемого пространства в течение заданного времени. Выделенный элементарный объем воздуха ( $dV = dx \cdot dy \cdot dz$ ) равномерно движется вверх вследствие того, что в результате нагрева уменьшается его плотность. Архимедова подъемная сила уравновешивается силой вязкостного трения. В этом случае уравнение движения записывается в виде:

$$\rho g \beta (t_n - t_c) = \mu \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2}, \quad (7.3)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения воздуха,  $\text{К}^{-1}$ :  $\beta = \frac{1}{273 + t_c}$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости воздуха,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;  $w_z$  – скорость движения воздуха в направлении оси  $z$ ,  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

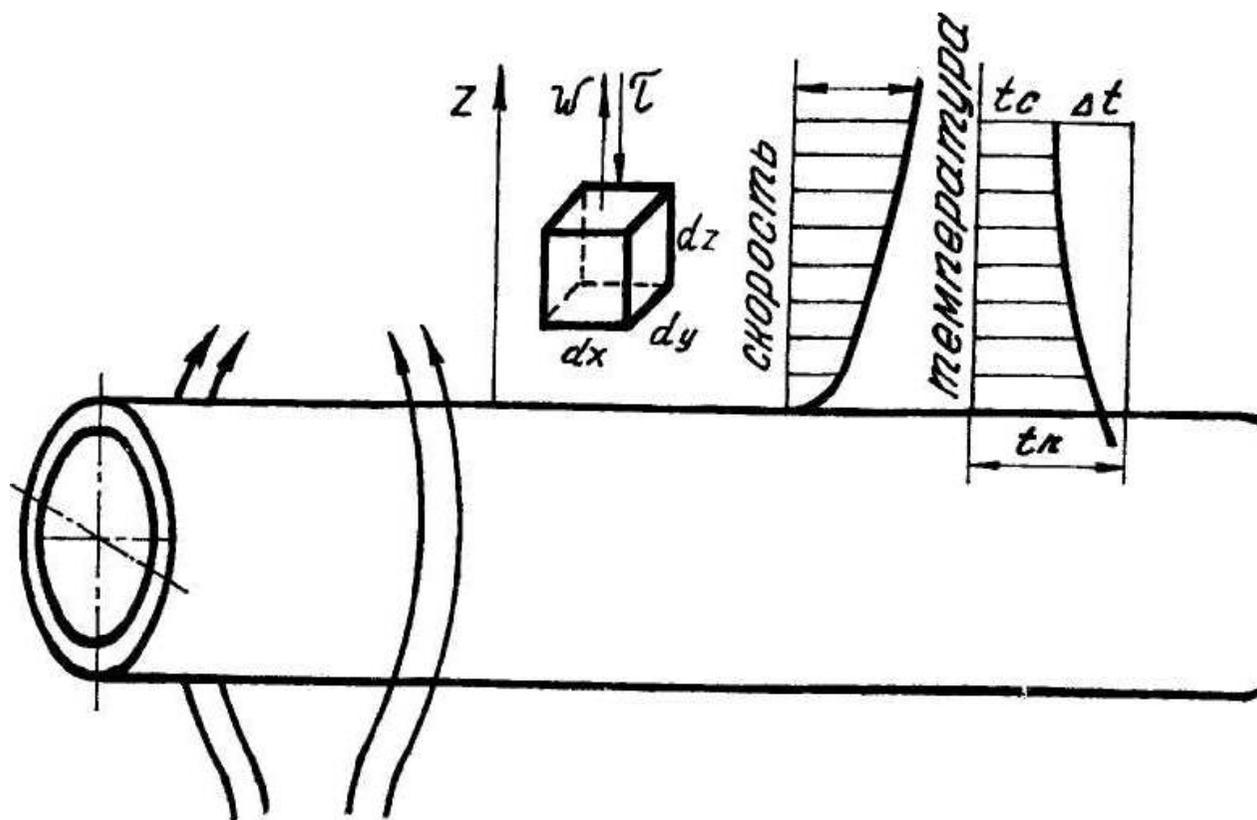


Рис. 7.1. Сводная конвекция воздуха у горизонтальной трубы

Распределение температуры внутри поднимающегося воздуха может быть выражено уравнением энергии:

$$w_z \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}; \quad (7.4)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха,  $\left[ \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C} \right]$ ;  $c_p$  – теплоемкость воздуха,  $\left[ \frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C} \right]$ .

При взаимодействии твердого тела со средой вся отводимая от поверхности теплота путем теплопроводности передается среде, и уравнение теплообмена запишется выражением

$$\alpha(t_n - t_c) = -\lambda \frac{\partial t}{\partial z}. \quad (7.5)$$

При решении конкретных задач конвективного теплообмена к системе указанных дифференциальных уравнений необходимо добавить математическое описание всех частных особенностей рассматриваемой задачи, что делает аналитическое решение практически невозможным.

Можно определить  $\alpha$  экспериментально, но в этом случае решение системы дифференциальных уравнений будет справедливо только для одного конкретного сочетания вышеуказанного множества параметров.

В таких случаях наилучшее решение дает эксперимент с обработкой его результатов в критериальном виде согласно теории подобия. *Теория подобия* – это учение о методах научного обобщения данных эксперимента и распространение их на множество подобных явлений, т. е. теория подобия позволяет распространить результаты одного опыта на случаи теплообмена геометрически подобных тел при условии равенства определяющих критериев подобия. Таким образом, основное назначение вышеприведенных дифференциальных уравнений состоит в том, что они позволяют установить вид критериев подобия. *Критерии подобия* с физической точки зрения выражают соотношения между различными физическими эффектами, характеризующими данное явление.

К критериям подобия относятся:

$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$  – критерий подобия явлений теплоотдачи (число Нуссельта);

$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}$  – критерий, учитывающий влияние физических свойств движущейся среды (число Прандтля);

$Gr = \frac{gd^3}{\nu^2} \beta \Delta t$  – критерий подобия аэродинамических сил (число

Грасгофа),

где  $d$  – диаметр трубы,  $m$ ;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости среды,  $m^2/c^2$ ;  $\Delta t$  – температурный напор (разность температуры поверхности и среды),  $^{\circ}C$ .

В общем случае свободного конвективного теплообмена критериальная зависимость имеет вид:

$$Nu = \varphi(Gr \cdot Pr). \quad (7.6)$$

Произведение  $(Gr \cdot Pr)$  характеризует режим движения теплоносителя.

Связь между критериями представляется обычно в виде степенной функции. Теория подобия описывает теплоотдачу от горизонтальных труб при свободном движении воздуха следующим уравнением:

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n. \quad (7.7)$$

Коэффициент  $C$  и показатель степени  $n$  определяют по данным серии опытов при различных значениях температурного напора  $\Delta t$ .

Логарифмируя уравнение (7.7), получим выражение

$$\lg Nu = \lg C + n \lg(Gr \cdot Pr), \quad (7.8)$$

график которого представляет собой прямую линию.

### Описание установки

Установка предназначена для изучения явления теплоотдачи при естественной конвекции около горизонтального цилиндра. Работа основана на измерении количества тепла  $Q$ , передаваемого поверхностью  $F$  нагретой теплообменной трубки (горизонтального цилиндра) в окружающую среду, измерении разности температур  $\Delta t$  между поверхностью трубки и окружающей средой с последующим вычислением коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ .

Схема установки, рис. 7.2, состоит из лабораторного стола 1 с вертикальной панелью, на котором в горизонтальном положении крепится объект исследования 2, представляющий собой тонкостенную трубу, изготовленную из нержавеющей стали с наружным диаметром 25 мм и длиной 860 мм.

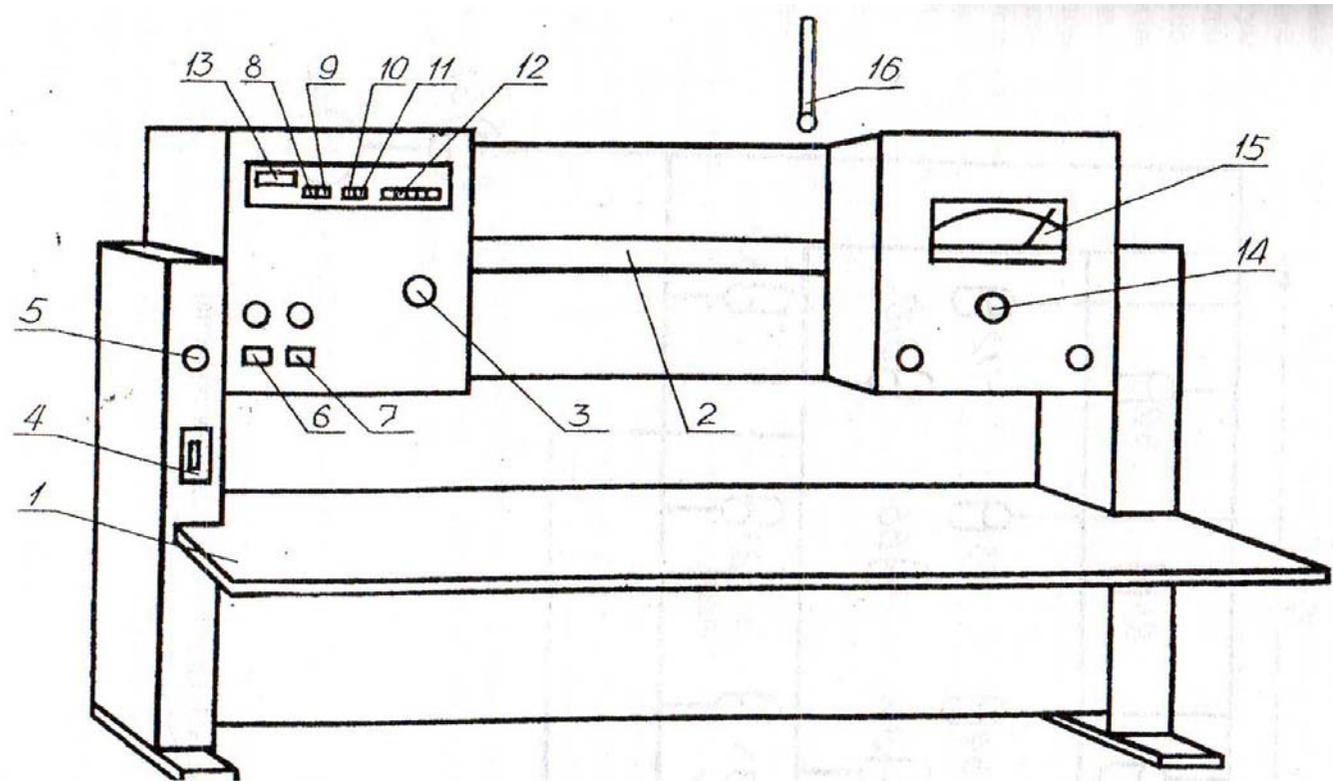


Рис. 7.2. Схема установки:

1 – стол; 2 – объект исследования; 3 – ручка автотрансформатора; 4 – тумблер электропитания;  
 5 - сигнальная лампочка; 6 – тумблер «нагрев»; 7 – тумблер «напряжение»; 8, 9 – тумблер «род тока»;  
 10, 11 – тумблер «род тока»; 12 – кнопки выбора диапазона измерений; 13 – вольтметр;  
 14 – переключатель терморпар; 15 – шкала прибора; 16 – термометр

