

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Солоненко Анна Александровна  
Должность: Директор  
Дата подписания: 31.05.2025 11:37:53  
Уникальный программный ключ:  
d9ba9a2cd160ab70421b57c937f8b3050e5



**Федеральное агентство по рыболовству**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное**  
**учреждение высшего образования**  
**«Астраханский государственный технический университет»**  
**Дмитровский рыбохозяйственный технологический институт (филиал)**  
**Федерального государственного бюджетного образовательного**  
**учреждения высшего образования**  
**«Астраханский государственный технический университет»**  
*Система менеджмента качества в области образования, воспитания, науки и инноваций сертифицирована*  
*ООО «ДКС РУС» по международному стандарту ISO 9001:2015*

**Отделение среднего профессионального образования**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ**  
**ДИСЦИПЛИНЫ «ОПЦ.12 ТЕРМОДИНАМИКА, ТЕПЛОТЕХНИКА И**  
**ГИДРАВЛИКА» ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ**  
**15.02.06 МОНТАЖ, ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ**  
**ХОЛОДИЛЬНО-КОМПРЕССОРНЫХ И ТЕПЛОНАСОСНЫХ МАШИН**  
**И УСТАНОВОК (ПО ОТРАСЛЯМ).**

**Дроздов М.М. Методические указания для выполнения лабораторных работ.**

Методические указания для выполнения лабораторных работ по разработана на основе Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования по специальности 15.02.06 Монтаж, техническая эксплуатация и ремонт холодильно-компрессорных и теплонасосных машин и установок (по отраслям).

Автор: М.М. Дроздов– преподаватель высшей квалификационной категории отделения СПО ДРТИ ФГБОУ ВО «АГТУ».

## Лабораторная работа №1 Основы технической термодинамики

**Задание:** Задание выполняется каждым студентом самостоятельно

**Составьте термодинамический словарь терминов:**

Термодинамика это –  
Теплопередача это–  
Термодинамические параметры состояния -  
Смесь это –  
Теплоемкость это–  
Закон Бойля - Мариотта–  
Закон Гей - Люссака–  
Уравнение идеального газа–  
Равновесное состояние это–  
Внутренняя энергия это –  
Первый закон термодинамике-  
Основные процессы идеальных газов -  
Второй закон термодинамики -  
Энтропия-  
Энтальпия –  
Компрессор это–  
Принцип действия компрессора–  
Водяной пар–  
Прямой и обратный цикл–  
КПД–

## Лабораторная работа №2. Основы теории теплообмена

**Задание:** Задание выполняется каждым студентом самостоятельно

### Задание 1

Как изменится коэффициент теплоотдачи от вертикальной плиты к окружающему воздуху если высоту плиты увеличить в 4 раза, а все другие условия оставить без изменения?

### Задание 2

Как изменится коэффициент теплоотдачи и количество сухого насыщенного водяного пара, конденсирующегося в единицу времени на поверхности горизонтальной трубы, если диаметр трубы увеличить в 3 раза, а давление пара, температурный напор и длину трубы оставить без изменений?

### Задание 3

Верно ли утверждение, что основным законом теплопроводности является закон Фурье?

### Задание 4

Дать пояснение процессам: кипение, конденсация, сублимация. В чем отличие их друг от друга. Показать области этих процессов на диаграмме  $s - T$ .

### Задание 5

Движение жидкости в трубе. Основные виды течений жидкости в трубе. Их граничные величины. От чего зависит критерий Рейнольдса.

## Лабораторная работа №3 Основы теории теплообмена

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

**Цель работы** — ознакомление с основами теории конвективного теплообмена и теории подобия применительно к случаю вынужденной конвекции; освоение методик экспериментального определения коэффициента теплоотдачи при движении газа в трубе и обобщения результатов эксперимента методами теории подобия.

### Содержание работы

1. Экспериментальное определение локальных и средних коэффициентов теплоотдачи при принудительном движении воздуха в горизонтальной трубе.
2. Обработка полученных результатов в критериальной форме.
3. Сравнение результатов с известными критериальными зависимостями.
4. Оценка погрешностей измерений.

### Основы теории

*Конвективным теплообменом* называется процесс переноса теплоты при перемещении объемов жидкости или газа из области пространства с одним значением температуры в область с другим значением температуры. Конвективный теплообмен между потоком жидкости (или газа) и поверхностью твердого тела называется *теплоотдачей*.

Различают теплоотдачу при *естественной* (свободной) и *вынужденной* конвекции.

При естественной конвекции движение жидкости (газа) вызывается неоднородными массовыми силами. Например, при неоднородном распределении температуры в поле силы тяжести возникает неоднородность плотности и связанная с ней подъемная сила.

При вынужденной конвекции движение жидкости или газа создается силами, приложенными извне. Такой силой является, например, сила обусловленная перепадом давления, создаваемым насосом. В настоящей работе исследуется теплоотдача между внутренней поверхностью трубы и воздухом, вынужденное движение которого осуществляется вентилятором.

Интенсивность теплоотдачи зависит от многих факторов, в частности от вида конвекции (естественная или вынужденная), скорости и режима движения среды (ламинарный или турбулентный), физических свойств среды (плотности  $\rho$ , коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , динамической вязкости  $\mu$ , удельной теплоемкости  $c_p$ ), а также от формы и размеров теплоотдающей или тепловоспринимающей поверхности, обтекаемой средой.

Явление теплоотдачи описывается системой дифференциальных уравнений, в которую входят уравнения движения, неразрывности, энергии, состояния с комплексом условий однозначности (т. е. с геометрическими, физическими, начальными и граничными условиями). Однако эта система математически очень сложна и может быть решена аналитически только в отдельных простых случаях. Численное решение с помощью ЭВМ часто требует использования нетривиальных вычислительных подходов и принятия упрощающих предположений. В связи с трудностями теоретического исследования теплоотдачи широко применяются экспериментальные методы.

