

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Баламирзоев Назим Лиодимович  
Должность: Ректор  
Дата подписания: 07.10.2025 20:01:23  
Уникальный программный ключ:  
5cf0d6f89e80f49a334f6a4ba58e91f3336b9926

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ

ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ

ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА ХИМИИ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии»

для обучающихся по направлению подготовки бакалавров

18.03.01—«Химическая технология»

Часть 1

Махачкала 2023

УДК 665.723

Султанов Ю.М. Лабораторный практикум по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии» для обучающихся по направлению подготовки бакалавров 18.03.01–Химическая технология. Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2023, 78 с.

Лабораторный практикум подготовлен в соответствии с требованиями государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению «Химическая технология». В лабораторном практикуме приведены лабораторные работы, краткие описания теоретических основ, порядок проведения лабораторных работ, описание установок, методика их расчета, литература и контрольные вопросы. При изучении лабораторного практикума и проведения лабораторных работ студенты приобретают практические навыки по определению параметров технологических процессов для дальнейших расчетов оборудования.

В лабораторном практикуме доступной форме изложен материал, который полно и системно освещает вопросы по данной дисциплине. Лабораторный практикум рассчитан на студентов всех форм обучения, его информационное содержание достаточно для изучения дисциплины в объеме, предусмотренном стандартом ВО.

Составитель: д.х.н., профессор кафедры химии ДГТУ Султанов Ю.М.

Рецензенты: к.х.н., доцент кафедры химии ДГТУ Гаджимурадова Р.М.,  
к.х.н., научный сотрудник Аналитического центра  
коллективного пользования Института физики  
Дагестанского федерального исследовательского центра  
Российской академии наук, Сулейманов С.И.

Печатается по решению Ученого совета ФГБОУ ВО «Дагестанский  
государственный технический университет» от \_\_\_\_\_ 2023 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                              | 4  |
| 1.Измерение гидростатического давления.....                                 | 5  |
| 2.Изучение режимов движения жидкости.....                                   | 8  |
| 3.Экспериментальная проверка уравнения Бернулли.....                        | 12 |
| 4.Определение потерь напора по длине при напорном движении<br>жидкости..... | 16 |
| 5.Определение констант фильтрования.....                                    | 23 |
| 6. Испытание циклона.....                                                   | 40 |
| 7. Испытание лопастной мешалки.....                                         | 47 |
| 8. Изучение процесса теплопередачи в теплообменнике «труба в<br>трубе»..... | 53 |
| СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....                                        | 76 |

## ВВЕДЕНИЕ

Процессы и аппараты химической технологии – общепромышленная дисциплина, цель которой заключается в освоении студентами инженерных методов расчетов аппаратов химической технологии. Задачей дисциплины является изучение закономерностей типовых процессов, их математического описания, принципов действия и устройства аппаратов, в которых они (процессы) реализуются, методов расчета аппаратов и проектирования их на основе результатов расчета.

Важной составляющей этой дисциплины является лабораторный практикум, цель которого заключается в следующем:

1. Закрепление и углубление знаний по теории основных процессов химической технологии.
2. Приобретение и совершенствование навыков экспериментальных исследований. Освоение методов обработки опытных данных.
3. Изучение устройств, принципов действия, режимов работы аппаратов на примерах модельных установок.
4. Ознакомление с оборудованием и измерительными приборами, а также с организацией и методикой проведения экспериментов.

Студенты допускаются к выполнению работ только после прохождения инструктажа по правилам техники безопасности.

До выполнения лабораторной работы студенты должны изучить ее содержание, подготовить таблицу для занесения измеряемых величин, ознакомиться с оборудованием, относящимся к данной работе, ответить на контрольные вопросы, подробно изучить методику проведения работы и обработки опытных данных, по итогам собеседования получить разрешение преподавателя на выполнение работы. Без разрешения преподавателя категорически запрещается студентам запускать установку и включать

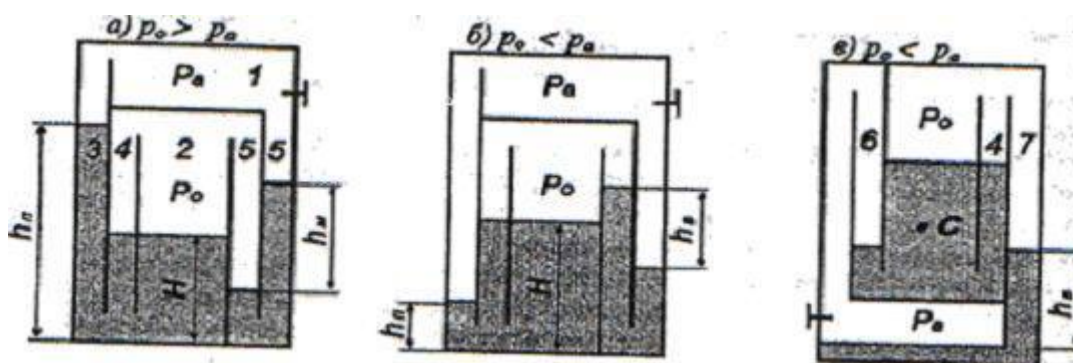
приборы. После выполнения работы студентам необходимо представить таблицу результатов измерений на подпись преподавателю.

Оформление отчета о выполненной работе проводится в соответствии со стандартом. Отчет по работе должен содержать формулировку целей работы, схему установки, основные расчетные формулы, таблицу опытных данных и результатов расчетов, пример обработки данных как минимум одного эксперимента с указанием размерностей всех величин и графики, построенные по опытным и расчетным данным (если они необходимы). Лабораторная работа завершается защитой отчета, в ходе которой студент должен ответить на контрольные вопросы и провести анализ полученных результатов.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1.

### ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ.

Цель работы: Приобретение навыков по измерению гидростатического давления жидкостными приборами.



1. Полость с атмосферным давлением;
2. опытный резервуар; 3-пьезометр; 4-уровнеметр; 5-мановакуметр; 6-пъезиометр; 7-вакуметр.

Порядок выполнения работы

1. В резервуаре 2 над жидкостью создать давление выше атмосферного ( $P_0 > P_a$ ), о чём свидетельствует превышения уровня жидкости в пьезометре 3 над уровнем в резервуаре и прямой перепад уровней в мановакуметре (рис. а).

Для этого устройство поставить на правую сторону, затем поворотом его против часовой стрелки отлить часть жидкости из левого колена мановакуумметра 5 в резервуар 2.

2. Снять показания пьезометра  $h_p$ , уровнемера Н и мановакуумметра  $h_m$ .
3. Вычислить абсолютное давление на дне резервуара через показания пьезометра, а затем через величины, измеренные уровнемером и мановакуумметром. Для оценки сопоставимости результатов определения давления на дне резервуара двумя путями найти относительную погрешность  $\delta p$ .
4. Над свободной поверхностью жидкости в резервуаре 2 создать вакуум ( $P_0 < P_A$ ), когда уровень жидкости в пьезометре 3 становится ниже, чем в резервуаре. А на вакуумметре 5 появляется обратный перепад  $H_B$  (рис. б). Для этого устройство поставить на левую сторону, а затем наклоном вправо отлить часть жидкости из резервуара 2 в левое колено мановакуумметра 5. Дальше см. п.п.2 и 3.
5. перевернуть устройство против часовой стрелки (рис. в) и определить манометрическое или вакуумметрическое давление в заданной точке С через показания пьезометра 6, затем с целью проверки найти его через показания обратного пьезометра 7 и уровнемером 4.

| №<br>п/п | Наименование величин             | Обозначения,<br>формулы | Условия опыта |             |
|----------|----------------------------------|-------------------------|---------------|-------------|
|          |                                  |                         | $P_0 > P_A$   | $P_0 < P_A$ |
| 1        | Пьезометрическая высота, м       | $h_p$                   | 22,1          | 5,6         |
| 2        | Уровень жидкости в резервуаре, м | Н                       | 7,8           | 10,4        |
| 3        | Манометрическая высота, м        | $h_m$                   | 14,6          | ----        |
| 4        | Вакуумметрическая высота, м      | $h_B$                   | -----         | 4,6         |

|   |                                                                                        |                                                      |                   |                   |
|---|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|
| 5 | Абсолютное давление на дне резервуара по показанию пьезометра, Па                      | $p = p_a + \rho g h_n$                               | 103520,2          | 101873,8          |
| 6 | Абсолютное давление в резервуаре над жидкостью, Па                                     | $p_0 = p_a + \rho g h_m$<br>$p_0 = p_a - \rho g h_b$ | 102755,8<br>----- | -----<br>100874,2 |
| 7 | Абсолютное давление на дне резервуара через показания мановакуумметра и уровнемера, Па | $p^* = p_0 + \rho g H$                               | 103520,2          | 101,893,4         |
| 8 | Относительная погрешность результатов определения давления на дне резервуара, %        | $\delta p = 100(p - p^*) / p$                        | 0                 | -0,01             |

$$P_a = 101325 \text{ Па}; \rho_{H_2O} = 1000 \text{ кг/м}^3; P = P_a + \rho g h_n;$$

$$P_1 = 101325 + 1000 \cdot 9.8 \cdot 0.224 = 103520.2 \text{ Па};$$

$$P_2 = 101325 + 1000 \cdot 9.8 \cdot 0.056 = 101873.8 \text{ Па};$$

$$P_0 = P_a + \rho g h_n;$$

$$P_0 = 101325 + 1000 \cdot 9.8 \cdot 0.106 = 102755.8 \text{ Па};$$

$$P_0 = P_a - \rho g h_b;$$

$$P_0 = 101325 - 1000 \cdot 9.8 \cdot 0.046 = 100874.2 \text{ Па};$$

$$P^* = P_0 + \rho g h;$$

$$P^* = 102755.8 + 1000 \cdot 9.8 \cdot 0.078 = 103520.2 \text{ Па};$$

$$P^* = 100874.2 + 1000 \cdot 9.8 \cdot 0.104 = 1011893.4 \text{ Па};$$

$$\delta p = 100(103520.2 - 103520.2) / 103520.2 \text{ Па};$$

$$\delta p = 100(101873.8 - 101893.4) / 101873.8 = -0.01 \%$$

Вывод: В данной работе научились определять давление путём измерения разности уровней сообщающихся сосудов и переводить показания приборов в абсолютные давления.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

### ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ.

#### 1.1 Цель работы

- Установить опытным путем наличие двух режимов движения жидкости.
- -Определить по опытным данным значения чисел Рейнольдса при ламинарном и турбулентном режимах движения.
- Определить момент смены режимов движения и значение критического числа Рейнольдса.

#### 1.2 Общие сведения

Различают два режима движения жидкости: ламинарный и турбулентный.

При ламинарном режиме частицы жидкости, двигаясь, например, в трубопроводе, остаются в том же слое, в котором они находились в начальный момент времени (или в начальном сечении). Движение характеризуется без перемешивания частиц, т.е. упорядоченной слоистостью параллельно направлению течения.

Ламинарный режим имеет место при движении по трубам жидкостей повышенной вязкости (нефть, смазочные масла, мазут и др.).

При турбулентном режиме отдельные частицы движутся по сложным траекториям, что приводит к интенсивному перемешиванию жидкости и хаотическому неупорядоченному ее течению. При турбулентном режиме происходят пульсации скорости и давления в данной точке потока жидкости.

Турбулентный режим наблюдается в водопроводе, а также при движении, по трубам бензина, керосина и других маловязких жидкостей.

Различный характер движения жидкостей при ламинарном и турбулентном режимах приводит и к разным законам сопротивления движения и, следовательно, к неодинаковым потерям энергии (напора). При ламинарном

режиме эти потери пропорциональны первой степени средней скорости потока, а при турбулентном - пропорциональны квадрату скорости. Установление характера режима движения жидкости является важной задачей при проведении гидравлических расчетов существующих или проектируемых гидравлических систем.

На режим движения жидкости оказывают влияние вязкость данной жидкости  $\nu$ , характерный размер потока  $l$  и средняя скорость потока  $w$ . Исходя из теории подобия, эти факторы объединяются в безразмерный комплекс, названный числом Рейнольдса ( $Re$ ), который для цилиндрической трубы диаметром  $d$  имеет вид:

$$Re = \frac{wd}{\nu}, \quad (1.1)$$

где  $\nu$  - кинематический коэффициент вязкости.

Число Рейнольдса представляет меру отношения сил инерции к силам трения между отдельными слоями жидкости.

Число  $Re$ , соответствующее моменту перехода ламинарного режима в турбулентный, называется критическим числом Рейнольдса ( $Re_{кр}$ ).

Как показывают опыты, значение  $Re_{кр}$  для цилиндрической трубы любого диаметра с обычной шероховатостью стенок составляет 2300 и не зависит от рода жидкости.

На практике режим движения жидкости определяется путем сравнения величины  $Re$ , подсчитанной по формуле (1.1), с критическим значением числа Рейнольдса. Если  $Re < Re_{кр}$ , то режим движения считается ламинарным, если  $Re > Re_{кр}$  - турбулентным.

Необходимо отметить, что в лаборатории, искусственно уменьшая возмущенность потока, особенно на входе трубы, можно получить ламинарный режим при числах Рейнольдса, значительно превышающих  $Re_{кр}$ . Однако такой ламинарный режим движения весьма неустойчив и при малейшем возмущении мгновенно переходит в турбулентный.

### 1.3 Описание опытной установки

Наблюдение ламинарного и турбулентного режимов движения производится на опытной установке (рисунок 1.1), состоящей из напорного открытого резервуара 1 и присоединенной к нему стеклянной трубы 2 с краном 3. Над напорным резервуаром помещен небольшой сосуд 4 с подкрашенной водой, которая по стеклянной трубке 5 при открытом кранике 6 поступает в трубу 2. Вода, поступающая из водопровода по трубе 7, подается в напорный резервуар 1. В резервуаре 1 для поддержания постоянного уровня установлена сливная труба 8. Вода из трубы 2 поступает в сбросную емкость. Температура воды в резервуаре 1 определяется термометром в месте слива.

#### 1.4 Порядок выполнения работы

1. Опыты проводятся при постоянной подаче воды из водопровода по трубе 7 и постоянном уровне воды в резервуаре 1, т.е. при сливе воды по трубе 8.
2. Частичным открытием крана 3 в стеклянной трубе 2 устанавливается небольшая средняя скорость воды, поступающей из напорного резервуара 1.

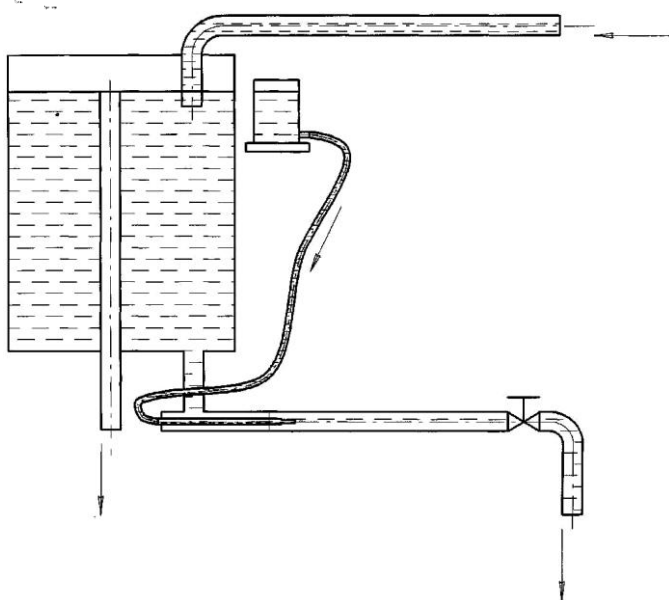


Рисунок 1.1 - Схема лабораторной установки для исследования режимов движения жидкостей в цилиндрической трубе.

3. Из сосуда 4 подкрашенная вода подается по трубке 5 в трубу 2, ее расход регулируется краном 6.

4. Для определения расхода измеряется объем воды  $V$  за время  $\tau$ , для этого под струю, вытекающую из трубы 2, подставляется мерный сосуд и одновременно включается секундомер.
5. По термометру определяется температура воды  $t$ .
6. Регулируя (увеличивая или уменьшая) краном 3 расход воды в трубе 2, проводят 3...5 опытов при ламинарном режиме движения.
7. При некотором открытии крана 3 и соответствующей скорости движения воды в трубе 2 фиксируется переходное состояние потока от ламинарного режима к турбулентному. При этом окрашенная струйка приобретает волнистый характер с местными размывами.
8. Дальнейшее открытие крана 3 приводит к установлению турбулентного режима движения с интенсивным перемешиванием краски с водой, поток в трубе 2 становится равномерно окрашенным. При этом режиме проводят 3...5 опытов со все увеличивающимся открытием крана 3, измеряя объем  $V$ , время  $\tau$  и температуру  $t$ .