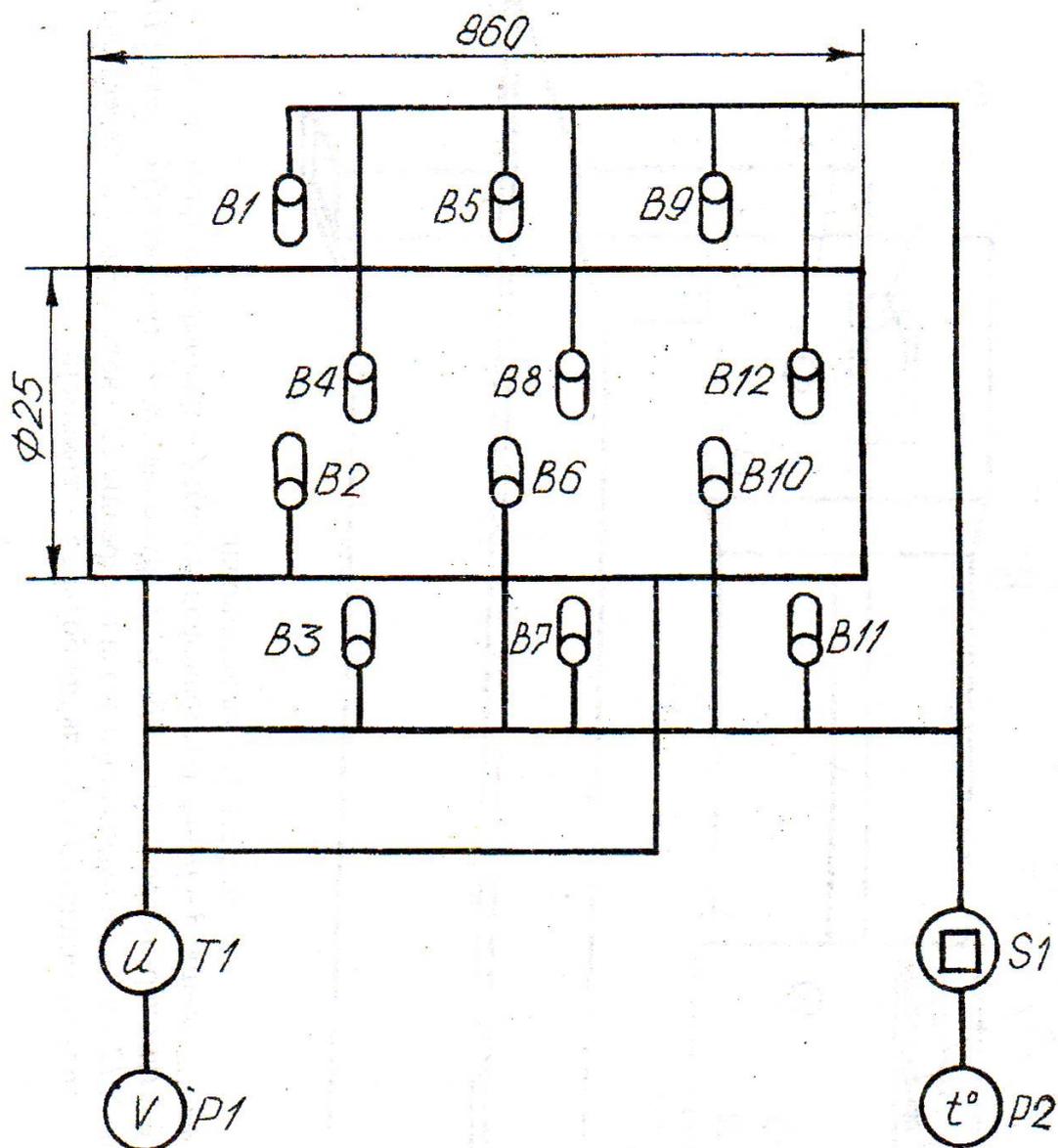


Рис. 7.3. Схема расположения термопар

Для измерения температуры наружной поверхности трубы равномерно по всей длине ее расположены 12 термопар марки ТХК с угловым сдвигом  $60^\circ$ , рис. 7.3. Холодные спаи всех термопар выведены на переключатель термопар 14. Труба нагревается током низкого напряжения. Электропитание подводится через латунные зажимы, установленные на концах трубы. Торцы нагревательной трубы теплоизолированы, электрическое сопротивление испытуемой трубы составляет  $R = 0,0142 \text{ Ом}$ . Падающее напряжение на рабочем участке регулируется лабораторным автотрансформатором Т1 и измеряется комбинированным прибором Щ-4313. ТермоЭДС термопар измеряется милливольтметром МВУ-41А, отградуированным в  $^\circ\text{C}$  и соединенным с термопарами через переключатель S1.

Милливольтметр снабжен автоматическим устройством КТ-3 для автоматической компенсации изменения термоЭДС, вызываемой отклонениями температуры от градуировочной.

### Методика проведения работы

Вывести против часовой стрелки ручку автотрансформатора 3 в нулевое положение и включить тумблером 4 электропитание установки (загорается сигнальная лампочка 5). Тумблером 6, расположенным на блоке измерения мощности, включить "НАГРЕВ". Включить питание прибора Щ-4313 с помощью тумблера 8 и тумблером 9 установить род подаваемого напряжения. С помощью тумблеров 10 и 11 установить род работы. Выбрать диапазон измерений, соответствующий ожидаемому значению измеряемой величины, а если оно неизвестно – наибольший диапазон измерений (для выбора диапазона измерений на лицевой панели имеются соответствующие кнопки переключателя 12). С помощью ручки автотрансформатора 3 установить по вольтметру 13 падение напряжения на рабочем участке, равное 0,5-0,6 В, и через 10–15 мин, когда установится стационарный тепловой режим, провести измерения температур всех термпар с помощью переключателя 14 и показаний соответствующих значений термпар по шкале прибора 15.

Для перехода на новый тепловой режим надо изменить расход электроэнергии при помощи ручки автотрансформатора 3, выждать наступление установившегося режима и снова произвести измерения температур. Для выполнения работы в полном объеме необходимо провести опыты при четырех различных режимах ( $U = 0,5...1,0$  В). Температура окружающего воздуха измеряется вдали от испытуемой трубы с помощью ртутного термометра 16. Результаты опытов заносятся в таблицу 7.1.

По окончании работы выключить тумблер подачи напряжения 7 на рабочем участке и вывести ручку автотрансформатора 3 в нулевое положение, а затем выключить прибор Щ-4313, отключить блок температур и подачу электропитания на установку.

Во время проведения эксперимента необходимо исключить возможное движение воздуха в лаборатории. Не рекомендуется ходить по лаборатории, окна и двери держать закрытыми и т. д.

### Обработка опытных данных

Для обработки результатов можно использовать лишь данные, полученные при установившемся тепловом режиме системы.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  вычисляется по уравнению 7.1. Количество тепла, передаваемое от наружной поверхности трубы путем конвекции, определяется из равенства:

$$Q_k = Q - Q_l, \quad (7.9)$$

где  $Q$  – результирующий тепловой поток, равный при стационарном режиме мощности нагревателя, Вт:

$$Q = \frac{\Delta U^2}{R} \quad (7.10)$$

где  $\Delta U$  – падение напряжения на рабочем участке, В;  $R$  – электрическое сопротивление рабочего участка, Ом.

Количество тепла  $Q_l$ , Вт, передаваемое путем теплового излучения, определяется по уравнению Стефана-Больцмана:

$$Q_l = C_{np} \left[ \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 \right] F, \quad (7.11)$$

где  $C_{np}$  – приведенный коэффициент излучения системы тел,  $\left[ \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4} \right]$ ,  $T_c$ ,  $T_n$  – абсолютные температуры окружающей среды и поверхности трубы, соответственно, К.

Так как поверхность окружающих тел во много раз больше, чем поверхность опытной трубы, то можно принять, что приведенный коэффициент излучения равен коэффициенту излучения трубы  $C_{np} = C$ .

Для нагревательной трубы, выполненной из нержавеющей стали, можно принять  $C = 0,6 \left[ \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4} \right]$ .

В качестве расчетной температуры опытной трубы принимается средняя арифметическая величина из измерений в 10 точках. Показания крайних термопар 1 и 12 при усреднении температуры поверхности цилиндра не учитываются.

Параметры воздуха, входящие в критерии подобия, находятся при средней температуре пограничного слоя

$$t_{n.cл} = \frac{t_n + t_c}{2} \quad (7.12)$$

и для обработки опытных результатов в критериальном виде выбираются из таблицы 7.3.

После определения физических параметров воздуха вычисляются критерии  $Nu$ ,  $Gr$ ,  $Pr$ .

Полученные значения критериев наносятся на график в логарифмических координатах в виде зависимости (7.8), и через точки (метод наименьших квадратов) проводят прямую. Это уравнение прямой линии в логарифмических координатах, где по оси абсцисс отложены значения  $\lg(Gr \cdot Pr)$ , а по оси ординат  $\lg Nu$ . В результате построения логарифмической зависимости определяют коэффициенты  $C$  и  $n$ , где постоянная  $n$  определяется тангенсом угла наклона прямой к оси абсцисс, а постоянная  $C$  находится из соотношения для любой точки прямой

$$C = \frac{Nu}{(Gr \cdot Pr)^n}.$$

Уравнение (7.7) справедливо для подобных явлений в интервале измеренных значений произведений  $Gr \cdot Pr$ .

Результаты расчетов заносят в таблицу 7.2.



Таблица 7.3

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУХОГО ВОЗДУХА ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Темпера- тура, $t, ^\circ C$	Плотность, $\rho,$ $кг/м^3$	Теплоемкость, $c_p,$ $Дж/кг \cdot ^\circ C$	Теплопровод- ность, $\lambda \cdot 10^2,$ $Вт/(м \cdot ^\circ C)$	Динамическая вязкость, $\mu \cdot 10^6, Па \cdot с$	Кинематиче- ская вязкость, $\nu \cdot 10^6, м^2/с$	Критерий Прандтля, Pr
0	1,293	1,005	2,44	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	21,2	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	21,9	23,13	0,688

## Лабораторная работа № 8

4 часа

### Изучение теплопередачи в теплообменнике типа «труба в трубе»

**Цель работы:**

- практическое ознакомление с работой теплообменного аппарата;
- экспериментальное определение коэффициента теплопередачи  $K_{on}$  от нагретого теплоносителя к холодному и сравнение опытного значения с расчетным  $K_p$  с построением корреляционного графика.

**Задачи работы:**

Рассчитать величину коэффициента теплопередачи  $K_{on}$  (при 4-х режимах теплового потока) как при прямоточной так и при противоточной схемах движения теплоносителей. Определить расчетный коэффициент теплопередачи  $K_p$  в этих же режимах движения теплоносителя. Построить корреляционные графики  $K_{on}$  и  $K_p$  при прямоточной схеме и противоточной схеме движения теплоносителей и сделать соответствующие выводы.

**Обеспечивающие средства:** лабораторный стенд теплообменник типа «труба в трубе» в аудитории 10–2 в составе:

- теплообменник «труба в трубе» с запорно-регулируемой арматурой;
- циркуляционный насос;
- бак с электрическими тэнами;
- электронный контроллер, компьютер, термодатчики.

**Задание:** снять тепловые характеристики (при 4-х режимах движения теплоносителей) при прямоточной и противоточной схемах. Пользуясь тарировочным графиком определить количественные показатели режимов движения теплоносителей. Рассчитать все величины для всех режимов. Определить значения коэффициентов теплопередачи  $K_{on}$  для всех режимов. Определив характер режима движения теплоносителей, решить соответствующие этим режимам критериальные уравнения с целью определения коэффициента теплоотдачи со стороны горячего теплоносителя  $\alpha_1$  и холодного теплоносителя  $\alpha_2$ . Далее вычислить значения коэффициентов теплопередачи  $K_p$ . Изобразить графически значения  $K_{on}$  и  $K_p$  в зависимости от расходов потока теплоносителей при прямоточной и противоточной схемах.

**Требования к отчету:** итоги лабораторной работы должны быть представлены на бланках формата А 4 по определенной форме, графики на миллиметровой бумаге. Работы выполняются по бригадно, бригада составляет один отчет. В отчете должен быть приведен расчет по одному из режимов при прямоточной схеме и противоточной схеме, таблицы измерен-

ных и рассчитанных величин и корреляционные графики  $K_{on}$  и  $K_p$  в зависимости от величины потока теплоносителей. Написать вывод. Приложить схему установки.

**Технология работы:** изучить описание установки и методику проведения лабораторной работы. Снять тепловые характеристики (при 4-х режимах движения теплоносителей) при прямоточной и противоточной схемах. Значения параметров занести в таблицу экспериментальных данных. Найти расчетные величины для всех режимов и результаты занести в таблицу расчетных данных. Определить значения коэффициентов теплопередачи  $K_{оп}$  для всех режимов. Определить характер режима движения теплоносителей.

### **Контрольные вопросы**

1. Принцип действия теплообменных аппаратов.
2. Как осуществляется процесс теплопередачи в теплообменнике «труба в трубе»?
3. Для каких условий записаны уравнения тепловых балансов теплоносителей?
4. Какая разность температур входит в уравнение теплоотдачи, какая – в уравнение теплопередачи?
5. Что собой представляют критериальные уравнения?
6. Каков физический смысл коэффициента теплоотдачи и коэффициента теплопередачи?
7. Как вычисляются средние скорости теплоносителей?
8. Почему в работе расчет коэффициента теплопередачи через цилиндрическую поверхность можно вычислять как для плоской стенки?
9. Где выше движущая сила теплопередачи – в прямоточной или противоточной схемах движения теплоносителей?
10. Что собой представляет стационарный режим теплопередачи?

**Библиографический список** приводится в конце сборника описаний лабораторных работ.

## Описание лабораторной работы

### Теоретическая часть

Передача тепла от одного вещества – теплоносителя – к другому осуществляется в аппаратах, называемых *теплообменниками*. Теплообменные аппараты многочисленны по своему технологическому назначению и конструктивному оформлению весьма разнообразны. По принципу действия они могут быть разделены на рекуперативные, регенеративные и смешительные.