В соответствии с опытным законом теплоотдачи Ньютона — Рихмана тепловой поток, переносимый конвекцией от поверхности теплообмена в окружающую среду, пропорционален площади поверхности теплообмена и разности температур поверхности и окружающей среды:

$$\delta Q = \alpha(t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}})dF, \quad (5.1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\delta Q$  — тепловой поток, Вт;  $dF$  — элемент поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $t_{\text{ст}}$  и  $t_{\text{ж}}$  —

Из уравнения (5.1) следует, что

$$\alpha = \frac{q}{t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}}}, \quad (5.2)$$

где  $q = \delta Q/dF$  — плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>.

С физической точки зрения коэффициент теплоотдачи представляет собой тепловую мощность, переносимую через единицу поверхности, обтекаемой жидкостью или газом, отнесенную к разности температур поверхности и жидкости. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  характеризует интенсивность теплоотдачи и зависит от перечисленных ранее факторов, но непосредственно не зависит от физических свойств обтекаемого средой твердого тела. Коэффициент теплоотдачи можно определить в результате решения системы дифференциальных уравнений конвективного теплообмена или экспериментально.

Каждый отдельный эксперимент, проведенный на модели или натуральном объекте, дает одно конкретное числовое значение искомой величины (коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ ) при определенных значениях исходных параметров. Чтобы найти зависимость коэффициента теплоотдачи хотя бы от одного параметра, необходимо провести множество экспериментов при различных значениях этого параметра, оставляя другие параметры неизвестными. Полученные экспериментально значения коэффициента теплоотдачи связываются с варьируемыми в экспериментах величинами эмпирической формулой. Такие зависимости, как правило, не отражают

полностью физическую сущность процессов и справедливы только в диапазонах значений входящих в них величин, охваченных экспериментами. При большом числе факторов крайне трудно подобрать эмпирическую зависимость, отражающую влияние всех факторов. Кроме того, необходимо быть уверенным, что результаты, полученные экспериментально на конкретной установке (модели), можно перенести на другие аналогичные явления, которые называются подобными.

*Подобными явлениями* принято считать явления одной физической природы, описываемые математически одинаковыми дифференциальными уравнениями, для которых условия однозначности качественно одинаковы (отличаются лишь числовыми значениями). Для таких явлений разработана теория подобия, позволяющая обобщить результаты в виде зависимостей, содержащих безразмерные комплексы, называемые критериями подобия. Полученные таким образом критериальные зависимости могут быть использованы для всей группы подобных явлений. Так, для рассматриваемого случая теплоотдачи в результате вынужденной конвекции при движении жидкости в трубах обобщение экспериментальных результатов представляет собой зависимость

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}). \quad (5.3)$$

Здесь  $\text{Nu} = \frac{\alpha d}{\lambda}$  — критерий Нуссельта;  $\text{Re} = \frac{\bar{w} \rho d}{\mu}$  — критерий Рейнольдса;  $\text{Pr} = \frac{\mu c_p}{\lambda}$  — критерий Прандтля;  $d$  — диаметр трубы, м;  $\bar{w}$  — средняя (по расходу) скорость движения жидкости в трубе, м/с;  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $\mu$  и  $c_p$  — коэффициент теплопроводности, плотность, динамическая вязкость и удельная теплоемкость жидкости, Вт/(м·К), кг/м<sup>3</sup>, кг/(м·с) и Дж/(кг·К) соответственно.

Все критерии являются безразмерными величинами и представляют собой обобщенные переменные, которые отражают влияние на процесс совокупности отдельных факторов. Критерии, содержащие искомые величины, называются *неопределяющими* (в нашем случае это критерий Нуссельта). Критерии, составленные из величин, входящих в условия однозначности (т.е. из известных

величин), называются *определяющими* (в нашем случае это критерии Рейнольдса и Прандтля). Критерии подобия получают путем приведения к безразмерному виду дифференциальных уравнений, описывающих процесс. Кроме того, критерии подобия можно получить, пользуясь методами теории размерности.

Конкретный вид функции в уравнении (5.3) зависит от режима течения (ламинарный или турбулентный), который определяется значением критерия Рейнольдса  $Re$ . Критическое значение критерия Рейнольдса для труб, при котором происходит переход из ламинарного режима в турбулентный, лежит в пределах  $2300 < Re_{кр} < 10^4$ . Значение  $Re_{кр}$  зависит от условий и степени турбулентности потока на входе в трубу, формы сечения трубы, шероховатости стенок, интенсивности теплообмена и некоторых других факторов. При  $Re < 2300$  режим течения газа или жидкости в трубе является ламинарным, при  $2300 < Re < 10^4$  — переходным, при  $Re > 10^4$  — турбулентным.

При рассмотрении конвективного теплообмена в трубе следует иметь в виду некоторые особенности процесса. Всю длину нагреваемой (или охлаждаемой) трубы можно разбить на два участка. На первом (начальном) участке трубы происходит формирование профиля скоростей и температур. Этот начальный участок называется также участком стабилизации. Длина его при турбулентном режиме течения составляет около  $50d$ . На втором (основном) участке трубы коэффициент теплоотдачи не изменяется по длине трубы. Формы поперечных профилей скорости и температуры на основном участке не изменяются.

Длина труб во многих теплообменных устройствах соизмерима с длиной участка тепловой стабилизации, поэтому знание локальных коэффициентов теплоотдачи необходимо для расчета количества теплоты, переданного от стенки трубы к потоку на начальном участке.