Данные измерений и характер режима движения заносятся в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты измерений

| Номер опыта                                                       | Температура воды $t$ , $^{\circ}\text{C}$ | Кинематическая вязкость $\nu$ , $\text{м}^2/\text{с}$ | Объем воды $V$ , $\text{м}^3$ | Время $\tau$ , с | Расход воды $Q$ , $\text{м}^3/\text{с}$ | Средняя скорость $w$ , $\text{м}/\text{с}$ | Число Рейнольдса $Re$ |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------|
| Ламинарный режим движения                                         |                                           |                                                       |                               |                  |                                         |                                            |                       |
| 1                                                                 |                                           |                                                       |                               |                  |                                         |                                            |                       |
| 2                                                                 |                                           |                                                       |                               |                  |                                         |                                            |                       |
| 3                                                                 |                                           |                                                       |                               |                  |                                         |                                            |                       |
| Переходное состояние потока от ламинарного режима к турбулентному |                                           |                                                       |                               |                  |                                         |                                            |                       |
| 4                                                                 |                                           |                                                       |                               |                  |                                         |                                            |                       |
| 5                                                                 |                                           |                                                       |                               |                  |                                         |                                            |                       |
| Турбулентный режим движения                                       |                                           |                                                       |                               |                  |                                         |                                            |                       |
| 6                                                                 |                                           |                                                       |                               |                  |                                         |                                            |                       |
| 7                                                                 |                                           |                                                       |                               |                  |                                         |                                            |                       |

|   |  |  |  |  |  |  |  |
|---|--|--|--|--|--|--|--|
| 8 |  |  |  |  |  |  |  |
|---|--|--|--|--|--|--|--|

### 1.5 Обработка экспериментальных данных

По данным таблицы 1.2 в зависимости от замеренной в опытах температуры воды в резервуаре 1 определяется кинематический коэффициент вязкости  $\nu$ .  
Определяется расход воды для каждого опыта по зависимости:

$$Q = V/t \quad (1.2)$$

Определяется средняя скорость потока в трубе по формуле:

$$w = Q/F \quad (1.3)$$

где  $F$  - площадь поперечного сечения трубы 12.

По формуле (1.1) для каждого опыта подсчитывается число Рейнольдса.  
Результаты вычислений заносятся в таблицу 1.1

Таблица 1.2 - Кинематическая вязкость воды

| Температура воды, °C                   | 5    | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   | 35   |
|----------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$ | 1,52 | 1,31 | 1,14 | 1,01 | 0,90 | 0,81 | 0,73 |

### 1.6 Указания к оформлению отчета.

Отчет должен содержать цель работы, краткое теоретическое описание, схему установки, таблицы экспериментальных данных, расчеты расхода воды, средней скорости движения жидкости и числа Рейнольдса для каждого опыта, выводы по полученным результатам.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА УРАВНЕНИЯ

#### Д.БЕРНУЛЛИ.

Цель работы: По результатам экспериментальных данных и расчетов построить диаграмму уравнения Д.Бернулли.

## 1. Основные теоретические положения.

Уравнение Д.Бернулли для реального потока жидкости для двух произвольно взятых сечений имеет следующий вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + \sum h, \quad (9)$$

где:  $z_1, z_2$  – нивелирная высота соответственно для первого и второго сечений, м;

– пьезометрическая высота соответственно для первого и второго сечений, м;

– коэффициент кинетической энергии потока (или коэффициент Кориолиса), учитывающий неравномерность распределения скоростей по сечению потока (величина безразмерная);

– скоростная высота или скоростной напор, м;

$\sum h$  – сумма всех гидравлических потерь на участке между первым и вторым сечением, м.

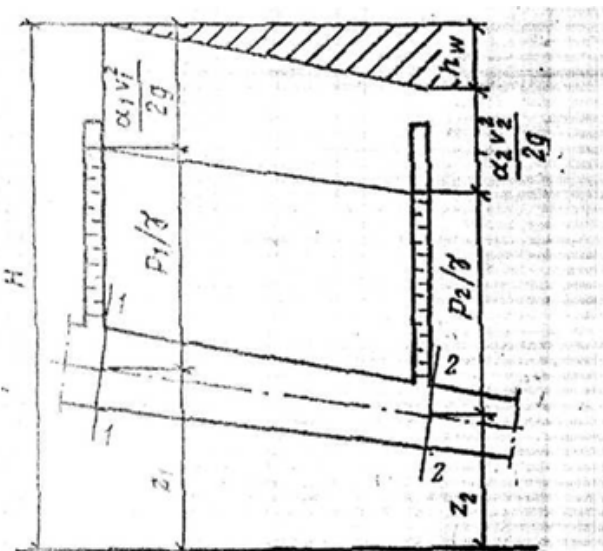


Рисунок 1 – Диаграмма уравнения Д.Бернулли

Итак, с геометрической точки зрения уравнение Д.Бернулли показывает, что сумма трех высот – геометрической, пьезометрической и скоростной с учетом всех гидравлических потерь – есть величина, постоянная вдоль струйки.

С энергетической точки зрения члены уравнения Д.Бернулли имеют следующий смысл:

$z$  – удельная энергия положения;

$z + p/\gamma$  – удельная потенциальная энергия жидкости;

$v/2g$  – удельная кинетическая энергия.

Таким образом, – уравнение Д.Бернулли является примером закона сохранения энергии М.В.Ломоносова в применении к жидкости.

## 2. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка показана на рисунке 2.

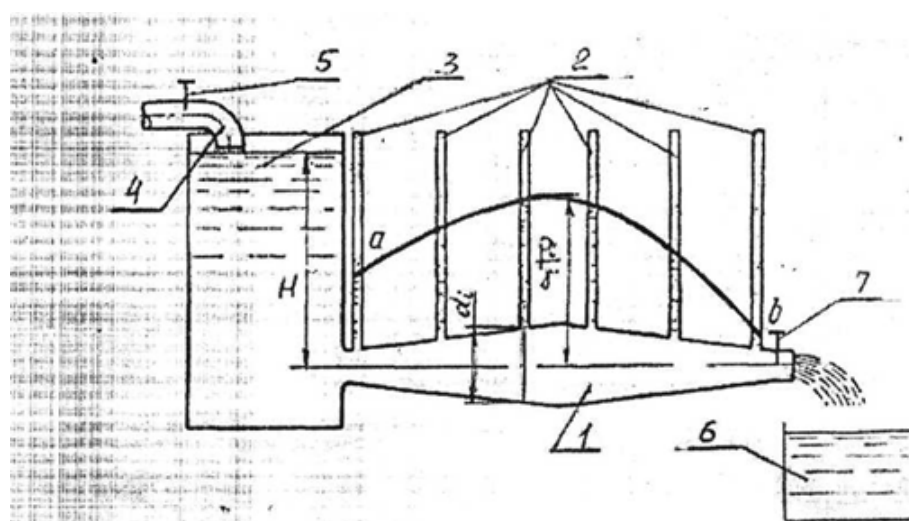


Рисунок 2 – Схема установки для экспериментального определения членов уравнения Д.Бернулли

Экспериментальная установка состоит из трубы 1 переменного диаметра (а в шести сечениях которой установлены пьезометры 2. Жидкость подается в напорный бак 3, через трубу 4 и краном 5 регулируется количество поступающей жидкости. В баке 3 напор ( $H$ ) поддерживается постоянным. Жидкость выливается в мерный бак 6. Краном 7 изменяется

расход жидкости проходящей по, трубе 1, а следовательно скорость жидкости, протекающей по трубе 1.

### 3 Методика проведения эксперимента

Методика проведения эксперимента заключается в следующем. Открыв кран 5 через трубу 4, наполняем, напорный бак 3 до уровня Н. Поддерживая этот уровень • постоянным, краном 7 устанавливаем некоторый расход жидкости и с помощью мерного бака 6 и секундомера определяем время (t) наполнения указанного объема - жидкости (W). Снимаем показания пьезометров 2 и заносим их в трубе 1.

#### 4 Регистрация опытных данных:

4.1 Объем воды, поступившей в мерный бак 6 W (см<sup>3</sup>)

4.2 Время наполнения объема t (с)

Тогда расход потока  $Q = \frac{W}{t}$  (см<sup>3</sup>/с).

#### 4.3 Экспериментальные данные

Таблица 1

| №<br>п/<br>п | Величина              | Ед.<br>измер. | Номер сечения |   |   |   |   |   |
|--------------|-----------------------|---------------|---------------|---|---|---|---|---|
|              |                       |               | 1             | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1            | Диаметр сечения       | см            |               |   |   |   |   |   |
| 2            | Показания пьезометров | см            |               |   |   |   |   |   |

#### 4.4 Обработка результатов эксперимента

Таблица 2

| №<br>п/п | Вычислительная формула | Расчетная зависимость   | Ед.<br>измер.   | Номер сечения |   |   |   |   |   |
|----------|------------------------|-------------------------|-----------------|---------------|---|---|---|---|---|
|          |                        |                         |                 | 1             | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1        | Площадь сечения        | $S = \frac{\pi d^2}{4}$ | см <sup>2</sup> |               |   |   |   |   |   |
| 2        | Средняя скорость       | $v = \frac{Q}{S}$       | см/с            |               |   |   |   |   |   |
| 3        | Скоростной напор       | $\frac{v^2}{2g}$        | см              |               |   |   |   |   |   |
| 4        | Полный напор           | h =                     | см              |               |   |   |   |   |   |

|   |               |     |    |  |  |  |  |  |  |
|---|---------------|-----|----|--|--|--|--|--|--|
| 5 | Потери напора | H-h | см |  |  |  |  |  |  |
|---|---------------|-----|----|--|--|--|--|--|--|

4.5 По результатам экспериментальных данных и расчетных параметров построить в масштабе диаграмму уравнения Д.Бернулли, руководствуясь рисунком 1.

## 5. Выводы

Обратить внимание:

- на изменение пьезометрической линии и линии полного гидродинамического напора;
- на количественное изменение гидравлических потерь.

6. Контрольные вопросы:

1. Написать уравнение Д.Бернулли для реального потока.
2. Объяснить геометрический и энергетический смысл членов, входящих в уравнение Д.Бернулли и единицы измерения, м.
3. Рассказать методику проведения эксперимента и снятие опытных данных.
4. Объяснить методику построения диаграммы уравнения Д.Бернулли.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПОРА ПО ДЛИНЕ ПРИ НАПОРНОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ.

#### Цель работы.

1. Экспериментальное определение потерь напора по длине при ламинарном и турбулентном режимах движения жидкости в напорных трубопроводах.
2. Экспериментальное определение коэффициента Дарси и сопоставление опытных и расчетных его значений при различных режимах.
3. Построение по опытным данным графиков зависимости  $h_f = f(v)$  и  $\lambda = f(Re_d)$  и их анализ.

## Основные положения и расчетные зависимости

При движении реальной жидкости часть ее механической энергии затрачивается на преодоление гидравлических сопротивлений, вызванных внешними и внутренними силами трения, распределенными по всей длине потока. Эта часть потерь удельной энергии потока носит название потери напора по длине  $h_f$ .

При установившемся движении жидкости в напорном трубопроводе круглого сечения потери напора по длине определяются по формуле Дарси-Вейсбаха

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

где  $l$  – длина трубопровода;

d – диаметр;

$v$  – средняя скорость потока;

$\lambda$  – коэффициент Дарси (коэффициент гидравлического трения), зависящий в общем случае от относительной шероховатости стенок трубопровода  $\Delta/d$  ( $\Delta$  – средняя высота выступов шероховатости) и числа Рейнольдса  $Re_d = vd/\nu$ .

Эта зависимость установлена экспериментальным путем и представлена в графическом виде на рис. 1 (график Никурадзе).

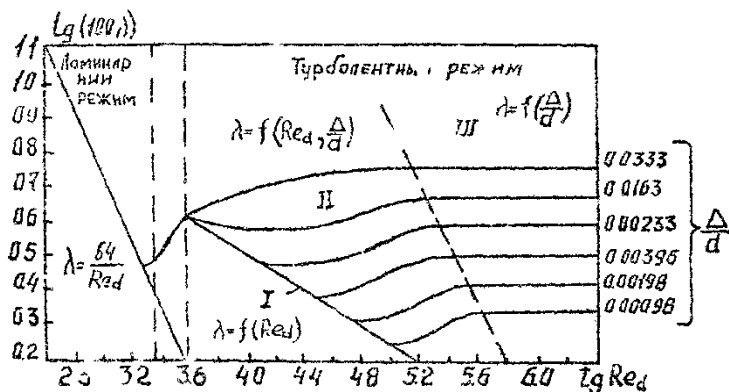


Рис. 1

При ламинарном режиме коэффициент Дарси вычисляется по формуле

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (2)$$

При турбулентном режиме для определения величины  $\lambda$  существует ряд эмпирических формул, относящихся к различным областям сопротивления. Среди них наиболее распространены:

в области гидравлических гладких труб I, при  $4000 \leq Re_d \leq (Re_d)_{np}^I$  формула Блазиуса

$$\lambda = \frac{0,316}{Re_d^{0,25}} \quad (3)$$

в области квадратичного сопротивления III, при  $Re_d \geq (Re_d)_{np}^{II}$  формула Шифринсона

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25} \quad (4)$$

во всех трех областях I, II, III (в том числе и в области докватратичного сопротивления, при  $(Re_d)_{np}^I < Re_d < (Re_d)_{np}^{II}$  формула А.Д.Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad (5)$$

Предельные числа Рейнольдса могут быть найдены приближенно по формулам:

$$(Re_d)_{np}^I \approx \frac{10d}{\Delta} \quad (6)$$

$$(Re_d)_{np}^{II} \approx \frac{500d}{\Delta} \quad (7)$$

Анализ формулы (1) совместно с формулами (2)-(5) показывает, что величину потерь напора по длине можно представить в виде:

$$h_p \sim v^m \quad (8)$$

где  $m$  – показатель степени, равный: при ламинарном режиме  $m = 1$ , при турбулентном режиме – в области гидравлически гладких труб  $m=1,75$ , в области доквадратичного сопротивления  $m = 1,75 \div 2$ , в области квадратичного сопротивления  $m=2$ .

### Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 2) состоит из напорного бака 1 и горизонтального трубопровода с диаметром  $d = 2,8$  см. В начале и в конце трубопровода 2 установлены пьезометры  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ . В конце трубопровода имеются вентиль 3, при помощи которого регулируется расход воды.

Вода в напорный бак подается по трубе 4, снабженной вентилем 5. Напор воды в баке поддерживается во время опытов постоянным с помощью переливной трубы 6 и измеряется водомерным стеклом 7. Вентиль 8 служит для соединения трубопровода с напорным баком.

### Порядок проведения опытов

Опыты проводятся последовательно: вначале на трубопроводе малого диаметра, затем на трубопроводе большого диаметра.

1. При закрытых вентилях 3 и 8 на трубопроводе открывают вентиль 5 на трубе 4 и подают воду в напорный бак. После заполнения напорного бака (о чем свидетельствует начавшийся сброс воды через переливную трубу) открывают вентиль 8 на трубопроводе и проверяют отсутствие воздуха в пьезометрах  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  (уровни жидкости в них должны находиться на одинаковой высоте).

2. Открывают вентиль 3, и в трубопроводе устанавливается некоторый постоянный расход воды. Объемным способом измеряют расход воды  $Q$ , для чего фиксируют объем воды  $W$ , поступившей в мерный сосуд, и время его наполнения  $t$ .

3. Замеряют температуру воды в мерном баке  $t^0$  и снимают показания обоих пьезометров, установленных на трубопроводе,  $\frac{P_1}{\rho g}$  и  $\frac{P_2}{\rho g}$ .

4. Увеличивают степень открытия крана 3 и все замеры повторяют. Проводят не менее 5 опытов при постепенно увеличивающейся степени открытия крана 3.

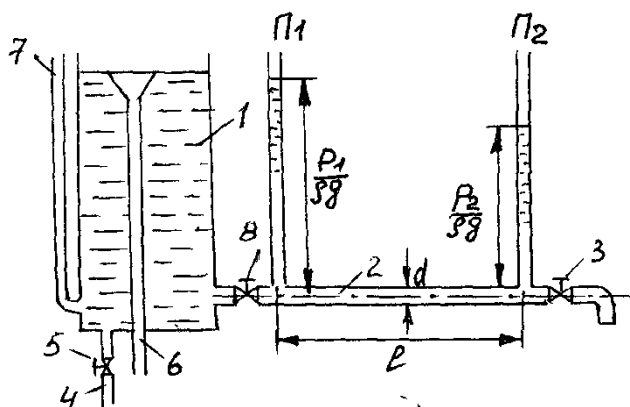


Рис. 2. Экспериментальная установка

Все опытные данные вносят в таблицу 1.

#### Обработка экспериментальных данных

При обработке экспериментальных данных, записанных в таблице 1, заполняются таблицы 2 и 3 и строятся графики  $h_f = f(v)$  и  $\lambda = f(Re_d)$ .

По значению температуры воды  $t^0$  по справочнику или по формуле  $\nu = f(t^0)$  определяется кинематический коэффициент вязкости воды.

По значению расхода воды  $Q$  для каждого опыта вычисляется средняя скорость потока  $v = Q/\omega$ , где  $\omega$  – площадь поперечного сечения соответствующего трубопровода.