*Регенеративными* называются такие аппараты, в которых одна и та же поверхность нагрева омывается то горячим, то холодным теплоносителем. При протекании горячей жидкости теплота воспринимается стенками аппарата и в них аккумулируется; при протекании холодной жидкости эта аккумулированная теплота ею воспринимается.

В смешительных аппаратах процесс теплопередачи происходит путем непосредственного соприкосновения и смешения горячего и холодного теплоносителей.

*Рекуперативными* называются такие аппараты, в которых теплота от горячего теплоносителя к холодному передается через разделяющую их стенку. Примером такого рекуперативного теплообменного аппарата является теплообменник труба в трубе", состоящий из двух концентрических труб разных диаметров, рис. 8.1. По внутренней трубе проходит один теплоноситель, по кольцевому межтрубному пространству – другой. Тепло передается через стенку внутренней трубы.

Горячий теплоноситель непрерывно поступает во внутреннюю трубу и отдает тепло холодному теплоносителю, движущемуся в кольцевом межтрубном пространстве теплообменника.

Теплоноситель, проходящий по внутренней трубе, охлаждается от начальной температуры  $t_1'$  до  $t_1''$ , а холодный нагревается от начальной температуры  $t_2'$  до конечной  $t_2''$ , рис. 8.2.

*Термическое сопротивление.* Выделим в некотором месте внутренней трубы теплообменника бесконечно малый кольцевой участок поверхности  $dF$ , рис. 8.1. Пусть в этом месте температура горячего теплоносителя внутри трубы будет  $t_1$ , а температура холодного теплоносителя снаружи трубы будет  $t_2$ . Тогда для установившегося процесса передача тепла от горячего к холодному теплоносителю через участок поверхности  $dF$  можно написать следующие уравнения:

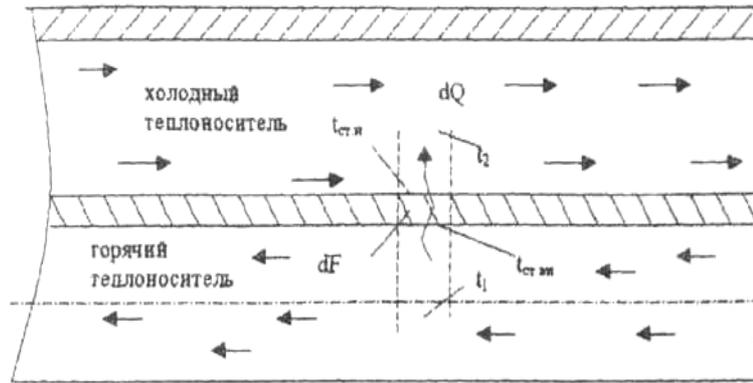


Рис. 8.1. Схема процесса теплопередачи

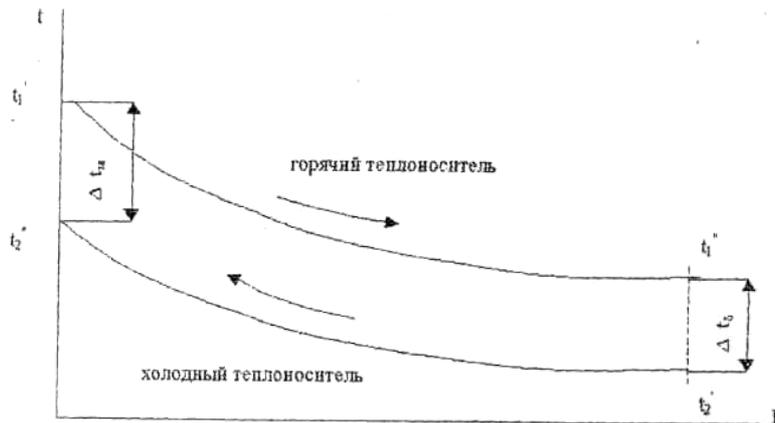


Рис. 8.2. Изменение температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена (противоток)

1. Уравнение теплоотдачи – перехода теплоты от горячего теплоносителя к внутренней поверхности стенки трубы:

$$dQ = \frac{t_1 - t_{ст.вн.}}{r_1} dF. \quad (8.1)$$

2. Уравнение теплопроводности – перехода тепла через стенку трубы, состоящую из нескольких слоев (слой так называемого водяного камня, или накипи, внутренний слой ржавчины, сталь, наружный слой ржавчины):

$$dQ = \frac{t_{ст.вн.} - t_{ст.н.}}{\sum r_{ст}} dF. \quad (8.2)$$

3. Уравнение теплоотдачи – перехода тепла от наружной поверхности стенки трубы к холодному теплоносителю:

$$dQ = \frac{t_{cm.н.} - t_2}{r_2} dF . \quad (8.3)$$

В этих уравнениях:  $dQ$  – расход передаваемого тепла,  $Bm$ ;  $t_{cm.вн.}$ ,  $t_{cm.н.}$  – температуры внутренней и наружной поверхности трубы,  $^{\circ}C$ ;  $r_1$  – термическое сопротивление при переходе тепла от горячего теплоносителя к внутренней поверхности трубы,  $m^2 \cdot ^{\circ}C / Bm$ ;  $r_2$  – термическое сопротивление при переходе тепла от наружной поверхности трубы к холодному теплоносителю,  $m^2 \cdot ^{\circ}C / Bm$ ;  $\sum r_{cm}$  – сумма термических сопротивлений слоев, из которых состоит стенка,  $m^2 \cdot ^{\circ}C / Bm$ .

Поверхность  $dF$  во всех трех уравнениях принята одинаковой, т. е. стенка считается плоской, что допустимо, когда толщина стенки мала по сравнению с диаметром.

Из уравнений (8.1) – (8.3) получаем *уравнение теплопередачи* – перехода тепла от горячего теплоносителя к холодному:

$$dQ = \frac{t_1 - t_2}{r_1 + \sum r_{cm} + r_2} dF = \frac{t_1 - t_2}{R} dF , \quad (8.4)$$

где  $R = r_1 + \sum r_{cm} + r_2$  - общее термическое сопротивление при переходе тепла от горячего теплоносителя к холодному через стенку трубы.

При расчетах вместо термических сопротивлений  $r_1$  и  $r_2$  пользуются обратными величинами

$$\alpha_1 = \frac{1}{r_1} \text{ и } \alpha_2 = \frac{1}{r_2} ,$$

которые называются *коэффициентами теплоотдачи*, соответственно для горячего и холодного теплоносителей и имеют размерность  $Bm / (m^2 \cdot ^{\circ}C)$ , а  $r_{cm} = \frac{\delta}{\lambda_{cm}}$  ( $\delta$  – толщина стенки,  $m$ ;  $\lambda_{cm}$  – теплопроводность стенки,  $Bm / (m \cdot ^{\circ}C)$ )

При этом уравнения теплоотдачи (8.1) и (8.3) получают вид:

$$dQ = \alpha_1 (t_1 - t_{cm.вн.}) dF , \quad (8.5)$$

$$dQ = \alpha_2 (t_{cm.н.} - t_2) dF , \quad (8.6)$$

Величина, обратная общему термическому сопротивлению  $R$ , называется коэффициентом теплопередачи  $K$ :

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (8.7)$$

Для всего теплообменника с поверхностью теплопередачи  $F$ ,  $m^2$ , в котором расход передаваемого тепла составит  $Q$ ,  $Вт$ , интегрирование уравнения (8.4) приводит к уравнению теплопередачи следующего вида:

$$Q = K F \Delta t_{cp}, \quad (8.8)$$

где  $\Delta t_{cp}$  – средняя движущая сила процесса теплопередачи в теплообменнике (средняя разность температур горячего и холодного теплоносителей), определяется уравнением:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_m}}. \quad (8.9)$$

Здесь  $\Delta t_{\delta} = t_1' - t_2'$ ;  $t_m = t_1'' - t_2''$ .

Эти разности температур представляют собой движущие силы процесса теплопередачи на концах теплообменника - на входе и на выходе (при прямо точной схеме движения теплоносителей) и  $t_{\delta} = t_1'' - t_2''$  и  $t_m = t_1' - t_2'$  - при противоточной схеме движения теплоносителей, рис. 8.2.

Если  $\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_m} \leq 1,7$ , то с достаточной точностью можно считать

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_m}{2}. \quad (8.10)$$

Расход тепла  $Q$  в уравнении (4.8) рассчитывают по формуле:

$$Q = Q_1 = G_1 C_{p1} (t_1' - t_1'') = Q_2 = G_2 C_{p2} (t_2'' - t_2'), \quad (8.11)$$

где  $Q_1$ ,  $Q_2$  – количество теплоты, отданное горячим и воспринятое холодным теплоносителем, Вт;  $G_1$ ,  $G_2$  – массовые расходы горячего и холодного теплоносителей, кг/с;  $C_{p1}$ ,  $C_{p2}$  – средние удельные массовые теплоемкости теплоносителей при постоянном давлении, Дж/(кг·°С);  $t_1'$ ,  $t_1''$  – температуры

горячего теплоносителя на входе и выходе из аппарата,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_2', t_2''$  – температуры холодного теплоносителя на входе и выходе из аппарата,  $^{\circ}\text{C}$ .

В работе для определения теоретического значения коэффициента теплопередачи  $K$  необходимо расчетным путем найти коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , которые зависят от большого числа переменных, обуславливающих протекание процесса (физических параметров и характера движения теплоносителей, формы и размеров поверхности нагрева и т. п.).

Эти коэффициенты теплоотдачи могут быть получены с помощью уравнений, связывающих между собой обобщенные безразмерные переменные, характеризующие процесс и называемые критериями подобия.

При совместном свободно-вынужденном движении потока жидкости по прямому каналу или трубе без изменения агрегатного состояния обобщенная критериальная зависимость для определения коэффициента теплоотдачи имеет вид

$$Nu = f(Re, Pr, Gr), \quad (8.12)$$

где  $Nu = \frac{\alpha d_{\text{эк}}}{\lambda}$  – критерий Нуссельта;  $Re = \frac{wd_{\text{эк}}\rho}{\mu}$  – критерий Рейнольдса;

$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}$  – критерий Прандтля;  $Gr = \frac{gd_{\text{эк}}^3}{\nu^3} \beta \Delta t$  – критерий Грасгофа.

Здесь  $d_{\text{эк}}$  – эквивалентный диаметр трубопровода, м;  $w$  – средняя скорость теплоносителя в трубопроводе (или канале), м/с;  $\rho$  – плотность теплоносителя при средней температуре, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – вязкость теплоносителя при средней температуре, Па·с;  $c_p$  – удельная массовая теплоемкость при средней температуре, Дж/кг· $^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda$  – теплопроводность теплоносителя при средней температуре, Вт/(м· $^{\circ}\text{C}$ );  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости при средней температуре, м<sup>2</sup>/с;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения теплоносителя,  $\text{K}^{-1}$ ;  $\Delta t$  – температурный напор (разность температур поверхности стенки и теплоносителя омывающего эту стенку),  $^{\circ}\text{C}$ .

Для расчета выбирается критериальное уравнение в зависимости от режима движения теплоносителя в аппарате.

При ламинарном режиме движения внутри прямых гладких труб ( $Re_1 < 2320$ ):

$$Nu_1 = 0,25 \left( Re_1 \frac{d_{\text{вн}}}{l} \right)^{0,4} Pr_1^{0,33} \left( \frac{Pr_1}{Pr_{\text{cm1}}} \right)^{0,25}, \quad (8.13)$$

где  $d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр трубы, м;  $l$  – длина внутренней трубы, м;  $\left(\frac{Pr_1}{Pr_{\text{cm1}}}\right)^{0,25}$  – множитель, учитывающий зависимость физических свойств (в основном вязкости) от температуры и влияние направления теплового потока. При нагревании капельной жидкости  $\left(\frac{Pr_1}{Pr_{\text{cm1}}}\right) > 1$ , при охлаждении  $\left(\frac{Pr_1}{Pr_{\text{cm1}}}\right) < 1$ .

При *переходном* режиме ( $2320 < Re_1 < 10^4$ ):

$$Nu_1 = 0,008 Re^{0,9} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr_1}{Pr_{\text{cm1}}}\right)^{0,25}. \quad (8.14)$$

При *турбулентном* режиме ( $Re_1 \geq 10$ ):

$$Nu_1 = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \left(\frac{Pr_1}{Pr_{\text{cm1}}}\right)^{0,25}, \quad (8.15)$$

Теплоотдача при движении теплоносителя между коаксиальными трубами (в кольцевом канале), если наружный диаметр внутренней трубы, омываемый теплоносителем, равен  $d_n$ , а внутренний диаметр внешней трубы равен  $D_{\text{вн}}$ , описывается следующими критериальными уравнениями.