В условиях теплообмена при постоянной плотности теплового потока по длине нагреваемой трубы ( $q = \text{const}$ ) уменьшение местного (локального) значения коэффициента теплоотдачи на участке тепловой стабилизации приводит к тому, что температура стенки трубы  $t_c$  в направлении течения повышается быстрее, чем средняя по сечению температура потока  $t_{ж}$ . Плотность теплового потока на внутренней поверхности трубы  $q = -\lambda(\partial t/\partial r)_c$ , и согласно (5.2)  $\alpha = -\lambda(\partial t/\partial r)_c/(t_c - t_{ж})$ . При постоянной температуре стенки ( $t_c = \text{const}$ ) уменьшение значения  $\alpha$  отражает то обстоятельство, что  $(\partial t/\partial r)_c$  падает быстрее, чем уменьшается перепад температуры ( $t_c - t_{ж}$ ).

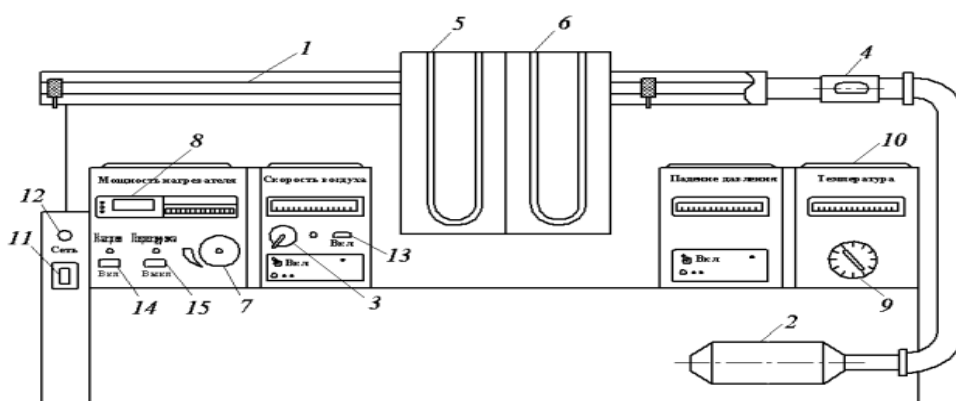
Согласно имеющимся данным критериальное уравнение подобия для расчета коэффициента теплоотдачи при вынужденном турбулентном течении газа в трубе, полученное путем обработки результатов эксперимента методами теории подобия, может быть представлено в следующем виде:

$$\text{Nu} = 0,021\text{Re}_{ж}^{0,8}\text{Pr}_{ж}^{0,43}. \quad (5.4)$$

Эта формула применима при  $10^4 < \text{Re}_{ж} < 5 \cdot 10^6$  и  $\text{Pr} \geq 0,7$  на основном участке трубы при близких значениях средних температур жидкости (газа) и стенки. Индекс «ж» означает, что в качестве определяющей температуры, для которой значения  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $\mu$  и  $c_p$  берутся из табл. 3.1, принята температура газа  $\bar{t}_{ж}$ , усредненная по сечению и длине расчетного участка. Критерий  $\text{Re}_{ж}$  рассчитан по скорости газа, усредненной по сечению трубы. В качестве характерного размера принят внутренний диаметр трубы.

В настоящей работе ставится задача сравнить полученные в эксперименте результаты с расчетными значениями, соответствующими уравнению (5.4).

Общий вид установки представлен на рис. 5.1.



**Рис. 5.1.** Общий вид установки:

1 — нагреваемая труба; 2 — центробежный вентилятор; 3 — регулятор напряжения электродвигателя вентилятора; 4 — воздушная заслонка; 5 — водяной дифманометр, сообщающийся с трубкой Пито; 6 — водяной дифманометр, показывающий полное падение давления на экспериментальном участке; 7 — регулятор напряжения автотрансформатора цепи нагрева; 8 — цифровой комбинированный прибор; 9 — переключатель термопар; 10 — блок измерения температуры; 11 — выключатель питания установки; 12 — контрольная лампа блока питания; 13 — кнопка включения и выключения центробежного вентилятора; 14 — кнопка включения нагрева трубы; 15 — кнопка выключения нагрева

Экспериментальный участок установки представляет собой трубу из коррозионно-стойкой стали внутренним диаметром  $d = 8,5$  мм и длиной  $L = 720$  мм. Один конец ее сообщается с атмосферой, а другой соединен шлангом с центробежным вентилятором. Движение воздуха в трубе 1 обеспечивается благодаря разрежению, создаваемому вентилятором 2. Скорость воздуха регулируется изменением частота вращения вала электродвигателя вентилятора с помощью регулятора напряжения 3, а также с помощью заслонки 4, обеспечивающей подсос атмосферного воздуха через отверстие в трубопроводе, идущем к центробежному вентилятору.

Скорость воздуха измеряется трубкой Пито в паре с водяным дифманометром 5.

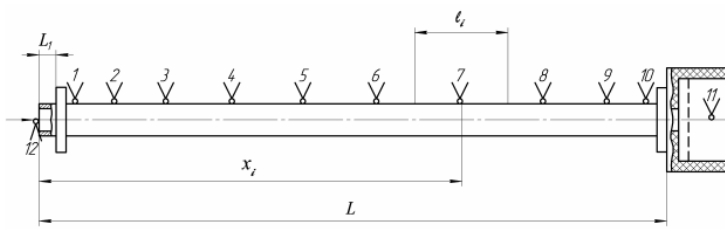
Падение давления на экспериментальном участке измеряется с помощью второго водяного дифманометра 6.

Опоры, в которых закреплена трубка, изготовлены из фторопласта и служат тепло- и электроизоляцией от окружающих элементов конструкции. На концах трубы припаяны медные шайбы, к которым от понижающего трансформатора подводится электрический ток для нагрева экспериментального участка трубы. Напряжение в цепи нагрева регулируется автотрансформатором ЛАТР-2М (ручка регулятора 7) и регистрируется цифровым комбинированным прибором 8. Электрическое сопротивление  $R$  трубки на длине  $L = 720$  мм составляет 0,0344 Ом.

Температура стенки трубы измеряется десятью хромель-копелевыми термопарами, горячие спаи которых приварены к ее наружной боковой поверхности. Координаты горячих спаев термопар на стенке трубы, отсчитываемые от начального сечения, и длины соответствующих участков измерения (рис. 5.2), указаны в табл. 5.1.