По разности показаний пьезометров в каждом опыте определяются потери напора по длине трубопровода

$$h_f = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g}, \quad (9)$$

а затем на основе формулы (1) вычисляются опытные значения коэффициента Дарси

$$\lambda_{оп} = \frac{2gdh_f}{lv^2} \quad (10)$$

По значениям  $v$ ,  $d$  и  $v$  для каждого опыта подсчитывают числа Рейнольдса  $Re_d$ , а затем по формулам (6) и (7) находят предельные числа Рейнольдса  $(Re_d)_{пр}^I$  и  $(Re_d)_{пр}^{II}$ . Найденные на основе опытных данных величины вносят в таблицу 2, а затем для каждого опыта путем сравнения значений  $Re_d$  с  $(Re_d)_{пр}$ ,  $(Re_d)_{пр}^I$  и  $(Re_d)_{пр}^{II}$  устанавливают режим движения и область сопротивления.

В зависимости от режима движения и области сопротивления находят расчетные значения коэффициента Дарси по существующим формулам (2)-(5). Результаты этих расчетов вносят в таблицу 3. Сравнивают опытные и расчетные значения  $\lambda$ .

Таблица 1

Температура воды  $t^0 = \dots\dots^\circ\text{C}$ .

Кинематический коэффициент вязкости  $\nu = \dots\dots\dots\text{м}^2/\text{с}$ .

| Номер опыта | Геометрические характеристики трубопровода                                           | Объем воды $W$ , $\text{м}^3$ | Время $T$ , с | Расход $Q$ , $\text{м}^3/\text{с}$ | Показания пьезометров    |                          |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
|             |                                                                                      |                               |               |                                    | $\frac{P_1}{\rho g}$ , м | $\frac{P_2}{\rho g}$ , м |
|             | $d = 2,8 \cdot 10^{-2}$ м<br>$l = 1,32$ м<br>$\Delta =$ м<br>$\omega =$ $\text{м}^2$ |                               |               |                                    |                          |                          |

Таблица 2

| Номер опыта | Расход $Q$ , $\text{м}^3/\text{с}$ | Средняя скорость $V$ , $\text{м}/\text{с}$ | Потери напора $h_f$ , м | Коэффициент Дарси $\lambda_{оп}$ | Предельные числа Рейнольдса |                    | Режим движения и область сопротивления |
|-------------|------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------------|----------------------------------------|
|             |                                    |                                            |                         |                                  | $(Re_d)_{пр}^I$             | $(Re_d)_{пр}^{II}$ |                                        |
|             |                                    |                                            |                         |                                  |                             |                    |                                        |

На основе данных таблицы 2 строят на миллиметровой бумаге следующие графики: 1) зависимость потерь напора по длине от средней скорости потока  $h_f = f(v)$ ; 2) зависимость коэффициента Дарси от числа Рейнольдса  $\lambda = f(Re)$ . Второй график строят в логарифмических координатах (см. рис. 1). На обоих графиках указывают зоны, соответствующие ламинарному и турбулентному режиму, а также области сопротивления I, II, III.

Таблица 3

| Номер опыта | Режим движения и область сопротивления | Опытное значение коэффициента Дарси $\lambda_{оп}$ | Расчетные значения коэффициента Дарси, найденные по формулам |              |                 |                |
|-------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------|-----------------|----------------|
|             |                                        |                                                    | для ламинарного режима (I)                                   | Блазиуса (3) | А.Д.Альтуля (4) | Шифринсона (5) |
|             |                                        |                                                    |                                                              |              |                 |                |

#### Контрольные вопросы

1. Ламинарный и турбулентный режимы движения жидкости. Критические числа Рейнольдса.
2. Распределение скоростей и потери напора при ламинарном режиме в круглой трубе. Формулы Дарси-Вейсбаха, Пуазейля.
3. Кинематическая структура турбулентного потока. Пульсация скоростей. Распределение осредненных скоростей по сечению турбулентного потока в круглой трубе.
4. Потери напора при турбулентном движении. Коэффициент Дарси. График Никурадзе. Области сопротивления при турбулентном режиме. Эмпирические формулы для коэффициента Дарси.
5. Формула Шези. Эмпирические формулы для коэффициента Шези.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРОВАНИЯ.

#### ВВЕДЕНИЕ

Процессом фильтрации[1]называют процесс разделения неоднородных систем при помощи пористых перегородок, которые задерживают одни фазы этих систем и пропускают другие. К этим процессам относятся разделение суспензий на чистую жидкость и влажный осадок, аэрозолей на чистый газ и сухой осадок или на чистый газ и жидкость. Фильтры разнообразных конструкций широко используются в различных отраслях промышленности для разделения неоднородных систем, для очистки природных и сточных вод. Фильтрация может обеспечить почти полную очистку жидкости или газа от взвешенных частиц и в этом отношении имеет преимущество перед процессами осаждения.

В качестве фильтрующих материалов в промышленных аппаратах используют естественные и искусственные зернистые и пористые тела: песок, гравий, ткани, сетки, пористые керамику и пластические массы.

Значение процессов фильтрации возрастает с увеличением масштабов производства химической и родственных ей отраслей промышленности. Это объясняется тем, что процесс разделения суспензий нередко вызывает затруднения, обусловленные, главным образом, большим сопротивлением осадка и, соответственно, малой скоростью фильтрации. При этом для достижения заданной производительности фильтровальной установки требуется большое число фильтров определенной конструкции. Поэтому возникла тенденция к увеличению размеров фильтровального оборудования и интенсификации процессов фильтрации.

#### 1. Классификационные признаки процессов фильтрации

Разделение суспензий, состоящих из жидкости и взвешенных в ней твердых частиц, производят с помощью фильтра, который в простейшем виде является сосудом, разделенным на две части фильтровальной

перегородкой. В разделенных частях сосуда создают разность давлений, под действием которой жидкость проходит через поры фильтровальной перегородки, причем твердые частицы задерживаются на ее поверхности. Таким образом, суспензия разделяется на чистый фильтрат и влажный осадок. Разность давлений фильтровальной перегородки создают разными способами, в результате чего осуществляются разные процессы фильтрации.

Фильтрация и фильтры можно классифицировать по нескольким признакам:

1) по движущей силе - фильтрат проходит через фильтрующую перегородку под действием:

- а) гидростатического напора (силы тяжести);
- б) центробежной силы;
- в) создания повышенного давления над перегородкой;
- г) создания вакуума под перегородкой;

2) по механизму процесса фильтрации:

- а) с образованием осадка на поверхности фильтрующей перегородки;
- б) с закупоркой пор фильтрующей перегородки;

3) по целенаправленности процесса - целью процесса фильтрации может быть получение:

- а) сухого остатка;
- б) чистого фильтрата;
- в) сухого остатка и чистого фильтрата одновременно;

4) по принципу действия:

- а) непрерывное;
- б) периодическое фильтрация;

5) по природе осадка с образованием:

- а) сжимаемого;
- б) несжимаемого осадка;

6) по направлению потока:

- а) сверху вниз;
- б) снизу вверх;
- в) в сторону.

Фильтрованием отделяются твердые частицы, средний размер которых одного порядка величины с размерами пор фильтрующей перегородки (1...10 мкм и более).

В промышленных условиях применяют разнообразные, часто довольно сложные по конструкции фильтры, причем фильтровальная перегородка имеет плоскую или цилиндрическую форму.

Фильтры чаще всего подразделяются на фильтры периодически действующие и непрерывно действующие. В первых - фильтровальная перегородка неподвижна, во вторых - она непрерывно перемещается по замкнутому пути. При этом в фильтрах периодического действия на всех элементах перегородки одновременно осуществляются одни и те же процессы, например, поступление суспензии, образование осадка или его удаление. В фильтрах непрерывного действия на различных элементах перегородки происходят разные процессы в зависимости от того, на каком участке замкнутого пути находится в данный момент рассматриваемый элемент перегородки; так, на один участок перегородки поступает суспензия, а на других её участках образуется и удаляется осадок.

## 2. ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ФИЛЬТРОВАНИЯ

Общая теория фильтрования основывается на эмпирическом законе Дарси, установленном в 1856 г., согласно которому скорость фильтрования воды сквозь слой песка пропорциональна гидростатическому давлению и обратно пропорциональна толщине слоя. Дарси установил, что при постоянном сопротивлении слоя песка [2,23]:

$$V = k \cdot F \cdot I, (1)$$

где V-объем фильтрата, м<sup>3</sup>/с,

$k$  - коэффициент фильтрации, зависящий от свойств грунта (величина обратная сопротивлению слоя),  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ,

$F$  - площадь фильтрации,  $\text{м}^2$ ,

$I$  - гидравлический уклон, равный потере напора  $\Delta H$  на пути  $L$ ,  $\text{м}$ .

Приведённое соотношение аналогично известным для интенсивности перемещения тепла, вещества и является частным случаем закона, выражающего скорость процесса. Все рассмотренные далее более сложные уравнения фильтрования представляют собой по существу модификацию закона Дарси.

Фильтрование является гидродинамическим процессом, скорость которого прямо пропорциональна разности давлений, создаваемой по обеим сторонам фильтровальной перегородки (движущая сила процесса), и обратно пропорциональна сопротивлению, испытываемому жидкостью при ее движении через поры перегородки и слой образовавшегося осадка. Сопротивление при фильтровании является суммой сопротивления фильтровальной перегородки и слоя осадка.

В отечественной литературе традиционно уравнение фильтрования в дифференциальной форме может быть записано так:

$$\frac{dV}{F \cdot dt} = \frac{\Delta p}{\mu \cdot (R_{\text{ос}} + R_{\text{ф.н}})}, \quad (2)$$

где  $V$  – объём фильтрата,  $\text{м}^3$ ,

$F$  – поверхность фильтрования,  $\text{м}^2$ ,

$t$  - продолжительность фильтрования,  $\text{с}$ ,

$\Delta p$  - разность давлений,  $\text{Па}$ ,

$\mu$  - вязкость жидкой фазы суспензии,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ,

$R_{\text{ос}}$  - сопротивление слоя осадка,  $\text{м}^{-1}$ ,

$R_{\text{ф.н}}$  - сопротивление фильтровальной перегородки,  $\text{м}^{-1}$ .

При этом величина

$$\frac{dV}{F \cdot d\tau} = W, \quad (3)$$

где  $W$  представляет собой переменную скорость фильтрования, выраженную в м /с.

Разность давлений по обе стороны фильтровальной перегородки создают разными способами, в результате чего осуществляют различные процессы фильтрования.

Если пространство над суспензией сообщают с источником сжатого газа, или пространство под фильтровальной перегородкой присоединяют к источнику вакуума, то происходит процесс фильтрования при постоянной разности давлений, поскольку давление в ресиверах поддерживается постоянным. При этом скорость процесса уменьшается в связи с увеличением сопротивления слоя осадка возрастающей толщины.

Уравнение фильтрования при постоянной разности давлений:

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta p \cdot F^2 \cdot \tau}{x \cdot r_{oc} \cdot \mu} - \frac{2R_{\phi.n} \cdot F}{x \cdot r_{oc}}}, \quad (4)$$

где  $x$  - отношение объёма осадка к объёму фильтрата,

$r_{oc}$  - удельное сопротивление осадка (или слоя), м<sup>-2</sup>.

Для режима фильтрования при постоянной разности давлений продолжительность фильтрования пропорциональна квадрату объёма полученного фильтрата:

$$\tau = \frac{x \cdot r_{oc} \cdot \mu}{2 \cdot \Delta p} \cdot \left(\frac{V}{F}\right)^2 + \frac{R_{\phi.n} \cdot \mu}{\Delta p} \cdot \frac{V}{F}. \quad (5)$$

Если суспензию подают на фильтр поршневым насосом, производительность которого при данном числе оборотов электродвигателя постоянна, то осуществляется процесс фильтрования при постоянной скорости, при этом разность давлений увеличивается вследствие уже упоминавшегося увеличения сопротивления осадка возрастающей толщины.

Для режима фильтрования при постоянной скорости перепад давления возрастает по мере увеличения продолжительности фильтрования:

$$\Delta p = \mu \cdot r_{oc} \cdot x \cdot W^2 \cdot \tau + \mu \cdot R_{ф.н} \cdot W. \quad (6)$$

Если суспензию транспортируют на фильтр центробежным насосом, производительность которого при данном числе оборотов электродвигателя уменьшается при возрастании сопротивления осадка, что обуславливает повышение разности давлений, то производится процесс фильтрования при переменных разности давлений и скорости.

Независимо от того, каким образом создают разность давлений, движущая сила процесса фильтрования возрастает прямо пропорционально этой разности. Однако в большинстве случаев скорость фильтрования возрастает медленнее, чем увеличивается разность давлений, так как при увеличении последней поры перегородки и осадка сжимаются, и сопротивление возрастает.

Для осадка или фильтрующей перегородки постоянной толщины и с постоянной долей пустот в сечении -  $\square$ , уравнение кинетики процесса фильтрования можно записать (в соответствии с законом Дарси) в следующем виде:

$$\frac{dV}{F \cdot d\tau} = \frac{\Phi^2 \cdot \varepsilon^3 \cdot d^2}{110 \cdot (1 - \varepsilon)^2} \cdot \frac{\Delta p}{\mu \cdot h_{oc}}, \quad (7)$$

где V-объем фильтрата, м<sup>3</sup>,

t - продолжительность фильтрования, с,

$\varepsilon$  - порозность слоя или осадка,

$\Phi$  - фактор формы, м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>,

$\Delta p$ - перепад давлений при фильтровании, Па.

$\mu$  - вязкость фильтрата, Па · с,

$h_{oc}$  -толщина осадка или слоя, м,

d – диаметр шара, имеющий тот же объем, что и частица,

Фактор формы  $\Phi$  представляет собой отношение поверхности шара, имеющего такой же объем, что и частица неправильной формы, к действительной поверхности частицы.

Порозность выражает объём свободного пространства между частицами в единице объёма, занятого слоем:

$$\varepsilon = \frac{V' - V_0}{V'}, \quad (8)$$

где  $V'$  - общий объём, занимаемый слоем,  $\text{м}^3$ ,

$V_0$  - объём, занимаемый самими частицами, образующими слой,  $\text{м}^3$ .

В реальных условиях порозность  $\varepsilon$  осадка зависит от скорости осаждения частиц и от состояния поверхности, на которой происходит образование слоя осадка.

Большое влияние на ход процесса фильтрования оказывает начальная стадия – стадия образования осадка, т. к., во-первых, в начале процесса скорость образования фильтрата максимальна, во-вторых, повышенная скорость образования фильтрата может привести к быстрой закупорке пор фильтрующей перегородки и, следовательно, к быстрому увеличению сопротивления, в-третьих, характер образования начальных слоёв осадка может оказать значительное влияние на структуру всего слоя осадка.

Осадки могут быть сжимаемыми и несжимаемыми. Несжимаемые осадки и фильтрующие перегородки характеризуются принятым допущением: порозность их, а, следовательно, и сопротивление потоку жидкости в процессе фильтрования остаются постоянными.

Практически несжимаемых осадков не бывает, но к этой группе обычно относят осадки веществ минерального происхождения (песок, мел, сода и др.) с размером частиц больше 100 мкм, сопротивление слоя которых движущемуся потоку незначительно зависит от перепада давлений или скорости осаждения.

К несжимаемым перегородкам относятся пористые керамические или стеклянные, а также металлические фильтрующие перегородки. Сжимаемые осадки и перегородки характеризуются уменьшением порозности в результате образования более плотного осадка и увеличением сопротивления при повышении перепада давлений.

Для сильно сжимающихся осадков (гидроокиси железа, меди и др.) увеличение разности давлений сверх некоторого критического значения приводит к уменьшению скорости фильтрования.

В общем случае для образования несжимаемого осадка на несжимаемой фильтрующей перегородке (сопротивление которой пренебрежимо мало) при  $\varepsilon = \text{const}$  в уравнении (7) можно объединить постоянные величины, характеризующие свойства данного осадка:

$$r_{oc} = \frac{110 \cdot \mu \cdot (1 - \varepsilon)^2}{\Phi^2 \cdot \varepsilon^3 \cdot d^2} \quad (9)$$

Тогда уравнение (7) примет вид:

$$\frac{dV}{F \cdot d\tau} = \frac{\Delta p}{r_{oc} \cdot \mu \cdot h_{oc}} \quad (10)$$

или

$$r_{oc} = \frac{\Delta p}{W \cdot \mu \cdot h_{oc}} \quad (11)$$

Таким образом, удельное сопротивление осадка численно равно разности давлений, необходимой для того, чтобы жидкая фаза с вязкостью 1 Па·с фильтровалась со скоростью 1 м/с сквозь слой осадка толщиной 1 м.

Удельное сопротивление представляет собой сопротивление единицы объёма осадка высотой 1 м, отложенного на площади 1 м<sup>2</sup>, и может быть определено опытным путём.

Сопротивление всего слоя осадка можно выразить равенством:

$$R_{oc} = r_{oc} \cdot h_{oc} \quad (12)$$

Толщину осадка  $h_{oc}$  можно выразить с помощью объема фильтрата, учитывая пропорциональность объемов осадка и фильтрата.

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

$$R_{oc} = K \cdot V, \quad (13)$$

где  $K$  – константа фильтрования, характеризующая режим процесса фильтрования и физико-химические свойства осадка и жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Сопротивление фильтрующей перегородки включает сопротивление самой перегородки и сопротивление тонкого слоя осадка, оставшегося на перегородке.