При *ламинарном* режиме движения ( $Re_2 < 2320$ ):

$$Nu_2 = 0,17 (Re_2 \cdot Pr_2)^{0,33} (Gr_2 \cdot Pr_2)^{0,1} \left(\frac{Pr_2}{Pr_{\text{cm2}}}\right)^{0,25}. \quad (8.16)$$

При *переходном* режиме ( $2320 < Re_2 < 10^4$ )

$$Nu_2 = 0,037 Re_2^{0,75} Pr_2^{0,4} \left(\frac{\mu_2}{\mu_{\text{cm2}}}\right)^n, \quad (8.17)$$

где  $\mu_2$  – динамический коэффициент вязкости теплоносителя при средней температуре в кольцевом зазоре, Па·с;  $\mu_{\text{cm2}}$  – динамический коэффициент вязкости теплоносителя при температуре стенки ( $t_{\text{cm}} = 0,5(t_1 + t_2)$ ;  $t_1 = t_1' - t_1''$  и  $t_2 = t_2'' - t_2'$ ), Па·с;  $n = 0,11$  при нагревании и  $n = 0,25$  при охлаждении.

При турбулентном режиме ( $Re_2 > 10^4$ ):

$$Nu_2 = Nu_\infty \left( 1 - \frac{0,45}{2,4 + Pr_2} \right) \frac{D_{вн}}{d_n}, \quad (8.18)$$

где  $Nu_\infty$  выбирается из таблицы 8.1.

Таблица 8.1

$D_{вн}/d_n$	10	5	2,5	1,7	1,25	1,0
$Nu_\infty$	4,1	4,18	4,33	4,5	4,7	4,86

В уравнениях (8.16) – (8.18) определяющим геометрическим размером является  $d_{эк} = D_{вн} - d_n$ ; определяющей температурой в критериальных уравнениях (8.13)–(8.18) служит средняя температура каждого из теплоносителей.

Выражая среднюю скорость жидкости через ее расход для теплоносителя, движущегося по внутренней трубе,

$$w_1 = \frac{G_1}{0,785 d_{вн}^2 \rho_1}, \quad (8.19)$$

а для теплоносителя, движущегося по кольцевому каналу,

$$w_2 = \frac{G_2}{0,785 (D_{вн}^2 - d_n^2) \rho_2}, \quad (8.20)$$

их следует подставить в выражения критериев Рейнольдса  $Re_1$  и  $Re_2$ , соответственно.

### Описание установки

Схема установки представлена на рис. 8.3. Теплообменник "труба в трубе" 7 состоит из четырех секций, расположенных вертикально и покрытых теплоизоляцией. Стальные трубы теплообменника имеют диаметр: наружные – 57х3,5 мм, внутренние – 21х3 мм. Нагрев воды осуществляется в термостате 2 за счет электрических ТЭНов 3 мощностью 9,6 кВт. Нагретая вода с помощью насоса 4 подается во внутреннюю трубу теплообменника. Расход горячей воды регулируется вентилем 15 и измеряется ротаметром 5. Холодный поток воды из водопровода поступает непосредственно в теплообменник и движется по кольцевому зазору между наружной поверхностью внутренней трубы и внутренней поверхностью внешней трубы.

При этом направление холодной воды можно изменять с помощью регулятора потока 7, что позволяет организовать прямоток или противоток.

Расход холодной воды регулируется вентилем 14 и измеряется ротаметром 6. При этом холодный поток нагревается, а горячий охлаждается. Температуры горячего и холодного теплоносителей на входе и выходе их теплообменника измеряют с помощью термометров сопротивлений I – IV. Показания температур и тепловых нагрузок со стороны горячего и холодного теплоносителей через специальное устройство – контроллер 8 выведены на экран монитора компьютера 9. На пульте управления 10 расположены тумблера и кнопки включения электрических ТЭНов, двигателя насоса и компьютера.

Температурные датчики 11 служат для поддержания теплового режима горячего теплоносителя с помощью электрических ТЭНов.

### **Методика проведения работы**

В начале работы открывают вентиль 12 на сливе холодной воды, и с помощью вентиля 13 и 14 подают холодную воду в теплообменник и устанавливают максимальный расход по ротаметру 6. После чего с помощью тумблеров включают электрические ТЭНы 3, работа которых сигнализируется контрольными лампочками 16 на магнитном пускателе 17. Нагрев воды в термостате 2 до температуры порядка 80...90°C происходит в течение 30...40 мин. Подачу воды на линии горячего теплоносителя в теплообменник с помощью насоса 4 производят одновременно с включением ТЭНов, что позволяет ускорить получение заданного температурного режима в системе термостат-теплообменник. При этом также с помощью вентиля 14 задают максимальный расход холодного теплоносителя по ротаметру 6. Температурный режим в работе контролируется на мониторе компьютера.

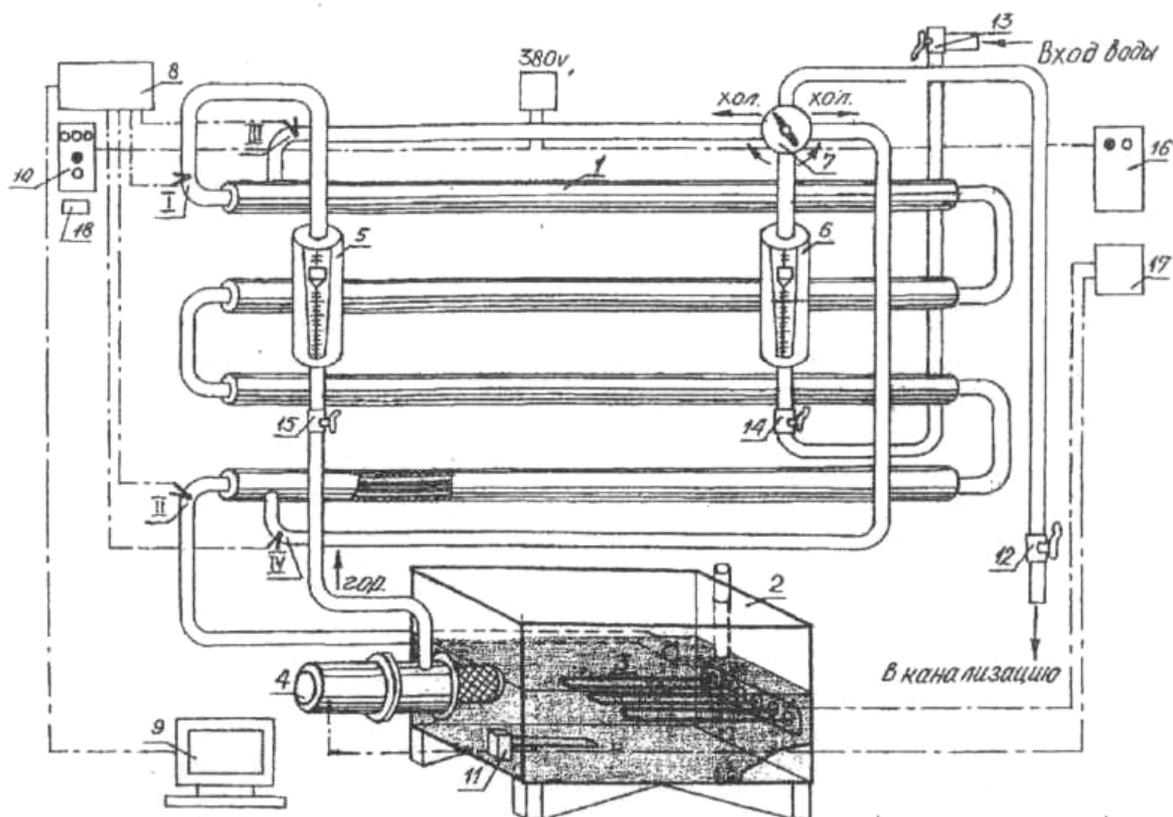


Рис. 8.3. Схема установки:

1 – теплообменник "труба в трубе"; 2 – термостат; 3 – электрические ТЭНы; 4 – насос; 5, 6 – ротаметры; 7 – регулятор потока; 8 – контроллер; 9 – монитор компьютера; 10 – пульт управления; 11 – температурные датчики; 12–15 – вентили; 16 – контрольные лампочки; 17 – магнитный пускатель; 18 – щитовой выключатель

После выхода установки на стационарный режим, регулятором потока 7 задают прямоточное направление движения теплоносителей, расходы их устанавливают минимальными и по возможности одинаковыми. Выход на заданный режим происходит в течение 5...10 мин. После чего, снимаются показания температур теплоносителей, расходов по тарифовочным графикам (приведены на стенде), тепловых нагрузок и данные заносятся в таблицу 8.2. Далее устанавливается следующий режим по расходам теплоносителей с помощью ротаметров и в той же последовательности снимаются показания. Проведя 5...6 режимов работы теплообменного аппарата по прямоточной схеме, переходят на противоточную и вновь выполняют эксперимент по той же методике. Все снятые показания заносятся в отчетную таблицу 8.2. После завершения работы отключаются ТЭНы, насос и закрываются вентили на потоках теплоносителей. Работа компьютера отключается с помощью щитового выключателя 18.





### Обработка опытных данных и составление отчета

Величину коэффициента теплопередачи  $K_{on}$  рассчитывают для различных значений теплового потока при прямоточной и противоточной схемах движения теплоносителей по уравнению (8.8) и заносят в отчетную таблицу 8.3. При этом теплопередающая поверхность  $F$  рассчитывается по среднему диаметру внутренней трубы  $d_{cp}$  и включает число секций теплообменника; длина одной теплопередающей секции  $l = 1,5$  м.

Расход передаваемого тепла  $Q$  (тепловая нагрузка аппарата) определяют по уравнению (8.11), а среднюю движущую силу процесса теплопередачи – по уравнению (8.9) или (8.10).

Коэффициент теплопередачи  $K_p$  требует определения коэффициентов теплоотдачи со стороны горячего теплоносителя  $\alpha_1$  и холодного  $\alpha_2$  по одному из приведенных критериальных уравнений (8.13) – (8.15) и (8.16) – (8.18) в зависимости от режима движения теплоносителя.

Теплопроводность стенки трубы  $\lambda_{cm} = 17,5$  Вт/(м·°С) Рассчитанные значения коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , а также  $K_p$  заносят в таблицу 8.3. Теплофизические параметры воды на линии насыщения приведены в таблице 8.4.

После вычисления  $K_{on}$  и  $K_p$  строят корреляционный график.

**Теплофизические свойства воды на линии насыщения**

Температура, $t, \text{ }^{\circ}\text{C}$	Плотность, $\rho, \text{ кг/м}^3$	Теплоемкость, $C_p, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{ }^{\circ}\text{C)}$	Теплопроводность, $\lambda \cdot 10^2, \text{ Вт/(м}\cdot\text{ }^{\circ}\text{C)}$	Коэф-т температуропроводности, $\alpha \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	Коэф-т динамической вязкости, $\mu \cdot 10^6, \text{ Па}\cdot\text{с}$	Коэффициент кинематической вязкости, $\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$
0	999,9	4,212	55,1	13,1	1788	1,789
10	999,7	4,191	57,4	13,7	1306	1,306
20	998,2	4,183	59,9	14,3	1004	1,006
30	995,7	4,174	61,8	14,9	801,5	0,805
40	992,2	4,174	63,5	15,3	653,3	0,659
50	988,1	4,174	64,8	15,7	549,4	0,556
60	983,2	4,179	65,9	16,0	469,9	0,478
70	977,8	4,187	66,8	16,3	406,1	0,415
80	971,8	4,195	67,4	16,6	355,1	0,365
90	965,3	4,208	68,0	16,8	314,9	0,326
100	958,4	4,220	68,3	16,9	282,5	0,295

## Лабораторная работа № 9

### Изучение процесса простой перегонки

4 часа

**Цель работы:** изучение процесса простой перегонки.

**Задачи работы:**

1. Изучить процесс простой перегонки, ознакомиться с устройством и работой установки.
2. Теоретически рассчитать процесс перегонки и сравнить полученные результаты с экспериментальными данными.

**Обеспечивающие средства:** ротационный испаритель; набор ареометров для определения плотности смеси; исходная смесь «этанол–вода».

**Задание:** провести процесс простой перегонки смеси «этанол–вода» с заданной начальной концентрацией  $x_F$  (масс.%) практически и рассчитать теоретически (методом графического интегрирования) количество кубового остатка  $W$  и дистиллята  $D$ . Сравнить теоретические и экспериментальные данные.