Термопары № 11 и 12 измеряют температуру воздуха соответственно на выходе из трубки и на ее входе. Термопара № 11 установлена в камере смешения. Для перемешивания воздуха перед термопарой № 11 установлена сетка.

Номера термопар, указанные на рис. 5.2, соответствуют позициям на переключателе термопар 9 (см. рис. 5.1). ТермоЭДС измеряется милливольтметром МВУ6-41А в комплекте с усилителем-преобразователем (с автоматической компенсацией температуры



**Рис. 5.2.** Расположение термопар на рабочем участке. Значения  $x_i$  и  $l_i$  приведены в табл. 5.1

Таблица 5.1

**Координаты горячих спаев термопар и длины соответствующих участков измерения**

Параметр	Номер термопары $i$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Координата $x_i$ , мм	25	45	85	155	250	370	490	610	695	715
Длина участка измерения $l_i$ , мм	25	30	55	82,5	107,5	120	120	102,5	52,5	25

холодных спаев термопар); показания выводятся на прибор блока измерения температуры 10.

### Порядок выполнения работы

Перед включением установки проверить исправность цепи заземления корпуса установки. При выполнении работы запрещается прикасаться к токоведущим частям установки, а также без необходимости вращать ручки на пульте управления.

1. Убедиться, что ручки регуляторов напряжения 3 и 7 (см. рис. 5.1) на панели приборов выведены против хода часовой стрелки до упора. Выключателем 11 на панели управления включить установку в сеть (при включении загорится контрольная лампа 12).

2. Кнопкой 13 включить центробежный вентилятор и с помощью заслонки 4 установить режим, соответствующий минимальной скорости воздуха (заслонка полностью открыта). Скорость определить по перепаду давления, показываемому водяным дифманометром 5, соединенным с трубкой Пито.

3. Кнопкой 14 включить цепь нагрева рабочего участка трубы, установив с помощью автотрансформатора напряжение, не превышающее 1,5 В. Напряжение измеряется цифровым комбинированным прибором 8 и регулируется вращением ручки автотрансформатора 7.

4. Время выхода установки на стационарный режим составляет около 10 мин. Убедившись в стационарности теплового режима по стабильности показаний термопар № 8, 9 и 11 (см. рис. 5.2) во времени, по милливольтметру блока измерения температуры 10 (см. рис. 5.1) найти показания всех 12 термопар. Шкала милливольтметра отградуирована в градусах Цельсия.

5. Водяным дифманометром 5 измерить перепад давления  $\Delta p$  на трубке Пито. Водяным дифманометром 6 измерить падение давления по длине трубы ( $\Delta h = p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}}$ ).

6. С помощью цифрового комбинированного прибора 8 измерить падение напряжения  $U$  на теплообменной трубе.

7. Измерить температуру  $t_{\text{вн}}$  и давление  $p$  окружающей среды.

8. Все показания, снятые при проведении опыта, занести в бланк отчета.

9. Опыты повторить еще на двух режимах — при максимально допустимой и промежуточной скоростях воздуха, которые соответствуют наполовину и полностью открытой заслонке 4.

10. При выключении установки сначала вращением ручки 7 автотрансформатора сбросить напряжение на теплообменной трубе. При этом цифровой комбинированный прибор 8 должен показывать нуль. Нажатием кнопки 15 выключить цепь нагрева трубы. При работающем центробежном вентиляторе по показаниям термопар проконтролировать температуру стенки трубы. Отключить центробежный вентилятор нажатием кнопки 13 только после того, как труба охладится до температуры окружающей среды.

### **Обработка результатов эксперимента**

Обработку результатов эксперимента следует выполнять в порядке, указанном в бланке обработки данных.

1. Мощность, Вт, потребляемую теплообменной трубой (на длине  $L = 720$  мм), вычислить по формуле

$$Q = \frac{U^2}{R}, \quad (5.5)$$

где  $U$  — напряжение на рабочем участке трубы, В;  $R$  — сопротивление рабочего участка трубы,  $R = 0,0344$  Ом.

2. При необходимости показания дифманометров блока расхода и блока давления на основании данных градуировки перевести в паскали. Шкалы этих приборов могут быть проградуированы непосредственно в паскалях.

3. Вычислить среднюю по длине рабочего участка температуру и плотность воздуха, а также среднюю по сечению скорость воздуха:

$$t_{\text{ж}} = \frac{\bar{t}_{11} + t_{12}}{2}; \quad (5.6)$$

$$\rho_{\text{ж}} = \frac{p}{R_{\text{в}}(t_{\text{ж}} + 273)}; \quad (5.7)$$

$$\bar{w} = \xi \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{\text{ж}}}}. \quad (5.8)$$

Здесь  $\rho_{\text{ж}}$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\bar{w}$  — средняя скорость воздуха, м/с;  $\bar{t}_{11} = \psi t_{11}$  — средняя по сечению температура воздуха на выходе из рабочего участка, °С;  $t_{12}$  — температура воздуха на входе в трубу, приблизительно равная температуре окружающей среды (жидкости), °С;  $t_{11}$  — температура воздуха на выходе из рабочего участка трубы (измеряется на оси), °С;  $p$  — барометрическое давление в окружающей среде, Па;  $R_{\text{в}} = 287$  Дж/(кг·К) — газовая постоянная воздуха;  $\Delta p$  — перепад давления на трубке Пито, измеряемый дифманометром 5 (см. рис. 5.1), Па;  $\psi$  и  $\xi$  — поправочные коэффициенты, связанные с погрешностью измерения температуры и усреднением скорости ( $\psi \approx 1,0$ ;  $\xi \approx 0,8$ ).