В начальный момент фильтрования, когда на фильтровальной перегородке ещё не образовался слой осадка, из уравнения (2) получим:

$$R_{\phi.n} = \frac{\Delta p}{\mu \cdot W}. \quad (14)$$

Это означает, что сопротивление фильтровальной перегородки численно равно разности давлений, необходимой для того, чтобы жидкая фаза с вязкостью  $1 \text{ Па}\cdot\text{с}$  проходила сквозь фильтровальную перегородку со скоростью  $1 \text{ м/с}$ .

Сопротивление фильтрующей перегородки можно заменить сопротивлением слоя осадка, оказывающего такое же сопротивление процессу фильтрования, какое оказывает фильтрующая перегородка, и выразить соответствующим количеством фильтрата  $C$ :

$$R_{\phi.n} = K \cdot C, \quad (15)$$

где  $C$  – константа фильтрования, характеризующая гидравлическое сопротивление фильтрующей перегородки,  $\text{м}^3/\text{м}^2$ .

Для режима фильтрования при постоянной разности давлений уравнение скорости фильтрования имеет вид:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta p}{K \cdot (V + C)} = \frac{\Delta p}{R}, \quad (16)$$

$$\text{где } R = R_{\alpha} + R_{\phi.n}.$$

После соответствующих преобразований получим параболический закон фильтрования:

$$(V + C)^2 = K \cdot (t + t_0), \quad (17)$$

где  $t_0$  - продолжительность образования слоя осадка с сопротивлением, равным сопротивлению фильтрующей перегородки. Графическая зависимость  $V=f(t)$  приведена на рисунке 1.

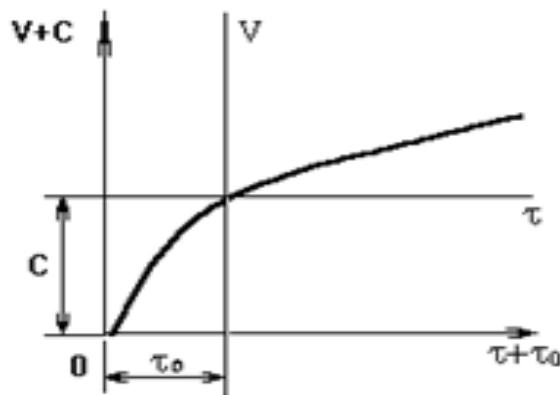


Рисунок 1. Графическая зависимость  $V=f(t)$ .

Из рисунка 1 следует, что вершина кривой будет совпадать с началом координат лишь в том случае, когда кроме сопротивления осадка учитывается сопротивление фильтрующей перегородки. В начальный момент процесса, когда  $t=0$ ,  $V=0$ , уравнение (17) примет вид:

$$C^2 = K \cdot t_0. \quad (18)$$

Тогда для расчета производительности фильтрата или продолжительности фильтрования удобно использовать зависимость, получающуюся после раскрытия скобок в уравнении (17) и учёта уравнения (18)

$$V^2 + 2V \cdot C = K \cdot t. \quad (19)$$

Константы фильтрования  $C$  и  $K$ , необходимые для расчетов, определяются экспериментально. Замеряют объемы фильтрата  $V$  и время  $t$ , в течение которого собраны эти объемы, затем уравнение, связывающее скорость фильтрования  $dV/dt$  и продолжительность фильтрования  $t$ , может быть выражено прямой линией.

Так, дифференцируя уравнение (19), имеем:

$$2(V+C) \cdot dV = K \cdot dt \quad (20)$$

или

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{K}{2(V+C)}. \quad (21)$$

В уравнении (21)  $dV$  и  $d\tau$  представляют собой приращение объема, полученного фильтрата и времени фильтрования:

$$\frac{d\tau}{dV} = \frac{2V}{K} + \frac{2C}{K} = AV + B. \quad (22)$$

Это уравнение изображается прямой линией ДМ (рисунок 2), наклоненной к оси абсцисс под углом  $\alpha$ , тангенс которого  $\operatorname{tg} \alpha = 2/K$ . Эта линия отсекает от оси ординат (при  $V=0$ ) отрезок  $B=2C/K$ . Для графического определения констант  $K$  и  $C$  на оси ординат откладывают величину, обратную скорости фильтрования  $dt/dV=\Delta t/\Delta V$ , а по оси абсцисс - объемы фильтрата, собранного с единицы поверхности фильтра (рисунок 2). Экстраполируют построенную по опытным точкам прямую до пересечения с абсциссой, находят величину константы  $C$ , равную отрезку  $ДО$ , а по тангенсу угла наклона прямой - величину  $K$ .

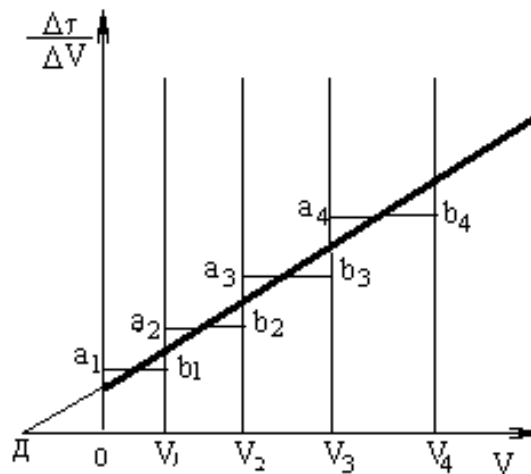


Рисунок 2 – Графическая зависимость  $\frac{\Delta\tau}{\Delta V} = f(V)$

Опытные значения объемов фильтрата  $V_1$  и  $V_2$  за время  $t_1$  и  $t_2$  позволяют вычислить константы  $K$  и  $C$  с помощью уравнения (19), т. е., решая систему:

$$\begin{cases} V_1^2 + 2CV_1 = K\tau_1 \\ V_2^2 + 2CV_2 = K\tau_2 \end{cases} . (23)$$

Необходимо отметить, что уравнение (2) и все последующие связанные с ним соотношения применимы только к ламинарному течению жидкости в порах осадка. Такое допущение основано на том, что при малых размерах пор и скоростях течения числа Рейнольдса невелики.

### 3. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является определение констант процесса фильтрования, а также производительности фильтра по фильтрату.

### 4. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка для проведения лабораторных работ по фильтрованию (рисунок 3) состоит из погружного элемента вакуум-фильтра (1), бачка с мешалкой (2) для суспензии, вакуум-насоса (8), приемника для фильтрата (3) и измерительных приборов: термометра (4), вакуумметра (5) и секундомера.

Элемент вакуум-фильтра разборный и состоит из воронки со съёмной решеткой (дырчатым диском) и прижимной крышкой. На воронку с установленной решеткой накладывают фильтровальную ткань и зажимают крышкой.

Отдельные части установки соединены между собой трубопроводами и вакуумными резиновыми трубками. Имеется кран (6), которым при работающем вакуум-насосе создают нужный вакуум, и кран (7) или зажим, установленный между бачком для суспензии и приемником для фильтрата. Этот кран открывают после подготовки всей установки к работе на заданном режиме.

### 5. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Приготавливают суспензию (или пользуются готовой суспензией) и заливают в бак (2) – рисунок 3. Суспензию готовят в отношении Т:Ж=1:1000. Во избежание уплотнения осадка (мел или другой материал) включают мешалку.

Собирают вакуум-фильтр (1) и устанавливают его в баке (2), погружая в суспензию на несколько сантиметров. Зажим или кран (7) закрыт, кран (9) вначале открыт. Включают вакуум-насос и, осторожно закрывая кран (9), устанавливают заданный руководителем вакуум по вакуумметру (5). После установления рабочего режима открывают кран (7) и одновременно включают секундомер. Схема лабораторной установки фильтрования приведена на рисунке 3.

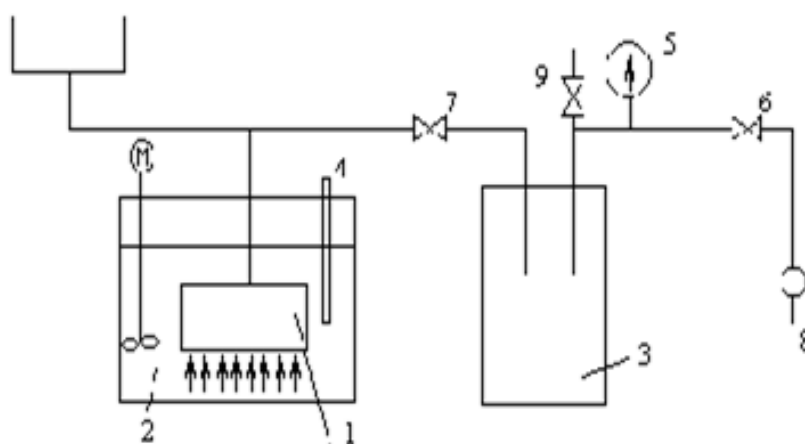


Рисунок 3 – Схема лабораторной установки фильтрования:

1 - вакуум-фильтр; 2 - бачок с мешалкой; 3 - приемник для фильтра; 4 - термометр; 5 - вакуумметр; 6,7,9 - краны; 8 - вакуум-насос.

Первый замер времени делают при появлении первых капель фильтрата в приемнике. Через некоторое время, когда в приемнике наберется некоторое количество фильтрата, производят, не выключая секундомер, одновременный замер времени и собранного фильтрата. Такие замеры производят 5...6 раз до окончания фильтрования, которое замечают по замедленному выходу фильтрата.

После этого, не выключая вакуум-насоса, закрывают кран (6) и выключают секундомер, записав время и объем фильтрата. Затем

освобождают вакуум-фильтр (2) и поднимают его вверх так, чтобы резиновая трубка не создавала застоев жидкости.

Фильтрующая поверхность фильтра должна быть повернута вверх. После этого открывают кран (6).

Начинается второй этап работы - продувка фильтра, просушка осадка. Когда поверхность потеряет влажный блеск и перестанет изменять свой вид, продувку прекращают, выключают вакуум-насос. Добавившимся при продувке количеством фильтрата пренебрегаем из-за его малости.

Фильтр разбирают, осадок снимают в специальную емкость, после этого промывают фильтр и ткань, и собирают фильтр снова. Результаты замеров заносят в таблицу.

## 6. ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

По полученным замерам объемов  $V_1, V_2 \dots V_n$  и времени  $t_1, t_2 \dots t_n$ , рассчитывают удельный объем фильтрата  $V = V/F_\phi$ , собранный с единицы поверхности фильтра, определяют разности  $\Delta t$  и  $\Delta V$  и вычисляют величины, обратные скорости фильтрования  $\Delta t_1/\Delta V_1, \Delta t_2/\Delta V_2 \dots \Delta t_n/\Delta V_n$ . Затем строят график, откладывая по оси абсцисс величины удельных объемов от  $V_1$ , до  $V_2$ , а по оси ординат величины отношения от  $\Delta t_1/\Delta V_1$  до  $\Delta t_n/\Delta V_n$ . Так как отношение  $\Delta t/\Delta V$  является средней величиной для соответствующих интервалов  $\Delta V$ , то величины этих отношений следует откладывать по вертикали из середины однозначных интервалов либо, проводя прямую через середины отрезков  $a_1-b_1, a_2-b_2$ , и т. д., (см. рисунок 2), как об этом сказано выше.

Для определения константы  $K$  находим тангенс угла наклона прямой ДМ (рисунок 2) как отношение катетов, взятых в соответствующих масштабах. Например:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\frac{\Delta t_4}{\Delta V_4} - \frac{\Delta t_1}{\Delta V_1}}{V_3 + \frac{(V_4 - V_3)}{2} - \frac{V_1}{2}} \quad (24)$$

Из выражения  $\operatorname{tg} \alpha = 2/K$  находим константу фильтрования  $K$ :

$$K = 2/\operatorname{tg}\alpha. \quad (25)$$

Константу  $C$  находим непосредственно замером отрезка ДО (см. рисунок 2). Так определяем графические константы процесса фильтрования.

Расчётные константы процесса фильтрования из опытных данных определяем, решая систему уравнений (23) по двум парам значений удельных объёмов и времени.

Далее определяют скорости фильтрования в начальный и конечный момент времени:  $\left(\frac{dV}{d\tau}\right)_1$  и  $\left(\frac{dV}{d\tau}\right)_n$ :

$$\begin{cases} \left(\frac{dV}{d\tau}\right)_1 = \frac{K}{2(V_1 + C)} \\ \left(\frac{dV}{d\tau}\right)_n = \frac{K}{2(V_n + C)} \end{cases}. \quad (26)$$

Рассчитанные значения констант фильтрования  $K$  и  $C$  сравнивают с полученными из графика.

Работу заканчивают определением часовой производительности фильтра по фильтрату:

$$V_{\phi} = \frac{V_n - 3600}{F_{\phi} \cdot \tau_n}. \quad (27)$$

где  $V_n$  – общее количество фильтрата, собранного за время опыта,  $\text{м}^3$ ,

$F_{\phi}$  – площадь фильтра,  $\text{м}^2$ ;

$\tau_n$  – продолжительность опыта, с.

Отчет о выполненной работе должен содержать:

- а) краткую теоретическую часть;
- б) схему установки;
- в) график определения постоянных фильтрования;
- г) условия фильтрования:

суспензия – вода : мел,

концентрация суспензии Т:Ж,

вакуум  $P$ , мм. рт. ст.,

температура  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;

- д) математическую обработку опытных данных;
- е) заполненную отчётную таблицу;
- ж) компьютерный проверочный расчёт;
- з) выводы.

Отчетная таблица

| Наименование, обозначения и<br>размерность величины                                       | Точки замера |   |   |   |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|---|---|---|--|
| 1                                                                                         | 2            | 3 | 4 | 5 |  |
| 1. Время замера $t, c$                                                                    |              |   |   |   |  |
| 2. Объем фильтрата $V$ за<br>время $t, m^3$                                               |              |   |   |   |  |
| 3. Удельный объем фильтрата<br>$V=V/F_{\phi}, m^3/m^2$                                    |              |   |   |   |  |
| 4. Интервалы времени $\Delta t, c$                                                        |              |   |   |   |  |
| 5. Приращение удельного<br>объема фильтрата за время $\Delta t$<br>$m^3/m^2$              |              |   |   |   |  |
| 6. Величина, обратная<br>скорости фильтрования $\Delta t/\Delta V$ ,<br>$c \cdot m^2/m^3$ |              |   |   |   |  |
| 7. Диаметр фильтра, $m$                                                                   |              |   |   |   |  |
| 8. Поверхность фильтрования,<br>$m^2$                                                     |              |   |   |   |  |
| 9. Константы процесса<br>фильтрования:<br>графические:<br>$K=$                            |              |   |   |   |  |
| $C=$                                                                                      |              |   |   |   |  |
| Расчётные:<br>$K=$                                                                        |              |   |   |   |  |
| $C=$                                                                                      |              |   |   |   |  |
| 10. Производительность<br>фильтра: по фильтрату $V_{\phi}$                                |              |   |   |   |  |
| 11. Скорость фильтрования:                                                                |              |   |   |   |  |

|                    |  |  |  |  |  |
|--------------------|--|--|--|--|--|
| в начальный момент |  |  |  |  |  |
| в конечный момент  |  |  |  |  |  |

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково назначение процесса фильтрации?
2. Как осуществляется процесс фильтрации и что является движущей силой этого процесса?
3. Как создается разность давления в фильтрах?
4. Какие материалы используются в качестве фильтровальных перегородок?
5. Какие существуют способы фильтрации?
6. Как классифицируются осадки по степени их сжимаемости?
7. Что понимают под скоростью фильтрации и удельным объемом фильтрата?
8. Какие параметры влияют на скорость фильтрации, как она зависит от этих параметров? Какова размерность этих параметров?
9. Каков физический смысл удельного сопротивления осадка?
10. Какие факторы и как влияют на величину удельного сопротивления осадка?
11. Как записывается уравнение для расчета фильтрации суспензий при постоянной скорости фильтрации?
12. Как можно получить это уравнение?
13. Как записывается уравнение для расчета фильтрации суспензий при постоянном перепаде давления с образованием несжимаемого осадка на несжимаемой перегородке и какие расчеты можно выполнять с помощью этого уравнения?
14. Как записываются выражения для констант фильтрации?
15. Как определяются константы фильтрации, удельное сопротивление осадка и сопротивление фильтровальной перегородки и какова методика их определения?

16. Каковы соотношения между константами фильтрования для двух процессов фильтрования, отличающихся, при прочих равных условиях, только величиной разности перепадов давления?

17. Изобразить схему устройства экспериментальной установки и пояснить принцип её работы. Как устроен элемент вакуум-фильтра?

18. Изложить порядок проведения опыта по разделению суспензии.