**Требования к отчету:** итоги лабораторной работы должны быть представлены на листах формата А4, графики – на миллиметровой бумаге, выполненные в карандаше. Работа выполняется побригадно (4 чел.), каждый студент в бригаде составляет свой собственный отчет. В отчете указывается название института, кафедры, лабораторной работы, фамилия и инициалы студента, название специальности и группы, вида обучения, факультета, а также: цель работы, схема установки, методика проведения работы, основные формулы расчетов с расшифровкой символов, таблица 9.1 «Экспериментальные данные», график 1 «Температурная диаграмма  $t-x, y$ » и график 2 – зависимость « $\frac{1}{(y^*-x)} = \varphi(x)$ ».

**Технология работы:** получить определенный объем  $V$  исходной смеси «этанол–вода», определить ее плотность, концентрацию  $x_F$  (масс.%) и температуру кипения  $t_F$ ; зная количество исходной смеси  $F$  и задавшись концентрацией кубового остатка  $X_W$  после перегонки, теоретически рассчитать (методом графического интегрирования) количество кубового остатка  $W$  и дистиллята  $D$ , получаемые по окончании перегонки; рассчитывают среднюю концентрацию легколетучего компонента  $x_{Dcp}$  в дистилляте. Открыть вентиль и подать воду в холодильник. Установить ручку регулятора температуры на значение, необходимом для работы (на  $15-20^{\circ}C$  выше температуры  $t_F$ ). Отметить время от начала перегонки. Набрав в приемную колбу рассчитанное количество дистиллята, закончить перегонку.

***Контрольные вопросы***

1. На чем основан процесс перегонки жидкостей?
2. Что понимают под простой перегонкой?
3. Когда применяется простая перегонка?
4. Закон Рауля.
5. Коэффициент относительной летучести.
6. Уравнение материального баланса простой перегонки.
7. Как осуществляется процесс простой перегонки?

***Библиографический список*** приведен в конце сборника.

## Описание лабораторной работы

### Теоретическая часть

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

$$p_A = P_A x_A; p_B x_B = P_B x_B = P_B (1 - x_A) \quad (9.1)$$

и Дальтона:

$$p_A = P y_A, \quad (9.2)$$

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

При равновесии ( $y_A = y_A^*$ )

$$y_A^* = \frac{p_A}{P} = \frac{\alpha x_A}{\alpha x_A + (1 - x_A)}, \quad (9.3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент относительной летучести ( $\alpha > 1$ ).

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:

$$Lx = (L - dL)(x - dx) + dLy^*, \quad (9.4)$$

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  $dLdx^*$ , как бесконечно малой величиной второго порядка, получим

$$L \cdot dx = dL \cdot (y^* - x) \quad \text{или} \quad \frac{dL}{L} = \frac{dx}{y^* - x} \quad (9.5)$$

Интегрируем уравнение (6.5) 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:

$$\int_F^W \frac{dL}{L} = \int_{x_F}^{x_W} \frac{dx}{y^* - x} \quad \text{или} \quad \int_W^F \frac{dL}{L} = \int_{x_W}^{x_F} \frac{dx}{y^* - x} \quad (9.6)$$

Вид функции  $y^* = \varphi(x)$  определяется формой кривой равновесия и обычно не может быть установлен аналитически. Поэтому интегрирование правой части уравнения (9.7) проводят графически – путем построения зависимости  $\frac{1}{(y^* - x)}$  от  $x$  или с применением вычислительной техники. При графическом вычислении интеграла берут последовательно различные значения  $x$  в пределах от  $x_W$  до  $x_F$ , находят по таблице диаграмме  $y^* = \varphi(x)$  соответствующие им значения  $y^*$ , вычисляют  $\frac{1}{(y^* - x)}$  и строят кривую. Размер площади, ограниченной кривой и осью абсцисс в пределах от  $x_W$  до  $x_F$  представляет величину искомого интеграла.

Среднюю концентрацию легколетучего компонента в дистилляте ( $x_d$ ) рассчитывают из уравнения материального баланса:

$$Fx_F = Wx_w + (F - W)x_{dcp} = Wx_w + Dx_{dcp}, \quad (9.8)$$

Откуда

$$x_{dcp} = \frac{Fx_F - Wx_W}{D}, \quad (9.9)$$

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

Интеграл по уравнению (9.7) может быть рассчитан так же на ЭВМ, имеющейся в лаборатории, по стандартной программе вычисления определенного интеграла.

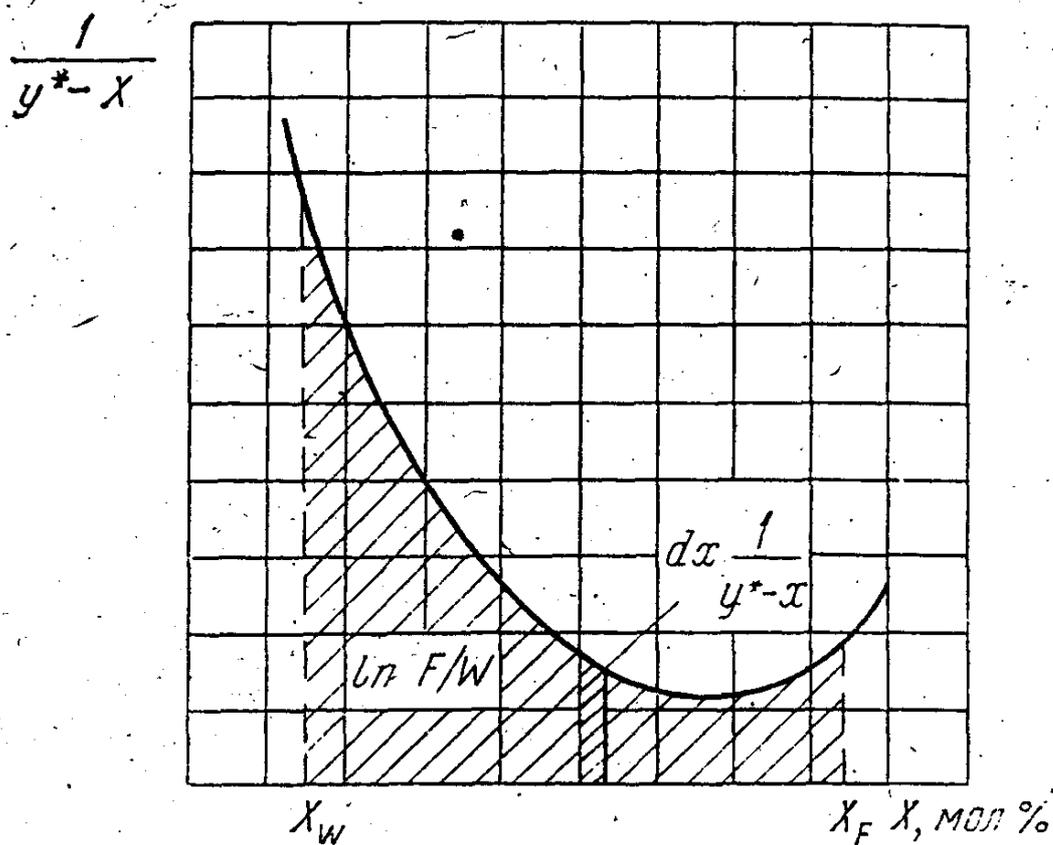


Рис. 9.1. Графическое решение интеграла  $\int \frac{dx}{y^* - x}$

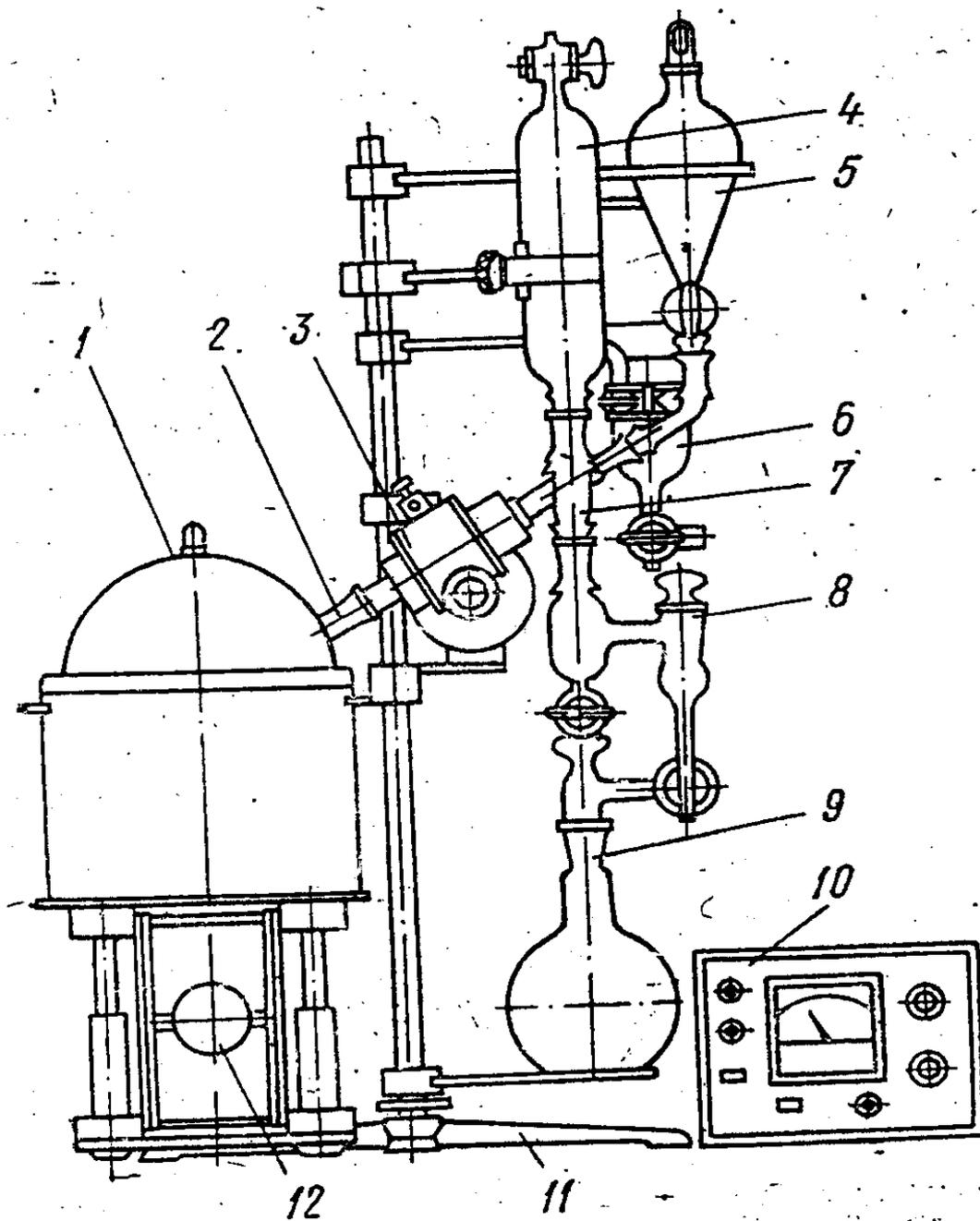


Рис. 9.2. Схема установки:

1 – баня; 2 – испарительная колба; 3 – редуктор; 4 – холодильник; 5 – загрузочная воронка; 6 – ловушка; 7 – переходник; 8 – отборник; 9 – приемная колба; 10 – регулятор температуры; 11 – штатив; 12 – подъемник с механизмом.

## Описание установки

Перегонка осуществляется в ротационном испарителе (рис. 9.2) в тонком слое жидкости. Пленка жидкости образуется на внутренней поверхности вращающейся испарительной колбы. Вращение способствует увеличению площади испарения и интенсифицирует процесс парообразования; временно устраняется вспенивание испаряемой жидкости. Вращение испарительной колбы производится от электродвигателя постоянного тока через червячный редуктор с торцевым вакуумным уплотнением. Управление частотой вращения электродвигателя осуществляется ручкой задатчика оборотов; расположенной на лицевой панели регулятора температуры 10. Диапазоны изменения частоты вращения испарительной колбы –  $15\text{--}80 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ , температуры теплоносителя в бани –  $20\text{--}150^\circ\text{C}$ . Нагрев и испарение раствора осуществляется с помощью бани 1, в которой температура жидкого теплоносителя (воды, масла, глицерина) поддерживается автоматически. Испарительно-конденсационная система состоит из испарительной колбы 2, конденсатора-холодильника 4, загрузочной воронки 5 с исходным раствором, переходника 7, отборника 8 и приемной колбы 9. Система кранов отборника обеспечивает возможность снятия приемной колбы дистиллята без нарушения рабочего давления при непрерывном ведении процесса перегонки. В периодическом режиме работы установка отборника не обязательна, т. е. приемную колбу в этом случае можно закреплять непосредственно на шлифе переходника 7. Процесс перегонки можно осуществлять под атмосферным давлением или под вакуумом, в периодическом и непрерывном режимах. Для предотвращения попадания паров низкокипящих жидкостей в систему откачки предусмотрена установка охлаждающей ловушки 6. Паровая фаза охлаждается и конденсируется в холодильнике-конденсаторе, дистиллят собирается в приемной колбе, а остаток – в испарительной колбе. Для подъема и опускания бани предназначен подъемник 12 с механизмом, работающим по принципу винт – гайка. Испарительно-конденсационная система и привод с редуктором закреплены при помощи держателей на штативе 11.