4. Вычислить температурный напор в сечениях трубы с координатами  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, 10$ ):

$$\Delta t_i = (t_{ci} - t_{12}) - \frac{t_{11} - t_{12}}{730} x_i. \quad (5.9)$$

Здесь  $t_{ci}$  — температура стенки по показаниям  $i$ -й термопары, °С;

$x_i$  берут в миллиметрах из табл. 5.1; температуру  $t_{12}$  можно принять равной температуре окружающей среды  $t_{вн}$ .

5. Рассчитать среднюю температуру стенки:

$$\bar{t}_c = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} t_{ci}. \quad (5.10)$$

6. Экспериментальные значения локальных коэффициентов теплоотдачи определить по формуле

$$\alpha_i = \frac{Q - Q_{п}}{\Delta t_i \pi d L}, \quad (5.11)$$

где  $Q_{п} = k(\bar{t}_c - t_{12})$  – потери теплоты; коэффициент  $k$  находят опытным путем ( $k = 0,18$ ).

7. Экспериментальное значение среднего коэффициента теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К), определить по формуле

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=2}^9 \alpha_i l_i}{\sum_{i=2}^9 l_i}. \quad (5.12)$$

При этом вследствие концевых потерь значения  $\alpha_1$  и  $\alpha_{10}$  получаются неточными, при усреднении их не учитывать; значения  $l_i$  взять из табл. 5.1.

8. Результаты, полученные для трех режимов, обобщить в виде критериальной зависимости, поэтому для каждого режима следует рассчитать

критерий Нуссельта

$$Nu_{ж} = \frac{\bar{\alpha} d}{\lambda_{ж}}, \quad (5.13)$$

критерий Рейнольдса

$$Re_{ж} = \frac{w d \rho_{ж}}{\mu_{ж}}. \quad (5.14)$$

Значение теплофизических параметров воздуха  $\lambda_{ж}$ ,  $\mu_{ж}$  и  $Pr_{ж}$  взять из табл. 3.1 индекс «ж» указывает, что эти характеристики должны соответствовать значениям для средней температуры жидкости  $t_{ж}$ .

9. По результатам расчета построить зависимость  $Nu_{ж}$  от  $Re_{ж}$  в логарифмических координатах, нанося точки, соответствующие экспериментальным режимам.

10. На этом же графике построить зависимость (в виде линии), рассчитываемую по формуле

$$\text{Nu} = f(\text{Re}_{\text{ж}})\text{Pr}_{\text{ж}}^{0,43}.$$

Значения  $f(\text{Re}_{\text{ж}})$  приведены ниже:

$\text{Re}_{\text{ж}} \dots$	2300	2500	3000	3500	4000	5000	6000	7000	8000	9000	$> 10^4$
$f(\text{Re}_{\text{ж}}) \dots$	3,6	4,9	7,5	10	12,2	16,5	20	24	27	30	$0,021\text{Re}_{\text{ж}}^{0,8}$

Расчет выполнить для значений критерия Рейнольдса, использованных в экспериментах.

### Оценка погрешностей измерений

Здесь относительная погрешность измерения напряжения равна

$$\frac{\Delta U}{U} = \pm \frac{K(U_{\text{в}} - U_{\text{н}})}{100U}, \quad (5.19)$$

где  $K = 1$  — класс точности прибора;  $U_{\text{в}} = 5 \text{ В}$  и  $U_{\text{н}} = 0,5 \text{ В}$  — верхний и нижний пределы измерений напряжения;  $U$  — измеряемое значение напряжения;  $\Delta R/R$  — относительная погрешность измерения сопротивления трубы, определенная при изготовлении установки и равная  $\pm 0,0179$ .

Температуры  $t_{\text{с}}$  и  $t_{\text{ж}}$  измеряют термоэлектрическим термометром. Пределы абсолютной погрешности милливольтметра первого класса, используемого для измерения термоЭДС, равны  $\pm 0,1062$ , что для хромель-копелевой термопары соответствует  $\pm 1,5^\circ\text{C}$ .

Пределы допустимой абсолютной погрешности блока с устройством для компенсации температуры холодных спаев термопар не превышают  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Квадраты общей относительной погрешности термоэлектрического термометра и относительных погрешностей измерения  $t_{\text{с}}$  и  $t_{\text{ж}}$  равны

$$\left(\frac{\Delta t_{\text{с}}}{t_{\text{с}} - t_{\text{ж}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_{\text{ж}}}{t_{\text{с}} - t_{\text{ж}}}\right)^2 = \pm \frac{1,5^2 + 2^2}{(t_{\text{с}} - t_{\text{ж}})^2}. \quad (5.20)$$

Отчет о работе должен содержать: принципиальную схему экспериментальной установки; оформленный протокол испытаний и обработки результатов; анализ полученных результатов, основанный на сравнении экспериментальных данных с результатами расчета по существующим критериальным формулам; оценку погрешностей измерений.

### Контрольные вопросы

1. От каких факторов зависит интенсивность переноса теплоты от поверхности твердого тела к обтекающему его газу?
2. В чем состоит закон теплоотдачи Ньютона — Рихмана?
3. Каков физический смысл коэффициента теплоотдачи?
4. Как определить средний температурный напор по длине трубы?
5. Как по экспериментальным данным вычислить локальный (местный) и средний коэффициенты теплоотдачи?
6. При каких значениях критерия Рейнольдса режим течения газа в трубе является ламинарным, переходным и турбулентным?
7. Как определить скорость течения воздуха в трубе?
8. Какие безразмерные комплексы называют определяющими критериями подобия?
9. Назовите критерии подобия для явления теплоотдачи при вынужденном течении газа в трубе.
10. В чем состоит преимущество зависимостей, связывающих безразмерные критерии подобия, по сравнению с обычными зависимостями, содержащими размерные переменные?