### **Список рекомендуемой литературы**

1. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. 9-е изд. М.: Химия, 2005. – 750 с.
2. Жужиков, В. А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий. – М.: Химия, 1980.- 400 с.
3. Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. 3-е изд., перераб. — Ленинград: Химия, 1982. — 288 с.
4. Руководство к практическим занятиям в лаборатории процессов и аппаратов химической технологии: Учебное пособие./ Под ред. чл.-корр. АН СССР - 6-е изд., перераб., - Л.: Химия, 1990. – 272 с.
5. Плановский А.Н., Николаев П.И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. Учебник для вузов/ — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Химия, 1987. — 496 с.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6.**

### **ИСПЫТАНИЕ ЦИКЛОНА.**

#### **I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ:**

- 1) Изучение конструкции, принципа работы циклона и центриклона.
- 2) Сравнение эффективности при пылеочистке воздуха в циклоне и центриклоне – степени очистки и гидравлического сопротивления.

Определение времени осаждения частиц в циклоне.

В настоящее время все более ужесточаются требования к чистоте атмосферного воздуха. Повышение требования к очистке дымовых газов и вентиляционных выбросов приводят к необходимости совершенствования способов пылеочистки[1].

В зависимости от физико-химических свойств очищаемых газов, необходимого качества пылеочистки, экономики процесса, применяют сухой или мокрый способы пылеулавливания. Мокрые пылеуловители более эффективны, чем сухие, но при их применении возникает новая проблема – очистка или выпаривание загрязненных стоков. Поэтому они используются меньше, чем аппараты сухого метода пылеулавливания: фильтры, электрофильтры, пылесадительные камеры и циклоны [2, 3]. Последние нашли в промышленности, переработке строительных материалов и экологии наиболее широкое применение. Их преимущества по сравнению с другими устройствами для пылеочистки связано с простотой конструкции и эксплуатации, непрерывности работы без установки на регенерацию, высокой эффективностью и производительностью. Еще более эффективными по степени улавливания мелких частиц по сравнению с циклонами являются так называемые центриклоны. Такое название они получили вследствие сочетания принципов работы циклона – неподвижный корпус с вращающимся газовым потоком и центрифуги – вращающийся вместе с газовым потоком внутренний патрубок для выброса очищенного газа [4]. Большим преимуществом центриклона по сравнению с циклоном является снижение гидравлического сопротивления за счет уменьшения силы трения газового потока о внутренний патрубок. Справедливости ради надо отметить, что оба преимущества центриклона по сравнению с циклоном (увеличение степени очистки и снижение гидравлического сопротивления) достигаются за счет усложнения конструкции – установки подшипника под внутренний вращающийся патрубок. Используя уравнение Тодеса [4]

$$Re = \frac{Ar\Phi r}{I_0 + 0,575\sqrt{Ar\Phi r}} \quad (1)$$

где  $Re = \frac{v_r dr}{\vartheta}$  - число Рейнольдса;

$v_r$  - скорость осаждения частиц;

$dr$  - диаметр частиц, м;

$\vartheta$  - кинематическая вязкость воздуха;

$Ar = \frac{gdr^3}{\vartheta^2} \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho}$  - число Архимеда;

$\Delta\rho = \rho_2 - \rho$  - разность плотностей частиц и воздуха;

$\Phi r = \phi R_n / R$  - локальный фактор разделения;

$R$  - локальный радиус линии тока, на которой находится частица;

и интегральное уравнение времени осаждения

$$t_a = \int_{R_s}^{R_n} \frac{dR}{v_r} \quad (2)$$

где  $R_s$  - радиус внутреннего патрубка для выброса очищенного газа, м;

$R_n = D/2$  - радиус корпуса циклона, м;

получаем формулу для расчета времени осаждения

$$t_{oc} = (dr / \vartheta Ar \phi R_n) \left[ 9 (R_n^2 - R_s^2) + 0,38 \sqrt{Ar \phi R_n} (R_n^{3/2} - R_s^{3/2}) \right]$$

## 2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И ПРИНЦИПА ЕЕ РАБОТЫ

Основной частью установки является циклон, в который газовый поток подается из пылевой камеры от воздуходувки. Для контроля расхода газового потока установлен ротаметр, а для определения гидравлического сопротивления циклона – трубка Пито или U – образный дифманометр. Расход потока воздуха регулируется изменением подачи напряжения на электродвигатель воздуходувки.

Внутри пылевой камеры загружается пыль какого-либо материала (мел, песок, опилки и т.д.). Под действием потока воздуха от вентилятора, установленного внутри пылевой камеры, пыль переводится во взвешенное состояние и подхватывается нагнетаемым внутрь пылевой камеры воздухом от воздуходувки. По гибкому шлангу воздух с пылью из пылевой камеры направляется в циклон, где происходит его разделение – уловленные частицы пыли опускаются в пылесборник внизу циклон, а очищенный воздух через выходной внутренний патрубок выбрасывается наружу. Для контроля степени очистки выбрасываемого воздуха она проходит через фильтровальный мешок, где оседают неуловленные в циклоне частицы пыли.

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- 1) Получить материал для исследования (мел, песок, опилки и т.д.)
- 2) Загрузить этот материал в пылевую камеру. Плотнo закрыть крышку пылевой камеры и завернуть контрольный затяжной винт. Проверить качество уплотнения крышки камеры и всех гибких шлангов, соединяющих пылевую камеру с воздуходувкой и циклоном.
- 3) Включить вентилятор пылевой камеры для перевода частиц материала во взвешенное состояние.
- 4) Включить подачу воздуха от воздуходувки в пылевую камеру. Установить по ротаметру заданный расход воздуха. Засечь время начала опыта. Замерить гидравлическое сопротивление воздуха в циклоне.
- 5) Через 3-5 минут выключить подачу воздуха от воздуходувки и вентилятор пылевой камеры.
- 6) Определить массу уловленных в циклоне частиц, находящихся в пылевом бункере под циклоном.
- 7) Определить массу уловленных частиц в фильтровальном мешке над циклоном.
- 8) Определить степень улавливания частиц в циклоне по формуле

$$\eta = \frac{m_n}{m_n + m_g} \quad (3)$$

где  $m_n$  – масса уловленных частиц, г;

$m_8$  – масса частиц в фильтровальном мешке над циклоном, г.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

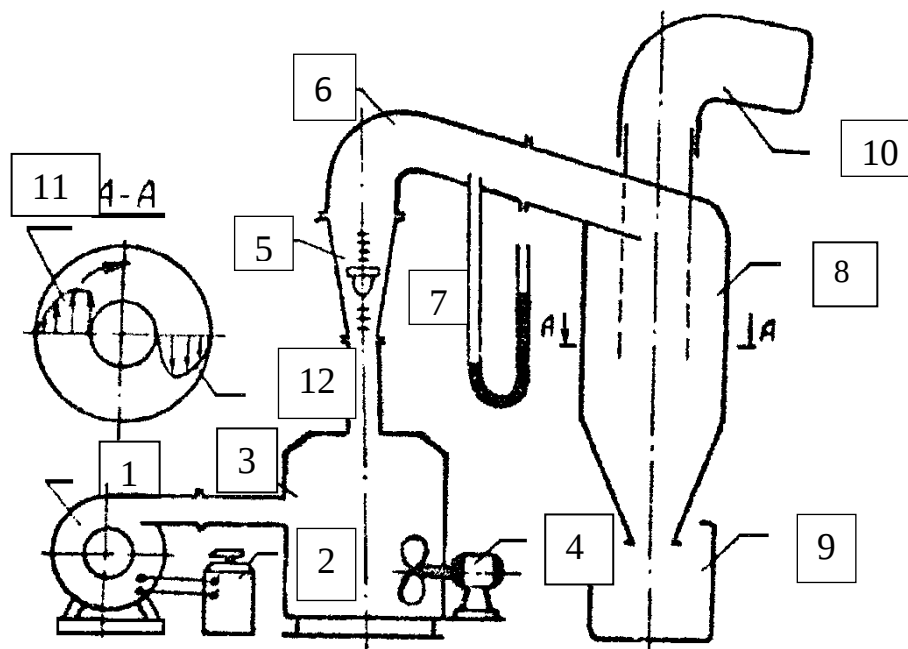


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1-воздуходувка; 2-регулятор напряжения; 3-пылевая камера; 4-вентилятор; 5-ротаметр; 6-гибкий шланг; 7- U-образный дифманометр; 8-циклон; 9-пылесборник; 10-фильтровальный мешок; 11-профиль скорости в циклоне; 12-профиль скорости в центриклоне.

9) Определить среднюю концентрацию частиц в очищаемом воздухе на входе в циклон по формуле

$$C_n = \frac{(m_n + m_8)}{q_v \cdot \tau}, \text{ г/м}^3 \quad (4)$$

где  $q_v$  – объемный расход воздуха через циклон,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  
 $\tau$  – время проведения опыта, с.

10) Определить среднюю концентрацию частиц в воздухе на выходе из циклона по формуле

$$C_k = \frac{m_6}{q_v \cdot \tau}, \text{ г/м}^3 \quad (5)$$

или  $C_k = (1 - \eta)C_n \quad (6)$

11) Определить среднюю тангенциальную скорость воздуха в циклоне

$$v = \frac{q_v}{S}, \text{ м/с} \quad (7)$$

где  $S$  – площадь входного патрубка в циклоне,  $\text{м}^2$ .

12) Определить фиктивную скорость воздуха в циклоне

$$u = \frac{4q_v}{\pi D^2}, \text{ м/с} \quad (8)$$

где  $D$  – внутренний диаметр корпуса в циклоне, м.

13) Определить коэффициент сопротивления циклона по формуле

$$\xi = \frac{2\Delta p}{\rho u^2}, \quad (9)$$

где  $\Delta p$  – гидравлическое сопротивление воздуха в циклоне, Па;

$\rho$  – плотность воздуха,  $\text{кг/м}^3$ ;

$u$  – фиктивная скорость воздуха в циклоне, м/с.

14) Повторить опыт и расчеты для центриклона или другого расхода воздуха через циклон.

15) Сделать вывод о сравнительной эффективности работы циклона и центриклона при равной производительности и в циклоне при разной производительности.

16) Определить факторы разделения в циклоне и центриконе по формуле

$$\phi = \frac{2v^2}{gD} \quad (10)$$

## НЕОБХОДИМЫЕ ПРИБОРЫ, ОБОРУДОВАНИЕ, МАТЕРИАЛЫ

1) пылевая камера с вентилятором;

2) воздуходувка;

- 3) регулятор напряжения;
- 4) циклон;
- 5) центриклон;
- 6) весы аналитические;
- 7) ротаметр;
- 8) дифманометр;
- 9) бункер для пыли;
- 10) фильтровальный рукав для пыли;
- 11) гибкие соединительные шланги;
- 12) пылевидный материал для исследований (мел, песок, опилки, пенопласт, сухой ил, дрожжи, мука древесная или пищевая, сухой суспензионный поливинилхлорид, абразивная пыль и т. д.)

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1) Схема экспериментальной установки с обозначениями и наименованиями приборов и оборудования;
- 2) Расчетные формулы (I – 8) с результатами расчетов по ним и размерностями каждого параметра;
- 3) Таблицу исходных и рассчитываемых параметров;
- 4) Выводы об эффективности работы циклона и центриклона;
- 5) Графики зависимости степени очистки и гидравлического сопротивления от размеров частиц, расхода воздуха, диаметра циклона или центриклона.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается преимущество сухой пылеочистки по сравнению с мокрой? Перечислите основные методы очистки воздуха и газов от пыли.
2. Принципы работы циклона и центриклона. Движущая сила процесса разделения. Что такое фактор разделения циклона?
3. Профили скоростей газового потока в циклоне и центриконе. Почему увеличивается движущая сила в центриконе по сравнению с циклоном, почему уменьшается гидравлическое сопротивление?
4. Преимущества и недостатки циклона и центриклона. Циклоны конструкции НИИОГАЗ, основные расчетные параметры: диаметр и

гидравлическое сопротивление. Выбор основных размеров циклонов.

5. Как влияет угол подвода газа к корпусу на гидравлическое сопротивление и степень очистки?
6. Изобразите схематично циклон и линию тока газового потока.
7. Приведите формулу для расчета диаметра циклона по производительности.
8. Почему батарея малых циклонов работает эффективней одного большого циклона.
9. Что такое степень очистки газового потока в циклоне? Как она зависит от размера и плотности частиц?
10. Что такое фиктивная и тангенциальная скорости газового потока в циклоне? Изобразите эти скорости на схеме циклона.

#### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7.

#### **ИСПЫТАНИЕ ЛОПАСТНОЙ МЕШАЛКИ.**

1. Цель работы: детальное ознакомление с конструкцией мешалок, с правилами безопасной и рациональной их эксплуатации; приобретение навыков по расчету, составлению кинематических схем и выполнение рабочих эскизов деталей.
2. Теоретическое обоснование работы:  
В промышленности для вымешивания, а также для смешивания различных компонентов, применяют различные мешалки в зависимости от конструкции рабочего органа – лопасти (табл.).

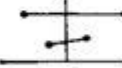
| Схема                                                                             | Название     | Схема                                                                             | Название   |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|
|  | Якорная      |  | Шнековая   |
|  | Рамная       |  | Ленточная  |
|  | Лопастная    |  | Клетевая   |
|  | Турбинная    |  | Z-образная |
|  | Пропеллерная |                                                                                   |            |

Таблица 7.1

Перемешивание осуществляют при помощи:

- движущихся лопастей;
- вращения резервуара смесителя;
- пропускания массы через сопла, щели, быстро вращающиеся рабочие органы;
- сжатого воздуха или пара;
- ультразвука, электрогидравлического эффекта и пр.

Первые три способа называются механическими, четвертый - пневматическим, последние - кавитационными или импульсными.

Выбор способа перемешивания, типа смесителя или мешалки, числа конфигурации, формы и скорости движения лопастей зависит от вида и состояния перемешиваемой массы и других факторов. Наиболее распространено перемешивание в жидкой среде при помощи лопастей. Лопасты бывают плоские, горизонтальные, обычно размещающиеся симметрично относительно вала и параллельно по высоте.

При движении всей массы жидкости перемешивания не происходит, поэтому на стенках сосуда устанавливают неподвижные лопасти.

Широкое применение получили комбинированные рамные конструкции из горизонтальных, вертикальных и наклонных лопастей.

Возможное количество комбинаций не ограничено. Распространены лопасти с переменным углом наклона минимальным у оси вращения и наибольшим на конце - жидкостные пропеллеры.

При таком расположении углов наклона жидкостные пропеллеры в результате сложения действующих сил (тяжести, центробежной и реакции) создают направленное циркулярное движение жидкости в аппарате: по центру жидкость всасывается и по краям аппарата поднимается вверх.

Пропеллерные мешалки обеспечивают лучшую циркуляцию вдоль поверхности, перемешивание жидкости различных объемных масс невозможен при плоских горизонтальных лопастях.

Для перемешивания водных суспензий больших емкостей применимы устройства типа пропеллерного насоса, в которых на нижнем конце центрального подвесного вала, помещенного в вертикальной трубе, укреплен пропеллер. При вращении пропеллер поднимает суспензию по трубе вверх, из трубы суспензия выбрасывается через два раструба, расположенных выше свободной поверхности системы.

Винтовые лопасти применяют для перемешивания вязкопластичных и сыпучих масс, у которых винт типа шнека вращается в неподвижном цилиндре.

Энергичное перемешивание дает турбинное устройство, в котором на вертикальном валу помещено колесо центробежного насоса, суспензия всасывается в центральное кольцевое отверстие колеса у вала и выбрасывается из колеса центробежной силой, возникающей при вращении.

Все описанные устройства обеспечивают перемешивание загруженного в аппарат продукта и создают процесс периодического характера. Непрерывно действующие устройства для перемешивания могут быть:

- шнековые для перемешивания вязкопластических масс, у которых в горизонтально расположенном корпусе на параллельных валах укреплены два шнека, вращающиеся в одну сторону и перемешивающие массу продукта.

- дисковые, использующие для перемешивания продуктов центробежную силу; компоненты подаются на диск по трубе и по воронке они перемешиваются при движении по диску в тонком слое, при полете с диска на стенку в виде капель, при стекании по стенке вертикального корпуса, в котором помещаются вал с диском.

### 3. Описание экспериментальной установки.

Испытание проводится на экспериментальной установке (рис. 7.1).

Испытание проводят на экспериментальной установке (рис. 7.1). В цилиндрическом сосуде 1 вращается рабочий орган 2 (лопасть), укрепленный на вертикальном валу 3. Движение вертикальному валу передается через редуктор 4 и вариатор скоростей 6 от электродвигателя. При помощи вариатора скоростей изменяется частота вращения рабочего органа.

Требуемая для перемешивания жидких сред мощность измеряется самопишущим ваттметром, включенным в электрическую схему электродвигателя постоянного тока. Частота вращения рабочего органа измеряется при помощи тахогенератора 5 с выходом на вторичный регистрирующий прибор (таховольтметр).

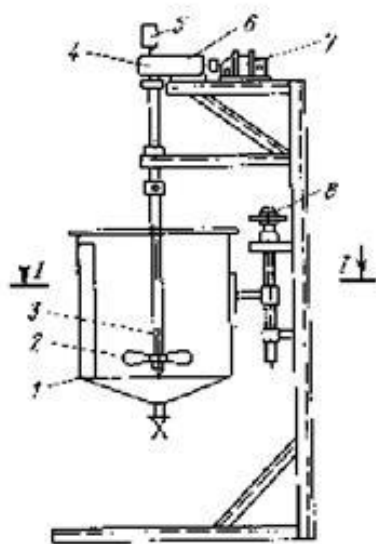


Рис. 7.1. Схема установки для испытания лопастной мешалки

1 - сосуд; 2 - лопасть; 3 - вал; 4 - редуктор; 5 - тахогенератор; 6 - вариатор скоростей; 7 - электродвигатель; 8 - винт.