## Методика проведения работы

Работа проводится в следующем порядке:

1. Ознакомиться с установкой и нарисовать ее схему.
2. Для исходной смеси «этанол–вода» (или какой-либо другой) построить по табличным данным температурную диаграмму  $t-x, y$ , (см. приложение).
3. С помощью ареометра измерить плотность раствора исходной смеси, определить его концентрацию  $X_F$ , в масс. % (см. приложение) и температуру кипения.

4. Зная количество, исходной смеси, ее концентрацию по легколетучему компоненту и задавшись концентрацией кубового остатка после перегонки, теоретически по уравнению (9.7) на ЭВМ или методом графического интегрирования рассчитать количество, кубового остатка  $W$  и дистиллята  $D$ . ( $D = F - W$ ), получаемых по окончании перегонки. По уравнению (9.9) рассчитать среднюю концентрацию легколетучего компонента  $x_{dcp}$  в дистилляте.

При графическом интегрировании необходимо:

а) выписать данные по равновесию и заполнить табл. 9.1 Таблицу в пределах изменения концентрации исходной смеси  $X_F - X_W$ .

Таблица 9.1

Расчетные данные

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

Вторая графа табл. 9.1 ( $x^2$ ) заполняется при расчете:

б) на миллиметровой бумаге, в масштабе построить график зависимости  $\frac{1}{(y^*-x)} = \varphi(x)$ . Площадь под кривой в пределах изменения  $dx$  от

$x_W$  до  $X_F$  представляет собой искомый интеграл, т. е. величину  $\ln \frac{F}{W}$ ;

в) определить количество кубового остатка  $W$  и дистиллята  $D$ ;

г) по уравнению (9.9) рассчитать средний состав дистиллята  $x_{dcp}$ .

Для расчета интеграла на ЭВМ 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 (9.7).

Теоретически рассчитав, количество и среднюю концентрацию дистиллята, приступают к выполнению, экспериментальной части работы.

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

6. Проверить количество теплоносителя и при необходимости дополнить ее; закрепить испарительную колбу на вращающейся части редуктора, поднять подъемником баню и погрузить испарительную колбу в теплоноситель примерно наполовину.

7. Установить ручку регулятора температуры в крайнее левое положение и включить кнопку «нагрев бани» на лицевой панели. Включение в сеть сигнализируется лампочкой «ВКЛ».

8. Ручку регулятора температуры установить на значении, необходимом для работы (на 15-20°C выше температуры кипения исходной смеси). Работа нагревателя сигнализируется лампочкой «АВТ».

9. Открыть вентиль и подать водопроводную воду в холодильник-конденсатор. По часам отметить время начала и окончания эксперимента. Набрав в приемную колбу рассчитанное количество дистиллята, закончить перегонку.

10. По окончании работы установить ручку управления в крайнее левое положение и выключить привод. Ручку регулятора температуры также перевести в крайнее левое положение, выключить кнопку «нагрев бани» и отключить регулятор температуры от сети.

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

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

### Обработка опытных данных

1. Найденный экспериментально средний состав дистиллята  $x_э$ , сравнивают, с расчетным  $x_{dcp}$  и рассчитывают ошибку  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{x_{dcp} - x_э}{x_{dcp}} \cdot 100, \% \quad (9.10)$$

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

а) расход тепла на подогрев исходной смеси

$$Q_1 = F c_F (t_{KF} - t_H), \quad (9.11)$$

где  $c_F = c_c x_F + c_b (1 - x_F)$  – удельная, теплоемкость исходной смеси, кДж/(кг·К);  $c_c$ ,  $c_b$  – удельная теплоемкость компонентов в смеси, кДж/(кг·К);  $t_H$  – начальная температура исходной смеси, °С;  $t_{KF}$  – температура кипения исходной смеси, °С;

б) расход тепла на испарение дистиллята

$$Q_2 = D r_d, \quad (9.12)$$

где  $r_d = r_c x_d + r_b (1 - x_d)$  – теплота парообразования дистиллята, кДж/кг;  $r_c$ ;  $r_b$  – теплота парообразования компонентов смеси, кДж/кг;

в) расхода тепла на нагрев кубового остатка

$$Q_3 = W c_F (t_{KW} - t_{KP}), \quad (9.13)$$

где  $c_F = c_c x_W + c_s (1 - x_W)$  – удельная теплоемкость кубового остатка, кДж/(кг·К);  $t_{KW}$  – температура кипения кубового остатка в конце процесса перегонки, °С.

Общий расход тепла

$$Q_l = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (9.14)$$

Мощность, затраченная на перегонку  $N_p$  (расчетная), кВт:

$$N_p = \frac{Q}{\tau}, \quad (9.15)$$

где  $\tau = \tau_n + \tau_{\text{н}}$  – общее время, затраченное на нагрев исходной смеси ( $\tau_n$ ) и испарение ( $\tau_{\text{н}}$ ), с.

По показаниям вольтметра и амперметра рассчитать фактическую мощность ( $N_\phi$ ), затраченную электродвигателем на перегонку, кВт. Определить КПД установки (%).

$$\eta = \frac{N_p}{N_\phi} \quad (9.16)$$

Все данные, полученные экспериментальным и расчетным путем, занести в табл. 9.2.

## Опытные и расчетные данные

№	Наименование	Обозначение	Единица измерения	Величина
<b>1. Опытные данные</b>				
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	
4	Концентрация кубового остатка	$X_W$	масс. доли	
5	Начальная температура исходной смеси	$t_n$	°C	
6	Температура кипения исходной смеси	$t_{кF}$	°C	
7	Температура кипения кубового остатка	$t_{кW}$	°C	
8	Время нагрева исходной смеси	$\tau_n$	мин (с)	
9	Время перегонки	$\tau_n$	мин (с)	
10	Количество кубового остатка	$W$	кг	
11	Количество дистиллята	$D$	кг	
12	Показания амперметра	$I$	A	
13	Показания вольтметра	$U$	B	
<b>2. Расчетные данные</b>				
1	Количество кубового остатка	$W_p$	кг	
2	Количество дистиллята	$D_p$	кг	
3	Средняя концентрация дистиллята	$X_{d(ср)}$	масс. доли	
4	Процент ошибки в определении концентрации дистиллята	$\varepsilon$	%	
5	Мощность, затраченная на перегонку (расчетная)	$N_p$	кВт	
6	Фактическая мощность	$N_\phi$	кВт	
7	КПД установки	$\eta$	%	

Таблица 9.3

Плотность водных растворов этилового спирта при 20°C

Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Массовая доля спирта, %	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Массовая доля спирта, %
998	0,1	920	47,3
996	1,2	915	49,5
994	2,3	910	51,8
992	3,5	905	53,9
990	4,7	900	56,2
988	5,9	895	58,3
985	7,9	890	60,5
982	10,0	885	62,7
980	11,5	880	64,8
978	13,0	875	66,9
975	15,3	870	69,0
972	17,6	865	71,1
970	19,1	860	73,2
965	22,8	850	77,3
962	24,8	845	79,4
960	26,2	840	81,4
958	28,1	835	83,4
954	29,9	830	85,4
950	32,2	825	87,3
945	35,0	820	89,2
940	37,6	815	91,1
935	40,1	810	93,0
930	42,6	805	96,6
925	44,9	800	96,6
		794	100

Таблица 9.4

Парожидкостное равновесие в системе «этиловый спирт–вода» под атмосферным давлением

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Молярная доля спирта, %		Массовая доля спирта, %	
	в жидкости	в жидкости	в паре	в жидкости
100	0	0	0	0
99,6	0,08	1,03	0,20	2,6
99,2	0,23	2,90	0,60	7,1
99,0	0,31	3,725	0,80	9,0
95,8	1,61	16,34	4,00	33,3
94,15	2,43	21,45	6,00	41,1
92,6	3,29	26,21	8,00	47,6
90,5	5,07	33,06	12,0	55,8
88,3	6,86	38,06	16,0	61,1
87,0	8,92	42,09	20,0	65,0
85,4	12,08	46,90	26,0	69,3
84,7	14,35	49,30	30,0	71,3
83,7	18,03	52,04	36,0	73,5
83,1	20,68	53,46	40,0	74,6
82,5	23,51	54,80	44,0	75,6
81,9	28,12	56,71	50,0	77,0
81,5	31,47	58,11	54,0	78,0
81,0	36,98	60,29	60,0	79,5
80,5	43,17	62,52	66,0	81,0
80,2	47,74	64,21	70,0	82,1
79,72	55,34	67,42	76,0	84,1
79,5	61,02	70,29	80,0	85,8
79,1	67,27	73,61	84,0	87,7
78,65	74,15	78,00	88,0	90,1
78,4	79,82	81,83	91,0	92,0
78,27	83,87	84,91	93,0	93,4
78,15	89,41	89,41	95,57	95,57

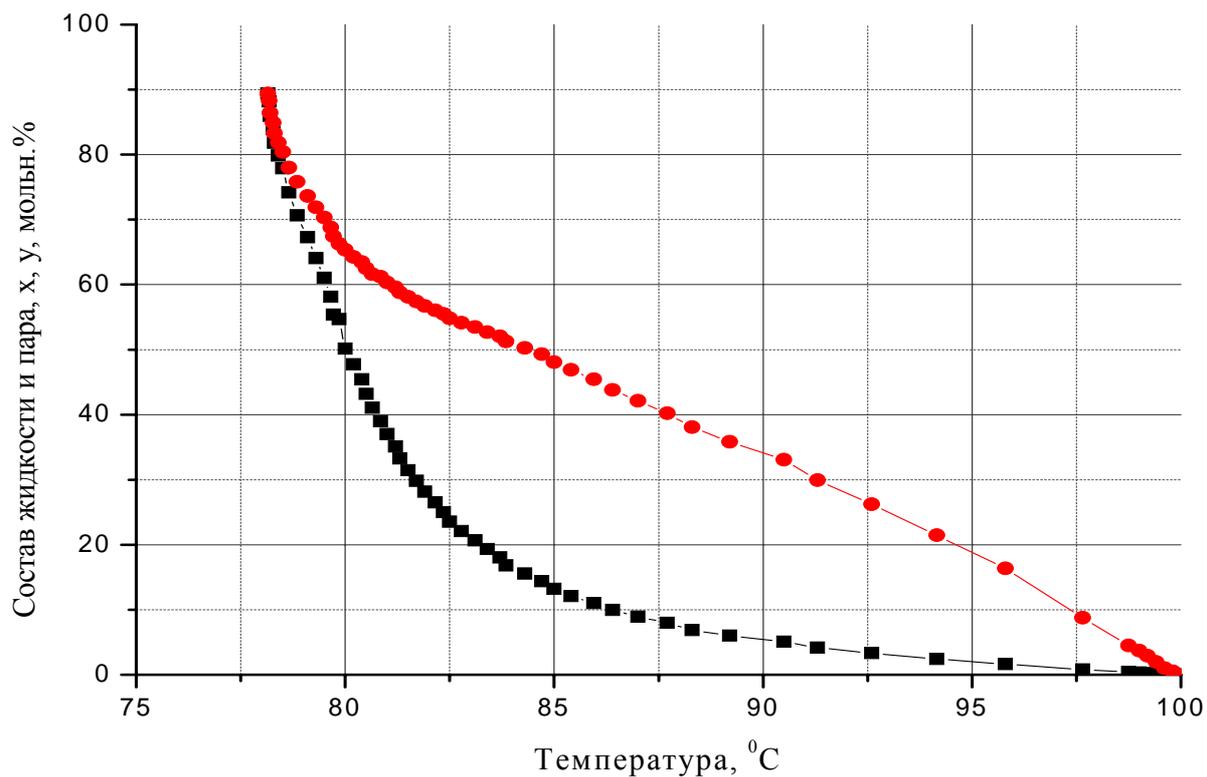


Рис. 9.3. Температурная диаграмма для смеси «этиловый спирт–вода»