### Лабораторная работа №4 Тепловые установки

#### Задание выполняется каждым студентом самостоятельно

Выполните следующие задания:

1. Определить массу 1 м<sup>3</sup> водяного пара при давлении 700 кПа и степени сухости 0,75.
2. В сосуде вместимостью 5 м<sup>3</sup> находится влажный насыщенный пар при давлении 150 бар со степенью сухости 0,3. Определить массу влажного пара и объём, занимаемый кипящей водой и сухим насыщенным паром.
3. Определить температуру охлаждающей воды на выходе из водяного маслоохладителя, если температура трансформаторного масла на входе в теплообменник  $t'_1=45^{\circ}\text{C}$ , на выходе  $t''_1=35^{\circ}\text{C}$ , расход масла 15000 кг/час. Температура охлаждающей воды на входе 15  $^{\circ}\text{C}$ , расход воды 25000 кг/ч.

## Лабораторная работа №5 Использование теплоты в сельском хозяйстве

Расчеты ведутся каждым студентом самостоятельно

### Задание 1

В теплообменном аппарате вода с расходом 2 кг/с нагревается от температуры 20 °С до 210 °С. При этом газы охлаждаются от 410 °С до 250 °С. Определить поверхность теплообменника при включении его по схеме прямотока и 120 противотока, если коэффициент противотока, теплопередачи  $k = 32 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ .

### Задание 2

В теплообменнике конденсируется пар при атмосферном давлении 0,1 МПа и конденсат удаляется при температуре насыщения. Охлаждающая вода нагревается от  $t_2 = 20 \text{ °С}$  до  $t'_2 = 85 \text{ °С}$ . Поверхность теплообменника  $F = 5 \text{ м}^2$ . Коэффициент теплопередачи  $k = 800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Определить расход горячего теплоносителя.

### Задание 3

В испарителе кипит вода при давлении  $p_2 = 1 \text{ бар}$ . Греющий пар при давлении  $p_1 = 20 \text{ бар}$  конденсируется и удаляется при температуре насыщения. Расход воды  $G_2 = 0,2 \text{ кг/с}$ . Определить расход греющего пара.

### Задание 4

Определить расход пара на нагрев воды в пароводяном теплообменнике при условии, что весь пар превращается в конденсат, выходящий из теплообменника в состоянии насыщения при давлении греющего пара. Найти площадь поверхности нагрева в теплообменнике при условии, что коэффициент теплопередачи  $k = 2700 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Построить схематично график изменения температуры теплоносителей вдоль поверхности нагрева, если расход воды  $G_2 = 2 \text{ м}^3/\text{мин}$ , температура воды на входе 25 °С, на выходе 75 °С. Давление пара  $p = 0,12 \text{ МПа}$ , степень сухости  $x = 0,98$ .

## Лабораторная работа №6 Гидравлика

Задание выполняется каждым студентом самостоятельно

**Составьте гидравлический словарь терминов:**

Гидравлика это –

Гидростатика это–

Гидродинамика это –

Жидкостью называется–

Физические свойства жидкости–

Закон Паскаля–

Закон Архимеда–

Уравнение не разрывности потока–

Уравнение Бернулли –

Гидравлические сопротивления это–

Внезапное сужение -

Постепенное расширение -

Гидравлический удар в трубе это–

## Лабораторная работа №7 Основы сельскохозяйственного водоснабжения и гидромелиорации

**Задание выполняется каждым студентом самостоятельно**

**Составьте гидравлический словарь терминов:**

- Гидравлика это –
- Гидростатика это–
- Гидродинамика это –
- Жидкостью называется–
- Физические свойства жидкости–
- Закон Паскаля–
- Закон Архимеда–
- Уравнение не разрывности потока–
- Уравнение Бернулли –
- Гидравлические сопротивления это–
- Внезапное сужение -
- Постепенное расширение -
- Гидравлический удар в трубе это–
- Кавитация это–
- Напор это–
- Гидравлическая машина это -
- Труба это–
- Насос это–
- Внезапное сужение -
- Постепенное расширение -
- Гидравлический удар в трубе это–

## Решение задач №1 Основы технической термодинамики

Задачи решаются группами по 5 человек

### Задача 1

Какова внутренняя энергия 10 моль одноатомного газа при температуре  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

### Задача 2

При уменьшении объема одноатомного газа в 3,6 раза его давление увеличилось на 20%. Во сколько раз изменилась внутренняя энергия?

### Задача 3

Температура воздуха в комнате объемом  $70\text{ м}^3$  была  $280\text{ К}$ . После того как протопили печь, температура поднялась до  $296\text{ К}$ . Найти работу воздуха при расширении, если давление постоянно и равно  $100\text{ кПа}$ .

### Задача 4

Какую работу совершил воздух массой  $200\text{ г}$  при его изобарном нагревании на  $20\text{ К}$ ? Какое количество теплоты ему при этом сообщили?

### Задача 5

Температура нагревателя идеальной тепловой машины  $117\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а холодильника  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Количество теплоты, получаемое машиной от нагревателя за  $1\text{ с}$ , равно  $60\text{ кДж}$ . Вычислить КПД машины, количество теплоты, отдаваемое холодильнику в  $1\text{ с}$ , и мощность машины.

### Задача 6

Сосуд содержит  $2\text{ л}$  воды и лед при общей температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . После введения  $380\text{ г}$  водяного пара при температуре  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  лед растаял и вся вода нагрелась до  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Сколько льда было в сосуде? Теплоемкость сосуда  $57\text{ Дж/К}$ .

### Задача 7

Сколько дров надо сжечь в печи с КПД  $40\%$ , чтобы получить из  $200\text{ кг}$  снега, взятого при температуре  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , воду при  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

### Задача 8

Через воду, имеющую температуру  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , пропускают водяной пар при  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Сколько процентов составит масса воды, образовавшейся из пара, от массы всей воды в сосуде в момент, когда ее температура равна  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

### Задача 9

После опускания в воду, имеющую температуру  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , тела, нагретого до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , через некоторое время установилась общая температура  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Какой станет температура воды, если, не вынимая первого тела, в нее опустить еще одно такое же тело, нагретое до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

### Задача 10

Бытовой газовый водонагреватель проточного типа имеет полезную мощность  $21\text{ кВт}$  и КПД  $80\%$ . Сколько времени будет наполняться ванна вместимостью  $200\text{ л}$  водой, нагретой в нагревателе на  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ , и каков расход газа (в литрах) за это время? При сгорании  $1\text{ м}^3$  природного газа выделяется энергия  $36\text{ МДж}$ .