#### 4. Методика проведения испытания

Перед началом испытаний знакомятся с основными параметрами установки и жидкости, к которым относятся диаметр сосуда  $D$ , высота слоя жидкости  $H$ , плотность жидкости  $\rho$ , динамический коэффициент вязкости  $\mu$ , диаметр окружности вращения лопастей  $d$ , ширина лопасти  $b$ , число лопастей  $x$ .

При испытании измеряют потребляемую энергию при работе мешалки на холостом ходу при заданных частотах вращения рабочего органа. Далее жидкостью из измерительного сосуда заполняют сосуд 1 и определяют ее температуру. При помощи винта 8 сосуд 1 перемещают вверх до полного погружения рабочего органа в жидкость. После этого включают электродвигатель мешалки и приводят замеры показаний при тех же частотах вращения, что и на холостом ходу.

#### 5. Задание

Рассчитать мешалку для перемешивания суспензии по следующим данным:

*Методические указания к решению задачи*

Плотность суспензии определяем по формуле

$$\rho_c = \rho_{\text{ж}} \cdot \varphi + \rho_{\text{с}} \cdot (1 - \varphi)$$

Вязкость суспензии определяем по формуле

$$\mu_c = \mu_{\text{ж}} \cdot (1 + 4,5 \cdot \varphi)$$

Определяем режим перемешивания:

$$\text{Re} = \frac{\rho_c \cdot n \cdot d^2}{\mu_c}$$

Диаметр нормализованной мешалки

$$d_{\text{н}} = 0,33 \cdot D$$

По критерию Рейнольдса находим значение критерия Эйлера  $Eu_m$ .

По найденному критерию Эйлера определяем мощность, потребляемую мешалкой

$$N = Eu_m \cdot \rho_c \cdot n^3 \cdot d^5$$

Таблица исходных данных

| величины                    | Размерность | По последней цифре шифра |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------------------|-------------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1                           | 2           | 3                        | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 0   |     |     |
| частота вращения $n$ ,      | $c^{-1}$    | 4,7                      | 5,0 | 4,3 | 2,0 | 2,7 | 3,5 | 4,0 | 2,1 | 3,5 | 2,2 |
| диаметр аппарата $D$ ,      | м           | 1,2                      | 1,0 | 0,8 | 0,6 | 0,7 | 1,0 | 1,4 | 1,6 | 0,9 | 0,7 |
| содержание твердой фазы $j$ |             | 0,3                      | 0,2 | 0,1 | 0,4 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,4 | 0,5 |

| величины                     | Размерность       | По предпоследней цифре шифра |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------|-------------------|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1                            | 2                 | 3                            | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 0    |      |      |
| плотность жидкости гж        | кг/м <sup>3</sup> | 1070                         | 1010 | 1020 | 1000 | 1015 | 1030 | 1040 | 1060 | 1080 | 1025 |
| плотность твердых частиц гтв | кг/м <sup>3</sup> | 1400                         | 1300 | 1450 | 1500 | 1600 | 1750 | 1190 | 1120 | 1470 | 1380 |
| вязкость жидкости тж         | Па×с              | 0,02                         | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,07 | 0,04 | 0,03 | 0,01 | 0,05 | 0,02 |

|                    |  |    |    |   |   |    |    |    |   |   |    |
|--------------------|--|----|----|---|---|----|----|----|---|---|----|
| тип<br>мешалк<br>и |  | 10 | 13 | 2 | 6 | 14 | 10 | 13 | 2 | 6 | 14 |
|--------------------|--|----|----|---|---|----|----|----|---|---|----|

## 7. Контрольные вопросы

1. Поясните назначение процесса перемешивания.
2. Какие вы знаете типы мешалок?
3. Поясните методику расчета с использованием общего критериального уравнения.
4. Какие факторы влияют на расход энергии при перемешивании?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8.

### **ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ТЕПЛООБМЕННИКЕ «ТРУБА В ТРУБЕ».**

Цель работы: исследование работы теплообменника типа «труба в трубе».

#### Основные понятия.

Технологические процессы сопровождаются преобразованием различных видов энергии – тепловой, механической, электрической. Теплота имеет наибольшее значение, поэтому обычно ограничиваются рассмотрением только этого вида энергии. Она затрачивается на проведение химических и физико-химических процессов или выделяется при их течении. Поэтому теплообменные аппараты, в которых происходит обмен теплотой между различными средами, являются одними из важнейших элементов технологических систем. Практическое изучение студентами работы теплообменных аппаратов необходимо для перехода к их проектированию. Самопроизвольный перенос теплоты от более нагретой среды к менее нагретой среде называется теплопередачей. Перенос происходит до наступления теплового равновесия, когда температуры обеих сред станут равными друг другу.

Среды (вещества), участвующие в процессе теплопередачи называются *теплоносителями*.

Более нагретая среда (вещество с бóльшей температурой) – *горячий теплоноситель*.

Менее нагретая среда (вещество с меньшей температурой) – *холодный теплоноситель*.

#### Способы теплопередачи:

- *передача тепла непосредственным соприкосновением сред* происходит при смешивании теплоносителей друг с другом;

- *передача тепла через стенку* происходит, когда теплоносители отделены друг от друга стенкой; поверхность которой называется *поверхностью теплообмена*.

#### Процессы теплопередачи:

- *установившийся (стационарный) процесс* – температуры обоих теплоносителей в каждой точке теплообменного аппарата не изменяются во времени, реализуется, в основном, в непрерывно действующем оборудовании;

- *неустановившийся (нестационарный) процесс* – температуры теплоносителей в аппарате изменяются во времени, реализуется в аппаратах периодического действия, а также при пуске и остановке аппаратов непрерывного действия и изменении режима их работы.

#### Механизмы теплопередачи

- *Теплопроводность* – передача тепла между двумя соприкасающимися телами в результате микроскопического колебательного движения их частиц, но без их перемещения друг относительно друга.

- *Конвекция* – передача тепла частицами жидкостей и газов при их перемещении в пространстве вместе с массами теплоносителей.

- *принудительная (вынужденная) конвекция* имеет место в результате целенаправленных затрат энергии на перемещение теплоносителей с помощью соответствующих устройств;

· *свободная (естественная) конвекция* протекает самопроизвольно благодаря разности плотностей жидкости или газа в разных точках объема, вызванной неравномерным распределением температуры.

Конвекция всегда сопровождается передачей тепла посредством теплопроводности.

· *Лучеиспускание* – передача тепла путем переноса энергии в виде электромагнитных волн. Тепловая энергия одного тела превращается в лучистую энергию и излучается в пространство (излучение), проходит через него, поглощается другим телом и снова превращается в тепловую энергию (поглощение).

*Теплообменные аппараты (теплообменники)* – аппараты для осуществления теплообмена между двумя теплоносителями с целью нагревания или охлаждения одного из них.

*Тепловой поток* – количество тепла, передаваемого в единицу времени от одного теплоносителя к другому, *Дж/с* или *Вт*.

*Энергетический (тепловой) баланс* – вещественное выражение закона сохранения энергии, согласно которому, общее количество теплоты (энергии), введённой в технологический аппарат всеми возможными способами равно количеству теплоты (энергии), покидающей аппарат также всеми возможными способами. Т. е. приход теплоты в аппарат равен её расходу.

*Тепловая нагрузка* аппарата  $Q$  – количество тепла, отданное горячим теплоносителем, которое расходуется на нагрев холодного теплоносителя и на компенсацию потерь в окружающую среду  $Q_n$ . Отсюда, тепловой баланс:

$$Q = Q_{\text{гор}} = Q_{\text{хол}} + Q_n, \text{ Вт} \quad (1)$$

или

$$Q = G(I_1 - I_2) = g(\bar{i}_2 - \bar{i}_1) + Q_n, \text{ Вт} \quad (2)$$

где  $G$  и  $g$  – массовый расход горячего и холодного теплоносителей соответственно, *кг/с*;

$I$  и  $i$  теплосодержание (энтальпия) горячего и холодного теплоносителей соответственно, Дж/кг;

индекс «1» соответствует входу в аппарат, индекс «2» – выходу из него.

Энтальпия теплоносителей:

горячего –  $I = Ct_{гор}$ , холодного –  $i = ct_{хол}$ , Дж/кг;

где  $C$  и  $c$  – их удельные теплоёмкости, Дж/кг град

Разность температур между горячим  $t_{гор}$ . и холодным  $t_{хол}$ . теплоносителями, которая является движущей силой процесса теплопередачи называется *температурным напором*:

$$q = t_{гор} - t_{хол}, ^\circ C. (3)$$

*Направление тока теплоносителей* в теплообменном аппарате:

*прямоток* – оба теплоносителя протекают вдоль разделяющей их стенки в одном и том же направлении; *противоток* – теплоносители протекают вдоль разделяющей их стенки в противоположных направлениях.

### **Устройство теплообменников типа «труба в трубе»**

Теплообменники «труба в трубе» применяют при небольших тепловых нагрузках, когда требуемая поверхность теплообмена не превышает 20–30 м<sup>2</sup>. Каждый элемент такого теплообменника состоит из наружной кожуховой трубы большего диаметра и концентрически расположенной внутри нее теплообменной трубы. Теплообменные трубы соединены друг с другом последовательно при помощи съемных калачей; кожуховые трубы тоже связаны между собой последовательно с помощью вваренных в них штуцеров. При больших расходах теплоносителей теплообменники составляют из нескольких параллельных секций, тем самым обеспечивая большую суммарную площадь поперечного сечения обоих пространств.

### **Работа установки**

Заполнение горячего контура 3 установки осуществляют через расширительный бачок 4. Слив горячего теплоносителя – через сливной вентиль 5.

Нагреватель 7 преобразует электрическую энергию в тепловую, нагревая горячий теплоноситель в контуре 3. Часть этой энергии расходуется на циркуляцию теплоносителя по горячему контуру 3 за счёт естественной конвекции. Проходя через теплообменник, горячий теплоноситель передаёт своё тепло через стенку внутренней трубы 2 холодному теплоносителю, который движется по межтрубному пространству. Направление движения холодного теплоносителя определяется порядком подключения штуцеров 19 и 20 к его источнику.

При движении горячего теплоносителя обе стороны диафрагмы 8 возникает разность пьезометрических напоров пропорциональная его объёмному расходу. Она проявляется в виде разности уровней жидкости в пьезометрах 9. Калибровка диафрагмы 8 (определение зависимости разности уровней жидкости в пьезометрах 9 от объёмного расход горячего теплоносителя) производится путём сливания теплоносителя из бачка 4 через диафрагму и сливной вентиль 5 при закрытом вентиле 6.

Теплоносители омывают шарики термометров 11–14, установленных на всех входах теплообменника.

Нагреватель 7 подключают к электрической сети посредством выключателя 15. Величину электрического напряжения на электродах нагревателя 7 регулируют с помощью ЛАТРа 17 и измеряют с помощью вольтметра 16. Силу тока, протекающего через нагреватель 7, измеряют с помощью амперметра 18.

Температуру наружной теплоотдающей поверхности горячего контура определяют по показаниям милливольтметра 22, к которому подключена термопара 21.

### **Энергетический баланс установки**

Уравнение энергетического баланса лабораторной установки имеет вид;

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{г}} + Q_{\text{н}} + N_{\text{вент}}, \text{ Вт} \quad (4)$$

где  $Q_{\text{прих}}$  – тепло, поступающее в установку от электрического нагревателя 7;

$QT$  – тепло, передаваемое от горячего теплоносителя холодному;

$QP$  – тепло потерь в окружающую среду;

$N_{конв.}$  – мощность, расходуемая на циркуляцию теплоносителя по горячему контуру.

Тепло, поступающее в установку от электрического нагревателя 7 и равное его электрической мощности, рассчитывают:

$$Q_{\text{нагр}} = IU, \text{ Вт} \quad (5)$$

где  $I$  – ток, протекающий через нагреватель и определяемый по показаниям амперметра 18

$U$  – напряжение на электродах нагревателя 7, определяемое по показаниям вольтметра 16.

Тепло, передаваемое от горячего теплоносителя холодному определяется уравнением теплопередачи

$$Q_T = kF_{\text{н}} \theta_{\text{ср}}, \text{ Вт} \quad (6)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$ ;

$F_{\text{н}}$  – величина наружной поверхности теплообменной трубы,  $\text{м}^2$ ;

$\theta_{\text{ср}}$  – средний температурный напор,  $^{\circ}\text{C}$ .

Коэффициент теплопередачи может быть рассчитан по уравнению для цилиндрической стенки:

$$k = \frac{1}{\frac{d_{\text{нар.}}}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta d_{\text{нар.}}}{\lambda d_{\text{ср.}}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}} \quad (7)$$

где  $d_{\text{ср}} = \frac{d_{\text{нар.}} - d_{\text{вн.}}}{2}$  – средний диаметр стенки,  $\text{м}$ ;

$d_{\text{нар.}}$  и  $d_{\text{вн.}}$  – наружный и внутренний диаметр теплообменной трубы,  $\text{м}$ ;

$\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты конвективной теплоотдачи от горячего

теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ .

Таблица 1 - Критерии подобия при передаче тепла конвекцией

| Критерий   | Формула                                                                 | Физический смысл критерия                                          |
|------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Нуссельта  | $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (8)$                               | Характеризует процесс теплообмена между теплоносителем и стенкой   |
| Рейнольдса | $Re = \frac{\omega \rho l}{\mu} \quad (9)$                              | Характеризует гидродинамический режим движения теплоносителя       |
| Прандтля   | $Pr = \frac{\mu c}{\lambda} \quad (10)$                                 | Характеризует физические свойства теплоносителя                    |
| Грасгофа   | $Gr = \frac{l^3 g \rho^2 \beta \theta_{\text{част}}}{\mu^2} \quad (11)$ | Характеризует режим движения теплоносителя при свободной конвекции |

Здесь  $\lambda$  – теплопроводность теплоносителя,  $Вт/(м \cdot ^\circ C)$ ;

$\mu$  – вязкость теплоносителя,  $Па \cdot с$ ;

$c$  – удельная теплоемкость теплоносителя,  $Дж/(кг \cdot град)$ ;

$\rho$  – плотность теплоносителя,  $кг/м^3$ ;

$\beta$  – коэффициент объемного расширения теплоносителя,  $1/^\circ C$ ;

$\omega$  – скорость теплоносителя,  $м/с$ ;

$l$  – определяющий геометрический размер,  $м$ ;

$g$  – ускорение свободного падения,  $м/с^2$ ;

$\theta_{\text{част}}$  – частный температурный напор,  $^\circ C$ .

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  находят через критерий Нуссельта  $Nu$  из (8).

Величину  $Nu$  вычисляют из определяющих критериев  $Re$ ,  $Pr$  и  $Gr$  по зависимостям, приведенным в табл.2

При расчете коэффициентов теплоотдачи используют *определяющую температуру*, за которую принимают среднюю температуру

теплоносителя  $t_m$  или температуру пленки (пограничного слоя)  $t_{пл.}$ , равная среднеарифметическому температур стенки  $t_{см.}$  и теплоносителя:

$$t_{\text{пл.}} = \frac{t_m + t_{\text{см.}}}{2}, \quad ^\circ C. \quad (12)$$

Поверхность теплообменной трубы:

$$F_{\text{т}} = \pi d_{\text{вн}} l, \text{ м}^2 \quad (16)$$

где  $l$  – длина теплообменной трубы, м.

Таблица 2 - Формулы для расчёта конвективной теплоотдачи

|                                     |                          |                                                          |                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Устойчивый<br>турбулентный<br>режим | $Re > 10000$             | $Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (13)$                | Определяющий<br>геометрический<br>размер –<br>внутренний диаметр<br>трубы $d_{\text{вн}}$ или<br>эквивалентный<br>диаметр канала $d_{\text{экв}}$ .<br>Определяющая<br>температура – $t_m$ |
| Переходный<br>режим                 | $Re = 2300$<br>– $10000$ | $Nu = 0,008 Re^{0,9} Pr^{0,43} \quad (14)$               |                                                                                                                                                                                            |
| Ламинарный<br>режим                 | $Re < 2300$              | $Nu = 0,74 \cdot (Re Pr)^{0,2} (Gr Pr)^{0,1} \quad (15)$ | Определяющая<br>температура – $t_{\text{пл}}$ .                                                                                                                                            |

При прямотоке и противотоке средний температурный напор определяется как среднелогарифмическое из значений максимального ( $q_{\text{max}}$ ) и минимального ( $q_{\text{min}}$ ) температурных напоров:

$$\theta_{\text{ср.}} = \frac{\theta_{\text{max}} - \theta_{\text{min}}}{\ln \frac{\theta_{\text{max}}}{\theta_{\text{min}}}}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (17)$$

Если отношение  $\frac{\theta_{\text{max}}}{\theta_{\text{min}}} < 2$ , то используют среднеарифметическое значение:

$$\theta_{\text{ср.}} = \frac{\theta_{\text{max}} + \theta_{\text{min}}}{2}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (18)$$

Тепло, переданное холодному теплоносителю, расходуется на его нагрев:

$$Q_T = V_{\text{хл.}} \rho_{\text{хл.}} c_{\text{хл.}} (t_{\text{хл. вых.}} - t_{\text{хл. вх.}}), \text{ Вт} \quad (19)$$

где  $V_{\text{хл.}}$  – объёмный расход холодного теплоносителя,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$\rho_{\text{хл.}}$  – плотность холодного теплоносителя,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$c_{\text{хл.}}$  – удельная теплоёмкость холодного теплоносителя,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ;

$t_{\text{хл. вых.}}$  и  $t_{\text{хл. вх.}}$  – температура холодного теплоносителя на выходе и входе в теплообменник.