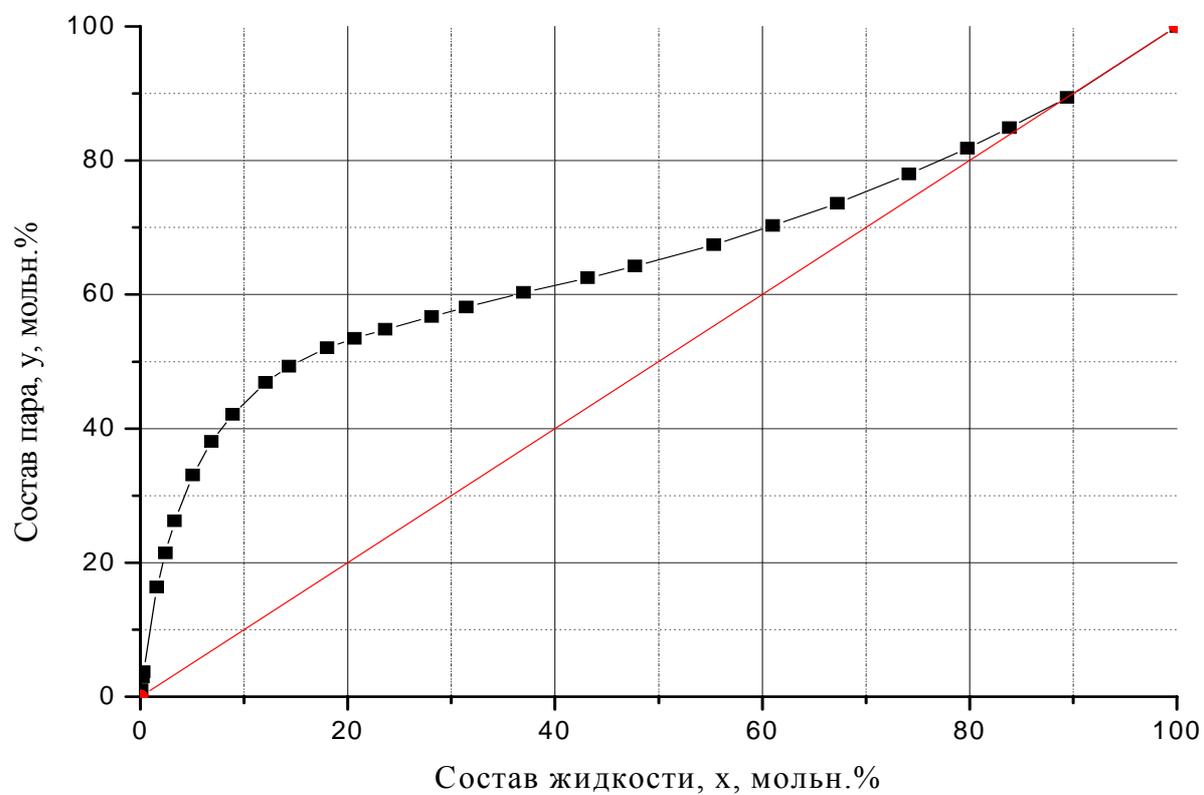


Рис. 9.4. Парожидкостное равновесие в системе «этиловый спирт–вода»

## Лабораторная работа № 10

### Изучение процесса жидкостной экстракции

2 часа

**Цель работы:** ознакомление с процессом экстракции в системе «жидкость-жидкость».

**Задачи работы:**

1. Графическим методом рассчитать процесс экстракции в системе «жидкость-жидкость» по треугольной диаграмме.
2. Рассчитать коэффициент распределения  $m$ .

**Обеспечивающие средства:** набор реактивов для проведения экстракции: смесь «ацетон+CCl<sub>4</sub>» и дистиллированная вода, оборудование для проведения анализа (стаканы, делительные воронки, магнитные мешалки, рефрактометр).

**Задание:** провести процесс экстракции в системе «жидкость-жидкость», построить треугольную диаграмму и рассчитать коэффициент распределения  $m$ .

**Требования к отчету:** итоги лабораторной работы должны быть представлены на листах формата А4, графики – на миллиметровой бумаге, выполненные в карандаше. Работа выполняется побригадно (4 чел.), каждый студент в бригаде составляет свой собственный отчет. В отчете указывается название института, кафедры, лабораторной работы, фамилия и инициалы студента, название специальности и группы, вида обучения, факультета., а также: цель работы, схема установки, методика проведения работы, основные формулы расчетов с расшифровкой символов, таблица 10.1 «Экспериментальные данные», на треугольной диаграмме построить кривую равновесия (бинодальную кривую) и нанести точки, отвечающие составу исходной смеси ( $F$ ), экстрагента ( $C$ ), полученного раствора ( $M$ ), экстракта и рафинада. Написать выводы по работе и защитить отчет.

**Технология работы:** получить исходную смесь «ацетон+CCl<sub>4</sub>» и в определенном соотношении смешивают с экстрагентом (дистиллированной водой); определить концентрацию (по калибровочным графикам) и рассчитать плотность исходной смеси; после отстаивания и разделения смеси в делительной воронке, слить обе образовавшиеся фазы, определить их объем и концентрации; при необходимости провести вторую ступень экстракции; построить треугольную диаграмму и рассчитать коэффициент распределения  $m$ .

**Контрольные вопросы:**

1. Что такое экстракция?
2. Виды экстракции, область применения?
3. Что такое экстрагент, экстракт и рафинад?
4. Требования, предъявляемые к экстрагенту?
5. Закон распределения. Что называется коэффициентом распределения?
6. Правило рычага.
7. Обозначение концентраций на треугольной диаграмме.

**Библиографический список** приводится в конце сборника описаний лабораторных работ.

## Описание лабораторной работы

### Теоретическая часть

Экстракцией называется процесс извлечения одного или нескольких компонентов из растворов или твердых тел с помощью избирательных растворителей (экстрагентов). Экстрагент должен хорошо растворять только извлекаемый компонент и значительно слабее или совсем не растворять остальные компоненты исходной смеси. Процессы экстракции широко применяются в различных отраслях химической промышленности, в том числе при химической переработке древесины. Примерами экстракции в системе «жидкость – твердое тело» являются важнейшие, процессы производства целлюлозы – варка, промывка, отбелка; в лесохимической промышленности – извлечение канифоли, скипидара и других смолистых веществ из пневого осмола. Очистка сточных вод от фенолов при помощи органических растворителей, извлечение уксусной кислоты из водных растворов (пирвиллизатов) этилацетатом – представляют собой экстракцию в системе «жидкость – жидкость».

Экстракция в системе «жидкость–жидкость», которая изучается в данной лабораторной работе – массообменный процесс, протекающий с участием двух ограниченно растворимых жидкостей (фаз), между которыми при их смешении распределяется экстрагируемое вещество (целевой компонент). Принципиальная схема процесса жидкостной экстракции представлена на рис. 10.1.

Исходная гомогенная смесь  $F = A + B$ , где  $A$  – первичный растворитель,  $B$  – извлекаемое вещество (целевой компонент) тщательно перемешивается в экстракторе с экстрагентом  $C$ , представляющим собой либо чистый вторичный растворитель  $C$ , либо (если используется регенерированный экстрагент) – вторичный растворитель с небольшим количеством компонента  $B$ :  $(C + B)$ . При выборе вторичного растворителя необходимо руководствоваться следующим: 1 – растворимость извлекаемого компонента  $B$  во вторичном растворителе  $C$  должна быть значительно большей, чем в первичном растворителе  $A$ ; 2 – взаимная растворимость вторичного и первичного растворителей должна быть ничтожной; 3 – плотности образующихся фаз по возможности должны существенно отличаться.

При интенсивном перемешивании исходной смеси  $F$  с экстрагентом.  $C$  целевой компонент  $A$  переходит в раствор во вторичном растворителе. Образовавшуюся эмульсию разделяют на две фазы отстаиванием или центрифугированием. Одну из этих фаз – вторичный растворитель  $C$  с растворенным в нем целевым компонентом  $B$  – называют экстрактом  $E$ , другую (первичный растворитель  $A$  плюс остатки компонента  $B$  – рафинадом  $R$ .

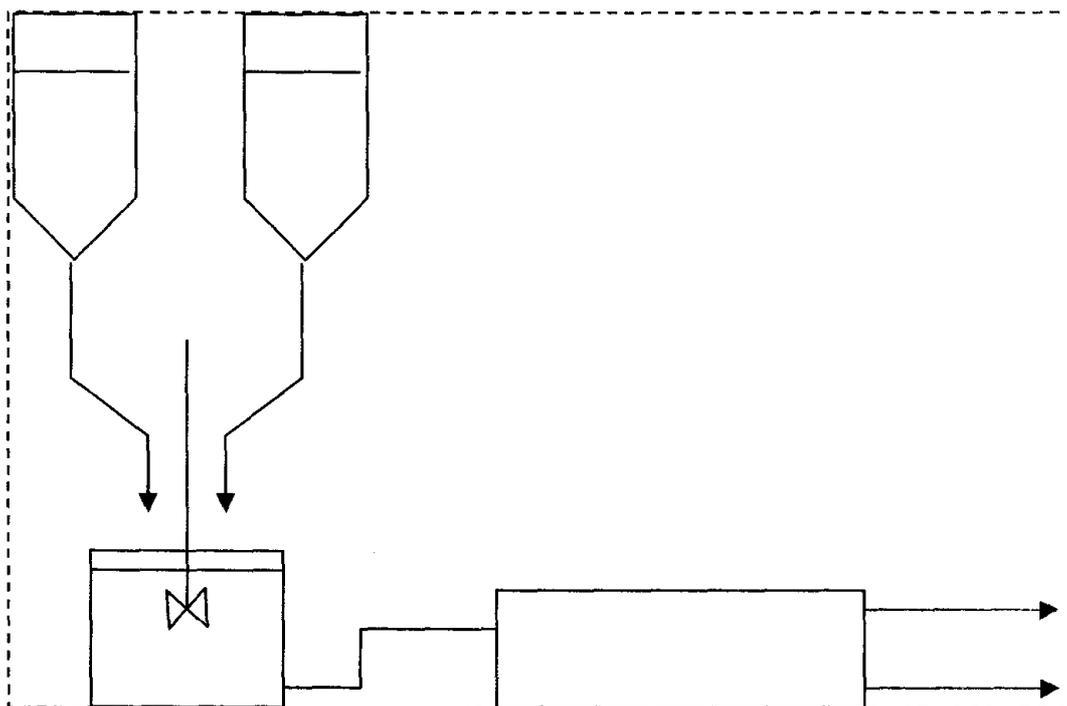


Рис. 10.1. Схема установки

Экстракт подвергают дальнейшей обработке – ректификации или выпариванию с целью выделения компонента  $B$  в чистом виде, и регенерации вторичного растворителя  $C$ . Жидкостная экстракция может осуществляться различными методами, отличаясь как в технологическом, так и в аппаратном оформлении: периодически и непрерывно, одним или двумя экстрагентами, в одну (одноступенчатая экстракция) или несколько ступеней, перекрестным током и противотоком и т. д. Однако, независимо от способа осуществления процесса экстракции, основные теоретические положения, касающиеся ста гики (равновесие фаз, материальный баланс) и кинетики процесса, сохраняются. Движущей силой процесса экстракции, как и других массообменных процессов, является степень отклонения двухфазной системы от состояния равновесия, иначе говоря – разность между равновесной и рабочей (фактической) концентрациями извлекаемого компонента в одной из фаз – экстракте или рафинаде. Компонент  $B$  будет переходить из исходной смеси  $F$  во вторичный растворитель  $C$  до тех пор, пока между обеими фазами (экстрактом и рафинадом) не установится равновесие. Количественная связь между составами равновесных фаз описывается уравнением

$$y^* = m \cdot x, \quad (10.1)$$

где  $y^*$  – массовая доля вещества  $B$  во вторичном растворителе  $C$  (в фазе экстракта) при равновесии;  $m$  – коэффициент распределения, зависящий от

температуры и концентрации (в области разбавленных растворов при постоянной температуре  $m = const$ );  $x$  – массовая доля вещества  $B$  в первичном растворителе  $A$  (в фазе рафинада).

Коэффициент распределения  $m$ , как правило, не является постоянной величиной и вид зависимости  $y^* = \varphi(x)$  устанавливается опытным путем.

Линия рабочих концентраций при экстракции, так же, как и в других массообменных процессах, – прямая. В общем случае уравнение ее типа  $y = ax + b$  устанавливает зависимость между рабочими концентрациями извлекаемого компонента  $B$  в исходном растворителе и экстрагенте.

В идеальном случае при полной взаимной нерастворимости первичною ( $A$ ) и вторичного ( $C$ ) растворителей графически линия рабочих и равновесных концентраций изображаются как обычно для массообменных процессов в прямоугольной диаграмме « $y-x$ » (рис. 10.2, а, б). Положение линии рабочих концентраций при этом определяется схемой ведения процесса экстракции – перекрестным током, или противотоком, положение же линии равновесия неизменно.