## Решение задач №2 Основы теории теплообмена

Задачи решаются группами по 2 человека

### Задача №1.

Определить термическое сопротивление теплопроводности  $R_t$  и толщину  $\delta$  плоской однослойной стенки, если при разности температур ее поверхностей  $\Delta T = T_{w2} - T_{w1} = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$  через нее проходит стационарный тепловой поток плотностью  $q = 3\text{ кВт/м}^2$ . Коэффициент теплопроводности стенки  $\lambda = 2\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

### Задача №2.

Плоская стенка толщиной  $\delta = 50\text{ мм}$  с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 2\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  пропускает стационарный тепловой поток, имеющий поверхностную плотность  $q = 3\text{ кВт/м}^2$ . Температура тепловоспринимающей поверхности стенки  $T_{w1} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить термическое сопротивление теплопроводности стенки  $R_t$  и температуру теплоотдающей поверхности  $T_{w2}$ .

### Задача №3.

Вычислить потерю теплоты с  $1\text{ м}$  неизолированного трубопровода диаметром  $d_1/d_2 = 150/165\text{ мм}$ , проложенного на открытом воздухе, если внутри трубы протекает вода со средней температурой  $T_{f1} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а температура окружающего воздуха  $T_{f2} = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности материала трубы  $\lambda = 50\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Коэффициент теплоотдачи от воды к стенке трубы  $\alpha_1 = 1000\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$  и от трубы к окружающему воздуху  $\alpha_2 = 12\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ . Определить также температуры на внутренней и внешней поверхностях трубы.

#### **Задача №4.**

Нагреватель, выполненный из трубки диаметром  $d = 25$  мм и длиной  $L = 0,5$  м, погружен вертикально в бак с водой, имеющей температуру  $T_f = 20$  °С. Определить количество теплоты, передаваемое нагревателем в единицу времени, считая температуру его поверхности постоянной по всей длине и равной  $T = 55,5$  °С.

#### **Задача №5.**

По трубе  $d = 60$  мм протекает воздух со скоростью  $w = 5$  м/с. Определить значение среднего коэффициента теплоотдачи, если средняя температура воздуха  $T_f = 100$  °С.

#### **Задача №6.**

На наружной поверхности горизонтальной трубы диаметром  $d = 20$  мм и длиной  $L = 2$  м конденсируется сухой насыщенный водяной пар при давлении  $p_n = 1,013 \cdot 10^5$  Па. Температура поверхности трубы  $T_w = 94,5$  °С. Определить средний коэффициент теплоотдачи от пара к трубе и количество пара  $G$ , которое конденсируется на поверхности трубы.

#### **Задача №7.**

Определить коэффициент теплоотдачи и температуру поверхности нагрева при пузырьковом режиме кипения в большом объеме. Давление воды 1 МПа, а плотность теплового потока  $q = 0,4$  МВт/м<sup>2</sup>.

### **Решение задач №3 Тепловые установки**

Задачи решаются группами 2-3 человека

#### **Задача №1.**

Определить температуру, удельный объем, плотность, энтропию, энтальпию сухого насыщенного водяного пара при давлении 1 МПа.

#### **Задача №2.**

Определить внутреннюю энергию водяного пара при  $p = 5$  МПа и  $t = 300$  °С.

#### **Задача №3.**

1 кг воды с температурой 100 °С нагревается при постоянном давлении 3 МПа и переводится в пар с температурой 400 °С. Определить начальные и конечные параметры, количество теплоты, расходуемой на нагрев воды до кипения, на процесс парообразования, на перегрев пара, суммарную теплоту процесса, степень перегрева пара и работу изменения объема.

#### Задача №4.

Простой цикл ПТУ имеет следующие параметры: давление и температура пара перед турбиной  $p_0 = 130$  бар и  $t_0 = 510^\circ\text{C}$ , давление пара в конденсаторе  $p_k = 0,035$  бар. Определить термический КПД цикла, удельные расходы пара и теплоты на выработанный кВт·ч.

#### Решение задач №4 Гидравлика

Задачи решаются группами по 5 человек

##### Задача 1

Сосуд заполнен водой, занимающей объем  $W_1 = 2 \text{ м}^3$ . На сколько уменьшится и чему будет равен этот объем при увеличении давления на величину на величину 200 бар при температуре

$20^\circ\text{C}$  ? Модуль объемной упругости для воды при данной температуре  $E_0 = 2110$  МПа.

##### Задача 2

Плотность масла АМГ-10 при температуре  $20^\circ\text{C}$  составляет  $850 \text{ кг/м}^3$ . Определить плотность масла при повышении температуры до  $60^\circ\text{C}$  и увеличении давления с атмосферного ( $p_1 = 0,1$  МПа) до  $p_2 = 8,7$  МПа. Модуль объемной упругости масла  $E_0 = 1305$  МПа, температурный коэффициент  $\beta_t = 0,0008$  1/град.

##### Задача 3

В цилиндрический бак диаметром 2 м до уровня  $H = 1,5$  м налиты вода и бензин. Уровень воды в пьезометре ниже уровня бензина на  $h = 300$  мм. Определить вес находящегося в баке бензина, если  $\rho_{\text{б}} = 700 \text{ кг/м}^3$

##### Задача 4

Система из двух поршней, соединенных штоком, находится в равновесии. Определить силу, сжимающую пружину. Жидкость, находящаяся между поршнями и в бачке – масло с плотностью  $\rho = 870 \text{ кг/м}^3$ . Диаметры  $D = 80$  мм;  $d = 30$  мм; высота  $H = 1000$  мм; избыточное давление  $p_0 = 10$  кПа.