Тепло потерь в окружающую среду:

$$Q_H = \alpha F (t_{\text{см.}} - t_{\text{возд.}}), \text{ Вт} \quad (20)$$

где  $t_{\text{возд.}}$  – температура воздуха, окружающего установку,  $^\circ\text{C}$ ;

$\alpha$  – общий коэффициент теплоотдачи при совместной передаче тепла конвекцией и лучеиспусканием,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;

$F$  – величина теплоотдающей поверхности,  $\text{м}^2$ .

Для определения общего коэффициента теплоотдачи наружной теплоотдающей поверхности установки  $\alpha$  можно использовать следующую приближённую формулу:

$$\alpha = 9,3 + 0,058 t_{\text{см.}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (21)$$

Мощность, расходуемая на циркуляцию теплоносителя по горячему контуру равна энергии на перемещение 1  $\text{кг}$  теплоносителя ( $w^2/2$ ) умноженной на его массовый расход ( $V_{\text{гор.}} \rho_{\text{гор.}}$ ). Учитывая связь объёмной скорости

теплоносителя  $V_{\text{гор.}}$  с его линейной скоростью  $w = \frac{4V_{\text{гор.}}}{\pi d_{\text{см.}}^2}$ , получим:

$$N_{\text{см.}} = \frac{8V_{\text{гор.}}^3 \rho_{\text{гор.}}}{(\pi d_{\text{см.}})^2}, \text{ Вт} \quad (22)$$

где  $V_{\text{гор.}}$  – объёмный расход горячего теплоносителя,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

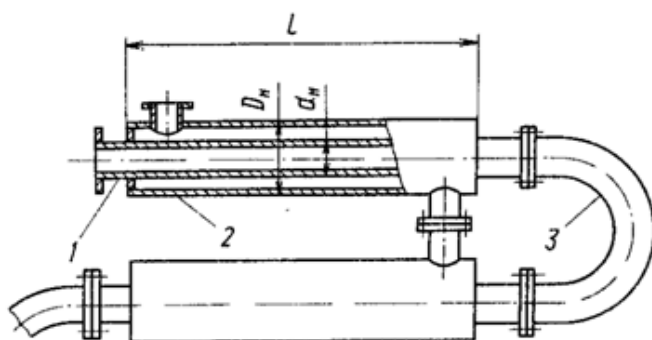


Рис. 1. Неразборный теплообменник типа «труба в трубе»: 1 ? теплообменная труба; 2 ? кожуховая труба; 3 ? калач

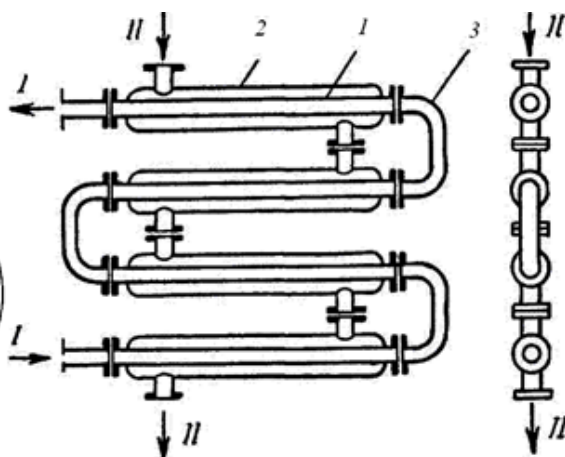


Рис. 2. Многосекционный неразборный теплообменник типа «труба в трубе»: 1 ? теплообменная труба; 2 ? кожуховая труба; 3 ? калач

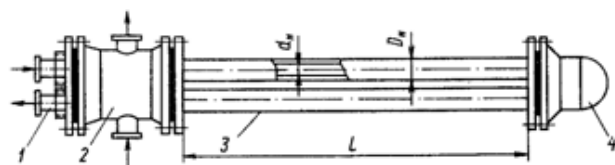


Рис. 3. Разборный однопоточный малогабаритный ( $d_n \approx 57$  мм) теплообменник типа «труба в трубе»: 1 ? теплообменная труба; 2 ? распределительная камера для наружного теплоносителя; 3 ? кожуховая труба; 4 ? крышка

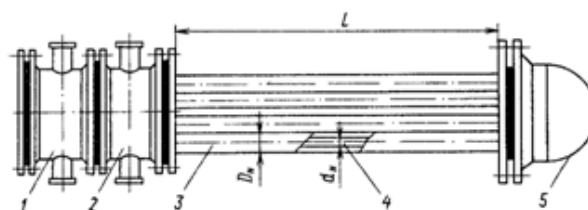


Рис. 4. Разборный двухпоточный малогабаритный ( $d_n \approx 57$  мм) теплообменник типа «труба в трубе»: 1 и 2 ? распределительные камеры для внутреннего и наружного теплоносителей соответственно; 3 ? кожуховая труба; 4 ? теплообменная труба; 5 ? крышка

Теплообменники «труба в трубе» изготавливают следующих типов: 1) неразборные однопоточные одно-, двух - и многосекционные (рис. 1,2 ); разборные одно-, двух - и многопоточные (рис. 3, 4).

Неразборные теплообменники (рис. 1, 2) могут иметь один или несколько (обычно четное число) ходов.

Однопоточный малогабаритный разборный теплообменник (рис. 3) имеет распределительную камеру для наружного теплоносителя, разделенную на две зоны продольной перегородкой. В крышке размещен калач,

соединяющий теплообменные трубы. Кожуховые трубы крепятся в трубных решетках, теплообменные трубы герметизируются с помощью сальниковых уплотнений.

Двухпоточный разборный теплообменник (рис. 4) имеет две распределительные камеры, а в крышке размещены два калача. Поверхность теплообмена и проходные сечения для теплоносителей при прочих равных условиях в два раза больше, чем в однопоточном теплообменнике.

Многопоточные теплообменники типа «труба, в трубе» принципиально не отличаются от двухпоточных.

*Достоинства:* высокий коэффициент теплопередачи вследствие большой скорости обоих теплоносителей; простота изготовления.

*Недостатки:* громоздкость; высокая стоимость вследствие расхода металла на наружные трубы, не участвующие в теплообмене; трудность очистки межтрубного пространства.

Цель и задача работы

*Цель* – экспериментальное исследование работы теплообменника типа «труба в трубе», расчет коэффициента теплопередачи.

*Задача* – при заданных величинах:

- электрической мощности нагревателя;
- количества горячего теплоносителя;
- объёмного расхода холодного теплоносителя;

в стационарном режиме работы установки экспериментально определить:

- температуру теплоносителей на входах теплообменника;
- скорость циркуляции горячего теплоносителя;
- температуру наружной теплоотдающей поверхности;

рассчитать:

- количество тепла, передаваемого от горячего теплоносителя холодному;
- величину коэффициента теплопередачи;
- расход мощности на циркуляцию горячего теплоносителя;
- потери тепла в окружающую среду;

– тепловой к. п.д. установки;  
составить тепловой баланс установки.

### Описание установки

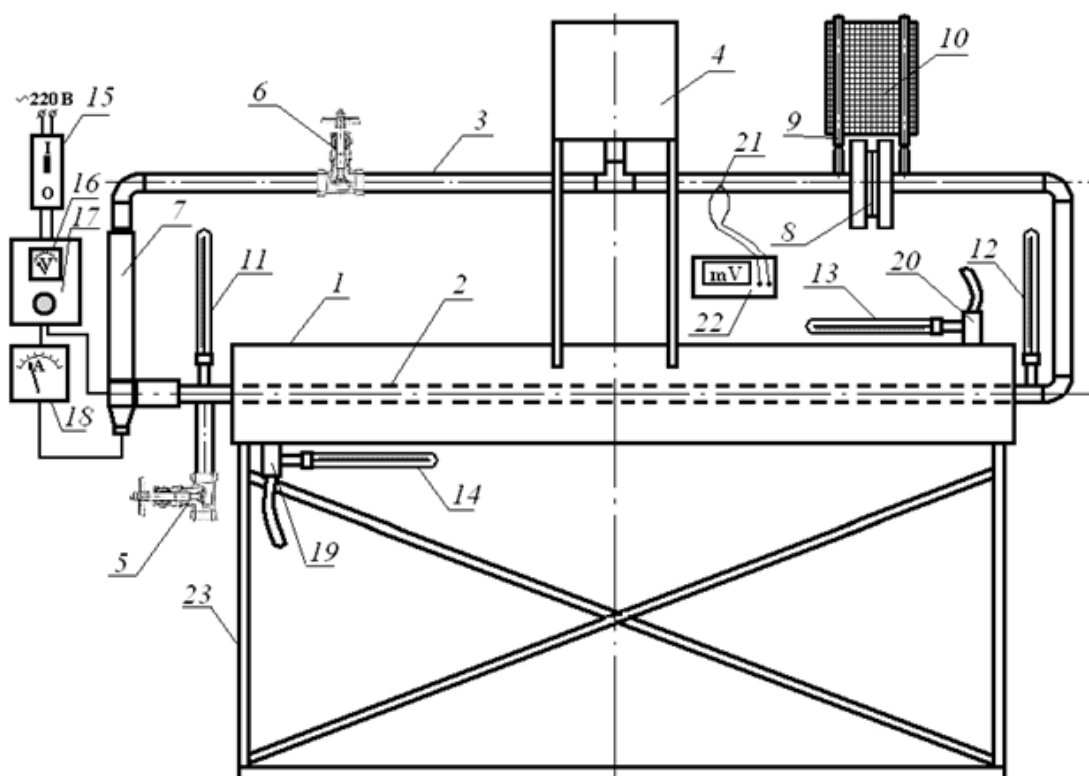


Рис. 5. Лабораторная установка для исследования работы теплообменника типа «труба в трубе»:

1 – кожуховая труба  $\varnothing 125 \times 6$  мм; 2 – теплообменная труба  $\varnothing 22 \times 4$ ; 3 – горячий контур  $\varnothing 22 \times 4$ ; 4 – расширительный бачёк; 5 – сливной вентиль; 6 – калибровочный вентиль; 7 – электрический нагреватель; 8 – измерительная диафрагма; 9 – пьезометры; 10 – планшет; 11, 14 – термометры; 15 – сетевой выключатель; 16 – вольтметр; 17 – ЛАТР; 18 – амперметр; 19, 20 – штуцеры для холодного теплоносителя; 21 – термопара; 22 – милливольтметр; 23 – станина.

Основой лабораторной установки является теплообменник типа «труба в трубе», состоящий из наружной трубы 1  $\varnothing 125 \times 6$  мм и внутренней трубы 2  $\varnothing 22 \times 4$  мм. Пространство теплообменника между внутренней поверхностью трубы 1 и наружной поверхностью трубы 2 (межтрубное пространство) служит для прохода холодного теплоносителя. Горячий

теплоноситель циркулирует через внутреннюю трубу 2, которая включена в замкнутый горячий контур 3. Последний также содержит расширительный бачок 4, необходимый для его заполнения; сливной вентиль 5 для слива теплоносителя; калибровочный вентиль 6 для калибровки измерительной диафрагмы 8; электрический нагреватель 7, сообщающий тепло горячему теплоносителю; измерительную диафрагму 8 для измерения скорости циркуляции горячего теплоносителя. По обе стороны измерительной диафрагмы 8 к трубе горячего контура 3 подключены пьезометры 9, которые закреплены на планшете 10. К выходам теплообменника подключены термометры 11—14. Электрическое питание нагревателя 7 осуществляется через сетевой выключатель 15, вольтметр 16, ЛАТР 17 и амперметр 18. Холодный теплоноситель подаётся в межтрубное пространство теплообменника через гибкие шланги, подключённые к штуцерам 19 и 20. Термопара 21, подключённая к милливольтметру 22, служит для измерения температуры наружной теплоотдающей поверхности горячего контура. Вся установка смонтирована на станине 23.

$\rho_{гор.}$  – плотность горячего теплоносителя,  $кг/м^3$ ;

$d_{вн.}$  – внутренний диаметр трубы горячего контура,  $м$ .

Температуру теплоотдающей поверхности установки определяют по рис. 6 или по полиному для хромель-капелевой термопары:

$$t_{ст.} = -3,28922 \cdot 10^{-3} + 0,06357E + 5,54027 \cdot 10^{-5}E^2 - 4,81157 \cdot 10^{-8}E^3 + 1,0878 \cdot 10^{-11}E^4, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (23)$$

где  $E$  – показания милливольтметра 22.

Показатель эффективности работы установки – тепловой к. п.д. – отношение количества теплоты, переданной через поверхность теплопередачи к количеству теплоты, поступающей в установку:

$$\eta = \frac{Q_r}{Q_{прп.}} \cdot 100\% \quad (24)$$

Порядок работы

1. Горячий теплоноситель в количестве указанном преподавателем (до 10 дм<sup>3</sup>) заливают в расширительный бачок 4 при закрытом вентиле 5 и открытом 6.
2. Гибкие шланги, надетые на штуцеры 19 и 20, соединяют с водопроводом и канализацией в порядке, указанном преподавателем.
3. На планшете 10 отмечают начальный уровень жидкости в пьезометрах 9.
4. Включают подачу холодного теплоносителя (воды) в межтрубное пространство теплообменника.
5. Регулятор ЛАТРа 17 устанавливают в крайнее левое положение.
6. Выключателем 15 подают электрическое напряжение на ЛАТР 17.
7. Регулятором ЛАТРа 17 устанавливают такое напряжение на электродах нагревателя 7, которое соответствует силе тока (по амперметру 18), заданной преподавателем. Эту величину силы тока поддерживают постоянной в течение всего время работы установки.
8. Через каждые 5 минут отмечают в таблице и на графике показания термометров 11–14, а также разность уровней жидкости в пьезометрах 9.
9. После того, как установка выйдет на стационарный режим (все кривые на графике выродятся в горизонталь), выключателем 15 отключают нагреватель 7.
10. Производят калибровку диафрагмы 8. Для этого закрывают вентиль 6, приоткрывают вентиль 5, с помощью мерного цилиндра определяют время, за которое из горячего контура выльется 100 см<sup>3</sup> теплоносителя, а также разность уровней жидкости в пьезометрах 9. Ещё приоткрывают вентиль 5 и повторяют замеры. Всего делают 5–6 замеров, результаты заносят в таблицу, на графике строят калибровочную кривую «разность уровней жидкости в пьезометрах 9 – объёмный расход горячего теплоносителя».
11. Определяют объёмный расход холодного теплоносителя. Для этого сливной шланг переносят в мерный цилиндр и определяют, за какое время наберётся некоторое количество жидкости (например, 100 см<sup>3</sup>). Результаты заносят в таблицу.

12. Все данные вносят в отчёт по лабораторной работе,
13. Выключают лабораторную установку. Производят расчёты.

#### Экспериментальные данные

В ходе выполнения работы необходимо получить следующие экспериментальные данные:

- $t_{хол. вх.}$  и  $t_{хол. вых.}$  – температуру холодного теплоносителя на входе и выходе межтрубного пространства (термометры 13 и 14);
- $t_{гор. вх.}$  и  $t_{гор. вых.}$  – температуру горячего теплоносителя на входе и выходе теплообменной трубы (термометры 11 и 12);
- $\Delta h$  – разность уровней в пьезометрах 9;
- $V_{гор.}$  – объёмную скорость циркуляции горячего теплоносителя (определить по калибровочному графику измерительной диафрагмы);
- $V_{хол.}$  – объёмный расход холодного теплоносителя (объём холодного теплоносителя  $v_{хол.}$ , вытекающий из межтрубного пространства за время  $\tau$ );
- $t_{см}$  – температуру, теплоотдающей поверхности (рассчитать по показаниям милливольтметра 22 E);
- $U$  – показания вольтметра 16;
- $I$  – показания амперметра 18;
- $F_m$  – величину поверхности теплообмена;
- $F$  – величину теплоотдающей поверхности (измерить);
- данные для калибровки диафрагмы – объёмный расход горячего теплоносителя  $V_{гор.}$  при различной степени открытия калибровочного вентиля 6 и соответствующей ей разности уровней  $\Delta h$  в пьезометрах 9.

Экспериментальные данные занести в табл. 3. Построить график изменения температур на входах теплообменника и скорости циркуляции горячего теплоносителя. Построить калибровочный график измерительной диафрагмы.