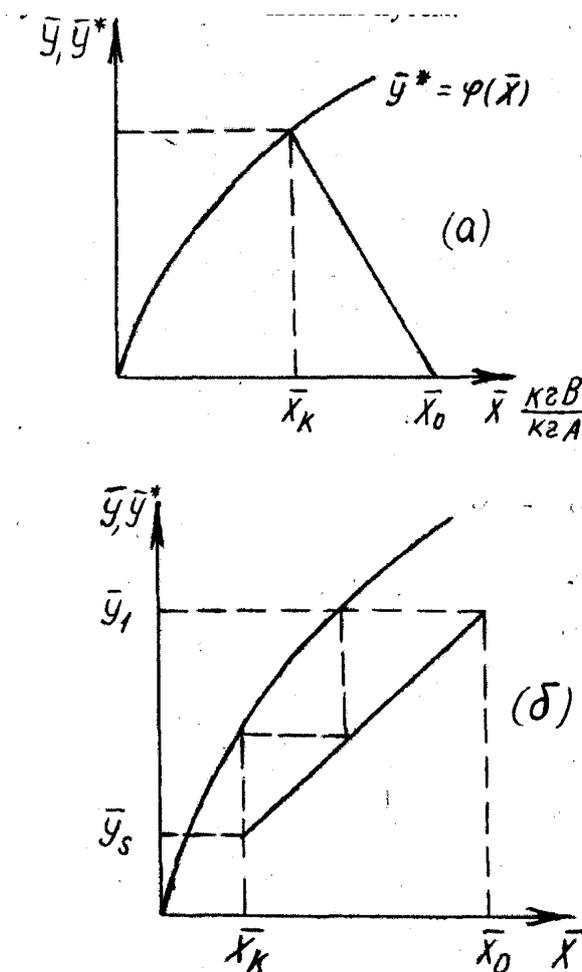


Рис. 10.2. Изображение процесса экстракции на прямоугольной диаграмме  $y - x$ : а) одноступенчатая экстракция; б) многоступенчатая экстракция, противоточная

При частичной взаимной растворимости первичного растворителя и экстрагента (что и наблюдается в данной лабораторной работе) после проведения процесса экстракции и отстаивания, каждая из образовавшихся фаз представляет собой трехкомпонентный раствор. Определение состава жидких тройных смесей, а также построение линии равновесия (бинодальной кривой) и расчет основных характеристик процесса в этом случае, осуществляется по треугольной диаграмме (рис. 10.3).

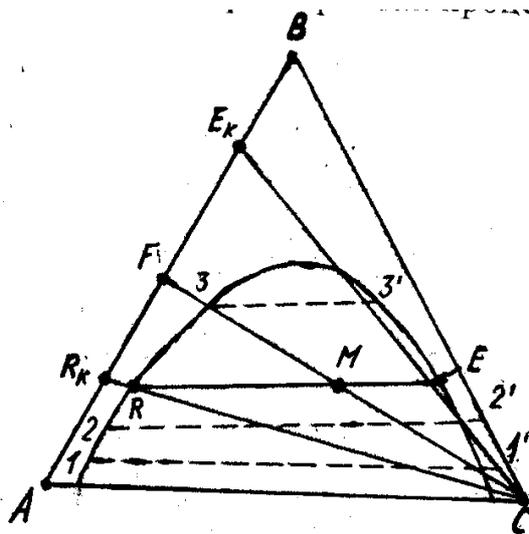


Рис. 10.3. Изображение процесса экстракции на треугольной диаграмме

Вершины треугольника соответствуют 100%-му содержанию отдельных компонентов  $A$ ,  $B$  и  $C$ , точка на любой стороне треугольника выражает состав бинарной смеси ( $F = A + B$  или  $E = B + C$ ), а точка внутри треугольника - состав трехкомпонентной системы. Кривая равновесия строится при постоянной температуре по опытным данным – точкам, отвечающим равновесному содержанию извлекаемого компонента  $B$ , в двух расслоившихся после перемешивания фазах – экстракте и рафинаде. На рис. 10.3 – это точки 1 и 1', 2 и 2' и т. д.; линии, соединяющие эти точки, называются хордами равновесия, или конодами. На две фазы будут расслаиваться только те смеси, средний состав которых выражается точкой, расположенной внутри кривой равновесия, например точкой  $M$ . Смеси, состав которых выражается гонкой, лежащей за кривой равновесия, гомогенны, т. е. не расслаиваются.

При смешении двух растворов, например, исходной смеси, состоящей из двух компонентов (точка  $F$ ) и чистого растворителя (точка  $C$ ), получается новая смесь, состав которой, выражается точкой  $M$ , лежащей на прямой, соединяющей  $F$  и  $C$ . Положение точки  $M$ , т. е. состав смеси, определяется уравнением материального баланса,

$$M = F + C = R + E \quad (10.2)$$

и правилом рычага

$$F \times FM = C \times CM \quad \text{или} \quad \frac{F}{C} = \frac{CM}{FM}, \quad (10.3)$$

где  $F$ ,  $C$  и  $M$  – количество смешиваемых и образующегося раствора (смеси);  $R$  и  $E$  – количество рафинада и экстракта;  $FM$  и  $CM$  – величина (мм) отрезков прямых на треугольной диаграмме.

Зная положение хорды равновесия, проходящей через точку  $M$  (или построив ее по опытным данным, полученным в ходе эксперимента), и применяя то же правило рычага

$$R \times RM = E \times EM ;$$

$$\frac{R}{E} = \frac{EM}{RM}$$

или

$$\frac{R}{M} = \frac{ME}{RE} ; \quad R = M \cdot \frac{ME}{RE}$$

можно определить массу рафинада и экстракта.

Для определения состава рафинада проводят через точки  $C$  и  $R$  луч до пересечения со стороной  $AB$  треугольника. Точка  $R_K$  определяет состав конечного рафинада (после отгонки вторичного растворителя  $C$ ). Аналогично, проводя луч через точки  $C$  и  $E$ , находят точку  $E_K$ , выражающую состав экстракта (без экстрагента).

При однократном смешении исходной смеси и экстрагента степень извлечения растворенного вещества сравнительно невелика. С целью более полного извлечения того или иного компонента применяют многоступенчатую экстракцию, которая в промышленных условиях осуществляется обычно непрерывно противотоком. В лабораторных условиях эту операцию проводят последовательно, обрабатывая рафинад новыми, порциями свежего растворителя (перекрестный ток).

## Методика проведения работы

Перед началом работы необходимо усвоить сущность и теоретические основы процесса экстракции, ознакомиться со схемой установки, методикой проведения работы, обработкой опытных данных и ответить на контрольные вопросы. Работа выполняется в следующем порядке:

1. Получить от преподавателя задание относительно условий проведения эксперимента: количество и соотношение (по объему) между исходной смесью и экстрагентом; количество ступеней обработки.
2. Определить концентрацию и рассчитать плотность исходной смеси.
3. Открыть краны подачи исходной смеси и воды, включить магнитную мешалку и постепенно при непрерывном перемешивании подать необходимое количество их.
4. Тщательно перемешать смесь и перенести ее в делительную воронку 5, где выдержать до полного расслоения фаз. Измерить объемы полученных фаз, взять пробы экстракта (верхняя часть) и рафинада определить их концентрации. Полученные результаты занести в табл. 10.1.
5. При необходимости повторной экстракции (в соответствии с заданием) аккуратно слить нижнюю часть раствора (рафинад) в стакан с мешалкой и провести вторую экстракцию с заданным количеством воды;
6. С полученной смесью повторить п. 4.
7. По окончании работы отключить все приборы, вымыть посуду и привести рабочее место в порядок.

Ниже приведены некоторые, данные, необходимые для последующего расчета процесса экстракции  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### Обработка опытных данных

1. По данным, приведенным в табл. 10.1, на треугольной диаграмме построить кривую равновесия (бинодальную кривую).

Таблица 10.1

Равновесные данные для системы  
«ацетон – четыреххлористый углерод – вода», масс. %

Ацетон (B)	Четыреххлористый углерод (A)	Вода (C)
32,9	65,80	1,3
54,7	38,20	7,1
60,3	17,70	22,0
52,1	5,20	42,7
48,1	3,97	47,9

Ацетон ( <i>B</i> )	Четыреххлористый углерод ( <i>A</i> )	Вода ( <i>C</i> )
23,8	0,60	95,6
0,5	0,40	99,1
26,8	72,20	1,0
16,2	83,40	0,4

2. На треугольной диаграмме нанести точки, отвечающие составу исходной смеси (*F*), экстрагента (*C*) и полученного раствора (*M*). Точка *M* находится по правилу рычага.

3. Нанести точки, соответствующие составу экстракта (*E<sub>1</sub>*) и рафинада (*R<sub>1</sub>*), то есть построить хорду равновесия *R<sub>1</sub>–E<sub>1</sub>* одноступенчатой экстракции.

4. Зная количество исходной смеси, экстрагента, экстракта и рафинада и их концентрации (содержание ацетона) рассчитать коэффициент распределения *m*.

5. При проведении двухступенчатой экстракции найти точку *M<sub>2</sub>* и построить вторую хорду равновесия *R<sub>2</sub>–E<sub>2</sub>*.

Отчет о работе должен содержать: цель и описание работы, схему лабораторной установки, расчеты концентрации, графическое построение на треугольной диаграмме, таблицу измеренных и рассчитанных величин.

Таблица 10.2

## Экспериментальные и расчетные данные

№ п/п	Измеряемые (рассчитанные) параметры	Исход- ная смесь	Экстрагент		Экстракт		Рафинад	
			Первая сту- пень	Вто- рая сту- пень	Пер- вая сту- пень	Вто- рая сту- пень	Первая сту- пень	Вто- рая сту- пень
1	Показатель преломления, <i>n</i>							
2	Концентрация ацетона, <i>B</i> , масс. %							
3	Плотность, <i>ρ</i> , кг/м <sup>3</sup>							
4	Расход, мл/г							
5	Количество образующихся растворов (фаз), мл/г							

## Справочные данные

Параметр	Вода	Ацетон	Четыреххлористый углерод
Плотность, $\rho$ , $кг/м^3$	1000	790	1600
Показатель преломления, $n$	1,3330	1,3591	1,4603

### Библиографический список

1. **Общий курс процессов и аппаратов химической технологии** [Текст] : учеб. для студ. вузов, обучающихся по химико-технол. направлениям и спец. : в 2-х кн. Кн. 1 / В. Г. Айнштейн [и др.] ; под ред. В. Г. Айнштейна. – М. : Высш. шк., 2003. – 912 с.

2. **Вальдберг, А. Ю.** Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Защита атмосферы [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов, обучающихся по направлению 656600 – "Защита окружающей среды" / А. Ю. Вальдберг, Н. Е. Николайкина. – М. : Дрофа, 2008. – 239 с.

3. **Гидравлика и теплотехника** [Текст] : сб. описаний лаб. работ для направления подготовки специалистов 656600 "Защита окружающей среды" по спец. 280201 "Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов" / Федеральное агентство по образованию, Сыкт. лесн. ин-т – фил. ГОУ ВПО "С.-Петерб. гос. лесотехн. акад. им. С. М. Кирова", Каф. теплотехники и гидравлики ; сост.: Е. Г. Казакова, Т. Л. Леканова, Н. А. Корычев. – Сыктывкар : СЛИ, 2007. – 140 с.

4. **Гидравлика и теплотехника.** Самостоятельная работа студентов [Текст] : метод. указ. для подготовки дипломированного специалиста по направлению 656600 "Защита окружающей среды" спец. 280201 "Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов" / Федеральное агентство по образованию, Сыкт. лесн. ин-т – фил. ГОУ ВПО "С.-Петерб. гос. лесотехн. акад. им. С. М. Кирова", Каф. теплотехники и гидравлики ; сост. Е. Г. Казакова. – Сыктывкар : СЛИ, 2007. – 68 с.

5. **Павлов, К. Ф.** Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии [Текст] : учебное пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков ; под ред. чл.-корр. АН России П. Г. Романкова. – 13-е изд., стер. Перепечатка с издания 1987 г. – М. : Альянс, 2006. – 576 с.

6. **Расчет абсорбционных установок** [Электронный ресурс] : метод. пособие по курсовому проектированию по дисциплинам "Процессы и аппараты химических технологий", "Гидравлика и теплотехника" для студ. всех форм обучения направлений подготовки дипломированного специалиста 240406 – Технология химической переработки древесины, 280201 – Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов и направлений подготовки бакалавра 240100 – Химическая технология и биотехнология, 280200 – Защита окружающей среды : самост. электрон. изд. / Сыкт. лесн. ин-т – фил. ГОУ ВПО "С.-Петерб. гос. лесотехн. акад. им. С. М. Кирова", Каф. теплотехники и гидравлики ; сост.: Т. Л. Леканова, Е. Г. Казакова. – Сыктывкар : СЛИ, 2010. – online.