##### Задача 5

Определить силу  $F$ , необходимую для удержания в равновесии поршня, если труба под поршнем заполнена водой, а размеры трубы:  $D = 100$  мм;  $H = 0,5$  м;  $h = 4$  м. Длины рычага:  $a = 0,2$  м и  $b = 1$  м. Собственным весом поршня пренебречь.

##### Задача 6

По трубопроводу диаметром  $d = 150$  мм перекачивается нефть плотностью  $\rho = 800$  кг/м<sup>3</sup> в количестве 1200 т. в сутки. Определить секундный объемный расход нефти  $Q$  и среднюю скорость ее течения  $v$ .

#### Задача 7

Из напорного бака вода течет по трубе диаметром  $d_1 = 20$  мм, и затем вытекает в атмосферу через насадок с диаметром выходного отверстия  $d_2 = 10$  мм. Избыточное давление воздуха в баке  $p_0 = 0,18$  МПа; высота  $H = 1,6$  м. Пренебрегая потерями энергии, определить скорости течения воды в трубе  $v_1$  и на выходе из насадки

#### Задача 8

Определить число Рейнольдса и режим движения воды в водопроводной трубе диаметром  $d = 300$  мм, если расход  $Q = 0,136$  м<sup>3</sup>/с. Коэффициент кинематической вязкости для воды (при  $t = 10$  °С)  $\nu = 1,306 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

#### Задача 9

Вентиляционная труба  $d = 0,1$  м имеет длину  $\ell = 100$  м. Определить потери давления, если расход воздуха, подаваемый по трубе, равен  $Q = 0,078$  м<sup>3</sup>/с. Давление на выходе равно атмосферному ( $p_{ат} = 0,1$  МПа). Местные сопротивления по пути движения воздуха отсутствуют. Кинематическая вязкость воздуха при  $t = 20$  °С составляет  $\nu = 15,7 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Средняя шероховатость выступов  $\Delta = 0,2$  мм, плотность воздуха  $\rho = 1,18$  кг/м<sup>3</sup>.

#### Задача 10

Вода перетекает из напорного бака, где избыточное давление воздуха  $p_1 = 0,3$  МПа, в открытый резервуар по короткой трубе диаметром  $d = 50$  мм, на которой установлен кран. Чему должен быть равен коэффициент сопротивления крана для того, чтобы расход воды составлял  $Q = 8,7$  л/с. Высоты уровней  $H_1 = 1$  м,  $H_2 = 3$  м. Учесть потери напора на входе в трубу ( $\zeta_{вх} = 0,5$ ) и на выходе из трубы (внезапное расширение).

### Решение задач №6 Основы сельскохозяйственного водоснабжения и гидромелиорации

Задачи решаются группами по 5 человек

#### Задача 1

При испытании насоса получены следующие данные: избыточное давление на выходе из насоса  $p_2 = 0,35$  МПа; вакуум перед входом в насос  $h_{вак} = 294$  мм рт. ст.; подача  $Q = 6,5$  л/с; крутящий момент на валу насоса  $M = 41$  Нм; частота вращения вала

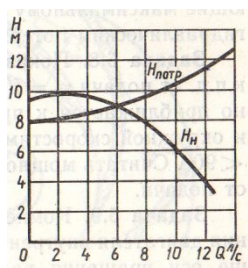
насоса  $n=800$  об/мин. Определить мощность, развиваемую насосом; потребляемую мощность и к.п.д. насоса. Диаметры всасывающего и напорного трубопроводов считать одинаковыми.

### Задача 2

Центробежный насос системы охлаждения двигателя имеет рабочее колесо диаметром  $D_2=200$  мм с семью радиальными лопатками ( $\beta_2=90^\circ$ ); диаметр окружности входа  $D_1=100$  мм. Какую частоту вращения нужно сообщить валу этого насоса при работе на воде для получения давления насоса  $p=0,2$  МПа? Гидравлический к.п.д. насоса принять равным  $\eta=0,7$ .

### Задача 3

Центробежный насос работает с частотой вращения  $n_1=1500$  об/мин и перекачивает жидкость по трубопроводу, для которого задана кривая потребного напора  $H_{потр}=f(Q)$  (см. рисунок). На том же графике дана характеристика насоса  $H_n$  при указанной частоте вращения. Какую частоту вращения нужно сообщить данному насосу, чтобы увеличить подачу жидкости в два раза?



### Задача 4

Центробежный насос, характеристика которого описывается уравнением  $H_n=H_0-k_1Q^2$ , нагнетает жидкость в трубопровод, потребный напор для которого пропорционален квадрату расхода:  $H_{потр}=k_2Q^2$ . Определить подачу насоса и его напор, если  $H_0=5$  м,  $k_1=k_2=0,05 \cdot 10^6$  с<sup>2</sup>/м<sup>5</sup>. Какими будут подача насоса и напор, если частота его вращения увеличится вдвое, и вдвое возрастет сопротивление трубопровода, т.е.  $k_2=0,1 \cdot 10^6$  с<sup>2</sup>/м<sup>5</sup>?

### Задача 5

При постоянном расходе жидкости, подводимой к радиально-поршневому гидромотору, частоту вращения его ротора можно изменять за счет перемещения статора и, следовательно, изменения эксцентриситета  $e$ . Определить максимальную частоту вращения ротора гидромотора, нагруженного постоянным моментом  $M=300$  Н·м, если известно: максимальное давление на входе в гидромотор  $p_{max}=20$  МПа; расход

подводимой жидкости  $Q=15$  л/мин; объемный к.п.д. гидромотора  $\eta_0=0,9$  при  $p_{max}$ ; механический к.п.д. при том же давлении  $\eta_m=0,92$ .