### Расчётные данные

По экспериментальным данным для стационарного режима работы установки, используя уравнения (5), (19), (20), (22), составить её энергетический баланс.

Рассчитать величину теплового к. п.д. установки

По уравнению (6) с учётом (17) или (18) рассчитать величину коэффициента теплопередачи  $k$ .

Результаты расчётов занести в табл. 4.

### Индивидуальные задания

По экспериментальным данным и формулам, приведенным в данном пособии выполнить следующие расчёты.

1. Рассчитать коэффициенты конвективной теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  и коэффициент теплоотдачи  $k$ . Сравнить рассчитанную величину с полученной экспериментально. Объяснить расхождения.
2. Рассчитать величину объёмной скорости циркуляции горячего теплоносителя, при которой коэффициент теплопередачи  $k$  увеличится в 2 раза.
3. Рассчитать величину поверхности теплообмена  $F_t$ , при которой тепловой к. п.д. установки увеличится на 10%.
4. Рассчитать величину теплового к. п.д. установки, если в её теплообменнике вместо стальной теплообменной трубы будет использоваться медная.
5. Рассчитать величину коэффициента теплопередачи, если объёмный расход холодного теплоносителя уменьшится в 10 раз.

### Таблица 3

Экспериментальные данные

|                             |                                 |
|-----------------------------|---------------------------------|
| <b>Работа<br/>установки</b> | <b>Калибровка<br/>диафрагмы</b> |
|-----------------------------|---------------------------------|

| Время, $m_{ин}$ | Показания термометров, $^{\circ}C$ | Разность уровней в пьезометрах $\Delta h$ , мм | Объёмная скорость циркуляции $V_{гор.}, cm^3/c$ | Объём холодного теплоносителя $v_{хол.}, cm^3$ | Объём теплоносителя $v_{гор.}, cm^3$ | Время истечения $\tau, c$                                                          | Объёмный расход, $V_{рас} = \frac{V_{гор}}{\tau}$ , $cm^3/c$ | Разность уровней в пьезометрах $\Delta h$ , мм |
|-----------------|------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| $t_{хол. вх.}$  | $t_{хол. вых}$                     | $t_{гор. вх.}$                                 | $t_{гор. вых}$                                  |                                                |                                      |                                                                                    |                                                              |                                                |
|                 |                                    |                                                |                                                 |                                                |                                      | Время истечения $\tau, c$                                                          |                                                              |                                                |
|                 |                                    |                                                |                                                 |                                                |                                      | Объёмный расход холодного теплоносителя $V_{хол} = \frac{V_{хол}}{\tau}$ , $m^3/c$ |                                                              |                                                |
|                 |                                    |                                                |                                                 |                                                |                                      |                                                                                    |                                                              |                                                |
|                 |                                    |                                                |                                                 |                                                |                                      | Показания милливольтметра 22 E, мВ                                                 |                                                              |                                                |
|                 |                                    |                                                |                                                 |                                                |                                      | Температура, .                                                                     |                                                              |                                                |

|  |  |  |  |  |  |                                                   |  |  |
|--|--|--|--|--|--|---------------------------------------------------|--|--|
|  |  |  |  |  |  | теплоотдающей<br>поверхности по (23)<br>или рис.6 |  |  |
|  |  |  |  |  |  | Показания<br>вольтметра 16 $U, B$                 |  |  |
|  |  |  |  |  |  | Показания<br>амперметра 18 $I, A$                 |  |  |
|  |  |  |  |  |  | Поверхность<br>теплообмена, $Fm, м2$              |  |  |
|  |  |  |  |  |  | Теплоотдающая<br>поверхность $F, м2$              |  |  |

Таблица 4 - Расчётные данные

|                                                                                       |                                                                       |     |                                                      |                      |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----|------------------------------------------------------|----------------------|-----|
| Энергетический баланс лабораторной установки                                          |                                                                       |     |                                                      |                      |     |
| <b>Приход</b>                                                                         | <i>B<sub>m</sub></i>                                                  | %   | <b>Расход</b>                                        | <i>B<sub>m</sub></i> | %   |
| Электроэнергия $Q_{пр.их.}$ (5)                                                       |                                                                       | 100 | Тепло, переданное холодному теплоносителю $Q_T$ (19) |                      |     |
| Тепло потерь в окружающую среду $Q_{П}$ (20)                                          |                                                                       |     |                                                      |                      |     |
| Мощность, расходуемая на циркуляцию теплоносителя по горячему контуру $N_{конв}$ (22) |                                                                       |     |                                                      |                      |     |
| Всего $\Sigma_{прих.}$                                                                |                                                                       | 100 | Всего $\Sigma_{расх.}$                               |                      | 100 |
| Невязка баланса                                                                       | $\delta = \frac{\Sigma_{прих.} - \Sigma_{расх.}}{\Sigma_{прих.}} 100$ |     |                                                      |                      |     |
| Параметры теплопередачи                                                               |                                                                       |     |                                                      |                      |     |
| Тепловой к. п. д. установки                                                           | $\eta = \frac{Q_T}{Q_{прих.}} 100\% =$                                |     |                                                      |                      |     |

|                             |                                                                                             |                           |                                     |  |  |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|--|--|
| Средний температурный напор | $\theta_{cp} = \frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{\ln \frac{\theta_{max}}{\theta_{min}}} =$ | Коэффициент теплопередачи | $k = \frac{Q_T}{F_m \theta_{cp}} =$ |  |  |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|--|--|

### Требования к оформлению отчёта

Отчёт о выполнении лабораторной работы должен содержать:

- таблицу экспериментальных данных;
- график изменения температур на входах теплообменника и скорости циркуляции горячего теплоносителя;
- калибровочный график измерительной диафрагмы;
- таблицу теплового баланса лабораторной установки;
- результаты расчётов по индивидуальным заданиям.

### Контрольные вопросы

1. Из каких статей состоит тепловой баланс лабораторной установки?
2. Какими факторами определяется величина коэффициента теплопередачи?
3. Какие механизмы теплопередачи и как задействованы при работе установки?
4. Как влияют размеры и конфигурация элементов теплообменника на величину теплового к. п.д. лабораторной установки?
5. Как влияет скорость движения теплоносителей на величину теплового к. п.д. лабораторной установки?
6. Как бы Вы изменили конструкцию лабораторной установки, чтобы повысить её тепловой к. п.д.?
7. Как уменьшить потери тепла в лабораторной установке?
8. Почему горячий теплоноситель циркулирует через теплообменную трубу, а не через межтрубное пространство?
9. Как влияет материал теплообменной трубы на величину теплового к. п.д. лабораторной установки?

10. Как влияет состояние поверхностей теплообменной трубы на величину теплового к. п.д. лабораторной установки?
11. Какой тип тока теплоносителей использовался при выполнении Вами лабораторной работы? Какой тип вы бы рекомендовали для данной установки?
12. Теплообменник какого типа Вы использовали бы в данной лабораторной установке, чтобы уменьшить её массогабаритные характеристики при сохранении всех прочих параметров?

#### Справочные данные

Таблица 5 - Коэффициенты теплопроводности и динамической вязкости воды в зависимости от температуры при атмосферном давлении

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ | $\mu, \text{мПа} \cdot \text{с}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ | $\mu, \text{мПа} \cdot \text{с}$ |
|---------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 0                   | 0,551                                                | 1,792                            | 60                  | 0,659                                                | 0,466                            |
| 10                  | 0,575                                                | 1,307                            | 70                  | 0,668                                                | 0,404                            |
| 20                  | 0,599                                                | 1,002                            | 80                  | 0,675                                                | 0,355                            |
| 30                  | 0,618                                                | 0,797                            | 90                  | 0,680                                                | 0,315                            |
| 40                  | 0,634                                                | 0,653                            | 100                 | 0,683                                                | 0,282                            |
| 50                  | 0,648                                                | 0,546                            | —                   | —                                                    | —                                |

Коэффициенты теплопроводности ( $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ): стали – 45,4; меди – 389,6.

Таблица 6

Плотность воды в зависимости от температуры при атмосферном давлении

| $t$ ,<br>°C | $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | $t$ ,<br>°C | $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | $t$ ,<br>°C | $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | $t$ ,<br>°C | $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | $t$ ,<br>°C | $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | $t$ ,<br>°C | $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | $t$ ,<br>°C | $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | $t$ ,<br>°C | $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | $t$ ,<br>°C | $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | $t$ ,<br>°C | $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> |
|-------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|
| 0           | 999,9                         | 10          | 999,7                         | 20          | 998,2                         | 30          | 995,7                         | 40          | 992,2                         | 50          | 988,1                         | 60          | 983,1                         | 70          | 977,7                         | 80          | 971,8                         | 90          | 965,3                         |
| 1           | 999,9                         | 11          | 999,6                         | 21          | 998,0                         | 31          | 995,4                         | 41          | 991,9                         | 51          | 987,6                         | 61          | 982,5                         | 71          | 977,2                         | 81          | 971,2                         | 91          | 964,8                         |
| 2           | 1000,0                        | 12          | 999,5                         | 22          | 997,8                         | 32          | 995,0                         | 42          | 991,5                         | 52          | 987,2                         | 62          | 982,0                         | 72          | 976,6                         | 82          | 970,5                         | 92          | 964,1                         |
| 3           | 1000,0                        | 13          | 999,4                         | 23          | 997,6                         | 33          | 994,7                         | 43          | 991,1                         | 53          | 986,7                         | 63          | 981,6                         | 73          | 976,0                         | 83          | 969,9                         | 93          | 963,3                         |
| 4           | 1000,0                        | 14          | 999,3                         | 24          | 997,3                         | 34          | 994,4                         | 44          | 990,7                         | 54          | 986,2                         | 64          | 981,1                         | 74          | 975,6                         | 84          | 969,3                         | 94          | 962,7                         |
| 5           | 1000,0                        | 15          | 999,1                         | 25          | 997,1                         | 35          | 994,1                         | 45          | 990,3                         | 55          | 985,7                         | 65          | 980,5                         | 75          | 975,0                         | 85          | 968,6                         | 95          | 961,9                         |
| 6           | 1000,0                        | 16          | 999,0                         | 26          | 996,8                         | 36          | 993,7                         | 46          | 989,8                         | 56          | 985,2                         | 66          | 980,1                         | 76          | 974,4                         | 86          | 968,0                         | 96          | 961,1                         |
| 7           | 999,9                         | 17          | 998,8                         | 27          | 996,5                         | 37          | 993,4                         | 47          | 989,4                         | 57          | 984,7                         | 67          | 979,6                         | 77          | 973,8                         | 87          | 967,3                         | 97          | 960,4                         |
| 8           | 999,9                         | 18          | 998,6                         | 28          | 996,3                         | 38          | 993,0                         | 48          | 989,0                         | 58          | 984,2                         | 68          | 978,9                         | 78          | 973,1                         | 88          | 966,6                         | 98          | 959,8                         |
| 9           | 999,8                         | 19          | 998,4                         | 29          | 996,0                         | 39          | 992,7                         | 49          | 988,5                         | 59          | 983,6                         | 69          | 978,3                         | 79          | 972,5                         | 89          | 966,0                         | 99          | 959,1                         |

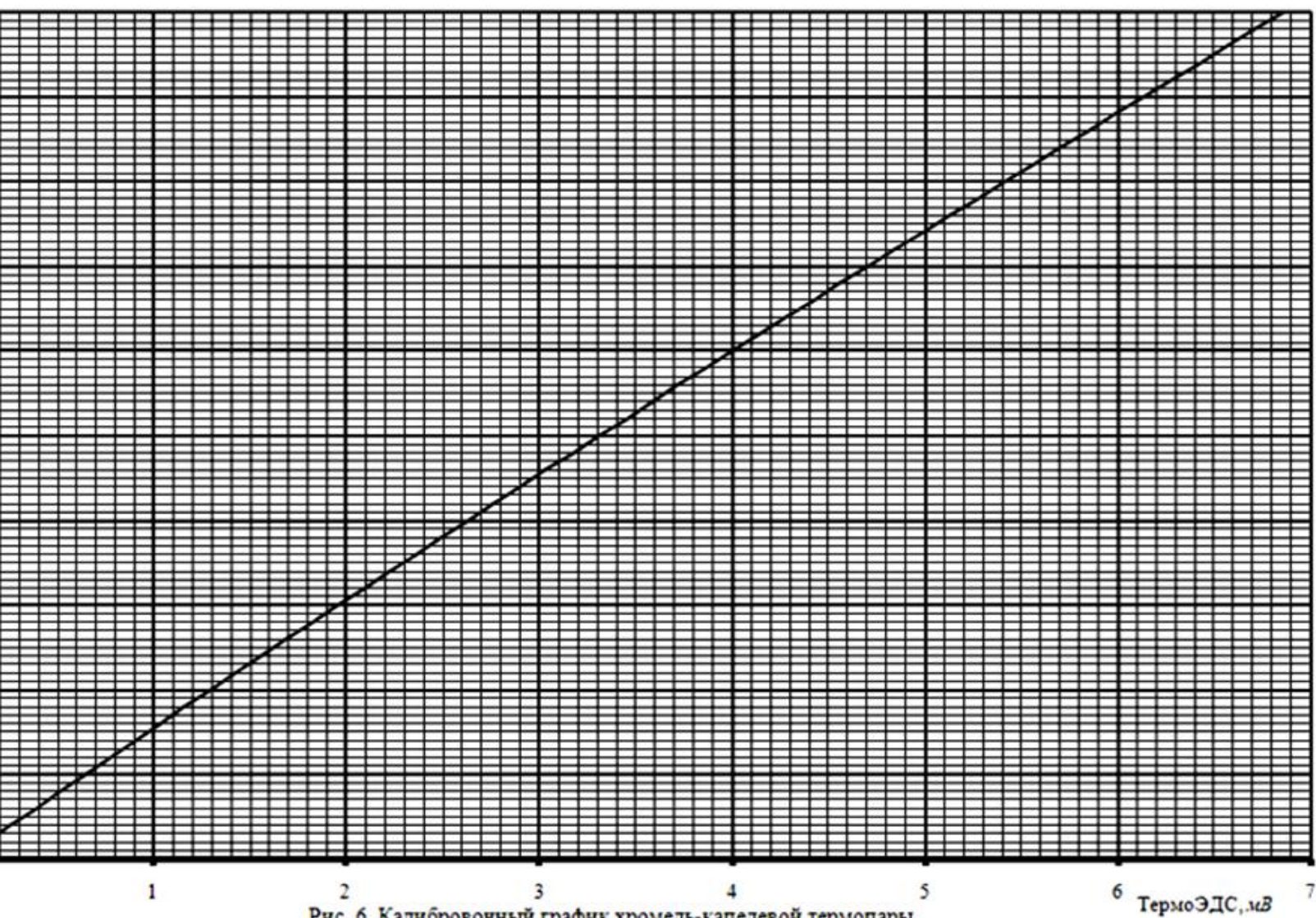


Рис. 6. Калибровочный график хромель-капелевой термопары

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тищенко Н. В. Охрана атмосферного воздуха. Справочник. – М.: Химия, 1991, 382 с.
2. Ефремов Г. И., Лукачевский Б. П. Пылеочистка. – М.: Химия, 1990, 67 с.
3. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1976, 552 с.
4. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1971. 784 с.
5. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии. 1, 2 ч. М.: Химия, 2002. 400 с., 368 с.
6. Процеси і апаратах харчових виробництв / Под ред. В. М. Стабникова. Киев: Вища школа, 1971. 200 с.
7. Рамм В.П. Абсорбция газов. М.: Химия, 1976. 656 с.
8. Стабников В. Н., Баранцев В. И. Процессы и аппараты пищевых производств. М.: Пищевая пром-ть, 1974. 356 с.
9. Александров И.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. Л.: Химия, 1965. 308 с.
10. Александров И.А. Массопередача при ректификации и абсорбции многокомпонентных смесей. - Л.: Химия, 1975. 320с.
11. Скобло А.И., Трегубова И.А., Молоканов Ю.К. Процессы и аппараты нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. – М.: Химия, 1982. 584 с.
12. Кафаров В.В. Основы массопередачи. – М.: Высшая школа, 1979. 439 с.
13. Комиссаров Ю.А., Глебов М.Б., Гордеев Л.С., Вент Д.П. Химикотехнологические процессы. Теория и эксперимент. – М.: Химия, 1999. 358 с.
14. Плановский А.Н., Рамм В.М., Каган С.В. Процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1967. 848 с.

15. Багатуров С.А. Основы теории и расчета перегонки и ректификации. М: Химия, 1974. 440 с. 13. Олевский В.М., Ручинский В.Р. Ректификация термически нестойких продуктов. М: Химия, 1972. 200 с.
16. Тепломассобменные процессы: Руководство к лаб. работам / Ф.А. Мусташкин, И.В. Шарнин, Л.К. Сафиуллина; КХТИ. Казань, 1985. 40 с.
17. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. М.: Энергия, 1967. 412 с.

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии»  
для обучающихся по направлению подготовки бакалавров  
18.03.01—«Химическая технология»  
Часть 1

Составитель: д.х.н., профессор кафедры химии ДГТУ Султанов Ю.М.