

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Блинова Светлана Павловна
Должность: Заместитель директора по учебно-воспитательной работе
Дата подписания: 29.05.2023 11:02:02
Уникальный программный ключ:
1cafd4e102a27ce11a89a2a7ceb20237f3ab5c65

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Норильский государственный индустриальный институт»
Политехнический колледж

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ДЛЯ СТУДЕНТОВ ПО ПРОВЕДЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

по специальности
13.02.01 Тепловые электрические станции

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ
ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

2020

Методические указания для студентов по проведению лабораторных дисциплины «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ» И «ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ»

разработана на основе Федерального государственного образовательного стандарта по специальности 13.02.01 Тепловые электрические станции

Организация-разработчик: Политехнический колледж ФГБОУ ВО «Норильский государственный индустриальный институт»

Разработчик:
Стрельникова Лилия Ивановна, преподаватель

Рассмотрена на заседании цикловой комиссии
Тепловых электрических станций

Председатель комиссии _____ Семенова С.И.

Утверждена методическим советом политехнического колледжа ФГБОУ ВО «Норильский государственный индустриальный институт».

Протокол заседания методического совета № ___ от «___» _____ 20__ г.

Зам. директора по УР _____ С.П. Блинова

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Порядок выполнения лабораторных работ.....	4
1 Лабораторная работа №1.....	5
Приборы и методы измерения параметров состояния	
2 Лабораторная работа №2.....	12
Определение показателя К адиабаты для воздуха	
3 Лабораторная работа № 3.....	17
Определение массовой изобарной теплоемкости воды	
4 Лабораторная работа №4.....	31
Определение коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции	
Список используемой литературы.....	35

Введение

Методические указания разработаны в соответствии с рабочей программой дисциплины «Теоретические основы теплотехники», предназначенной для студентов специальности 13.02.01 Тепловые электрические станции.

Предлагаемые лабораторные работы позволяют углубить теоретические знания студентов по предмету и привить практические навыки при различных методах измерений. С этой целью составлено данное методическое указание для проведения лабораторных работ.

В результате освоения дисциплины обучающийся по специальности 13.02.01 Тепловые электрические станции

должен уметь:

- определять параметры состояния газа, рассчитывать газовую смесь;
- определять теплоемкость отдельного газа и смеси;
- проводить анализ основных термодинамических процессов;
- изображать газовые циклы в диаграммах; использовать таблицы и диаграммы для решения задач для идеальных и реальных газов;
- определять состояние и параметры водяного пара;
- производить расчеты при истечении и дросселировании газов и паров.
- производить расчеты по определению плотности теплового потока, температуры, термического сопротивления теплопроводности одно- и многослойной стенок;
- определять коэффициент теплоотдачи, теплопередачи, термического сопротивления теплоотдачи и теплопередачи,
- соблюдать правила технической безопасности при выполнении лабораторных работ;

В результате освоения учебной дисциплины обучающийся

должен знать:

- основные газовые законы, газовые смеси;
- теплоемкость газов и газовых смесей;
- законы термодинамики; термодинамические процессы идеальных газов;
- газовые циклы;
- водяной пар и его свойства; диаграммы и таблицы водяного пара;
 - термодинамические процессы водяного пара;
- циклы паротурбинных установок;
- процессы передачи теплоты;
- основные положения и законы конвективного теплообмена;
- основные понятия и законы теплового излучения;

В процессе освоения дисциплины студент должен овладеть общими компетенциями:

ОК 1. Понимать сущность и социальную значимость своей будущей профессии, проявлять к ней устойчивый интерес.

ОК 2. Организовывать собственную деятельность, определять методы и способы выполнения профессиональных задач, оценивать их эффективность и качество.

ОК 3. Решать проблемы, оценивать риски и принимать решения в нестандартных ситуациях.

ОК 4. Осуществлять поиск, анализ и оценку информации, необходимой для постановки и решения профессиональных задач, профессионального и личностного развития.

ОК 5. Использовать информационно-коммуникационные технологии для совершенствования профессиональной деятельности.

ОК 6. Работать в коллективе и команде, обеспечивать ее сплочение, эффективно общаться с коллегами, руководством, потребителями.

ОК 7. Ставить цели, мотивировать деятельность подчиненных, организовывать и контролировать их работу с принятием на себя ответственности за результат выполнения заданий.

ОК 8. Самостоятельно определять задачи профессионального и личностного развития, заниматься самообразованием, осознанно планировать повышение квалификации.

ОК 9. Быть готовым к смене технологий в профессиональной деятельности.

В процессе освоения дисциплины студент должен овладевать профессиональными компетенциями:

ПК 1.1. Проводить эксплуатационные работы на основном и вспомогательном оборудовании котельного цеха, топливоподачи и мазутного хозяйства.

ПК 1.2. Обеспечивать подготовку топлива к сжиганию.

ПК 1.3. Контролировать работу тепловой автоматики и контрольно-измерительных приборов в котельном цехе.

ПК 2.1. Проводить эксплуатационные работы на основном и вспомогательном оборудовании турбинного цеха.

ПК 2.2. Обеспечивать водный режим электрической станции.

ПК 2.3. Контролировать работу тепловой автоматики, контрольно-измерительных приборов, электрооборудования в турбинном цехе.

ПК 4.1. Управлять параметрами производства тепловой энергии.

ПК 4.2. Определять технико-экономические показатели работы основного и вспомогательного оборудования ТЭС.

ПК 4.3. Оптимизировать технологические процессы.

ПК 5.2. Проводить инструктажи и осуществлять допуск персонала к работам.

ПК 5.3. Контролировать состояние рабочих мест и оборудования на участке в соответствии с требованиями охраны труда.

ПК 5.4. Контролировать выполнение требований пожарной безопасности.

Правила выполнения лабораторных работ

Перед выполнением лабораторной работы студент должен ознакомиться с теоретическими сведениями по изучаемому разделу дисциплины «Теоретические основы теплотехники», с описанием конкретной установки и поясняющими схемами.

Отчет о выполнении лабораторной работы оформляется в электронном виде, в строгом соответствии с требованиями стандарта. Необходимые эскизы или схемы установок можно выполнять с помощью чертежного инструмента. При выполнении расчетов обязательно указывать единицы измерения физических величин.

В отчет входят следующие разделы:

1. Цель работы.
2. Задание.
3. Эскиз используемого оборудования.
4. Исходные данные.
5. Расчет, обработка результатов эксперимента.
6. Заключение.

Окончательная оценка по практическому заданию выставляется после предоставления отчета о проделанной работе, обсуждения полученных результатов и выводов, ответа на контрольные вопросы по изучаемой теме.

Лабораторная работа 1 (2ч.)

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ

Цель работы

Ознакомиться со способами измерения температуры.

Задание

Определить погрешность значений температуры измеряемой на различных приборах.

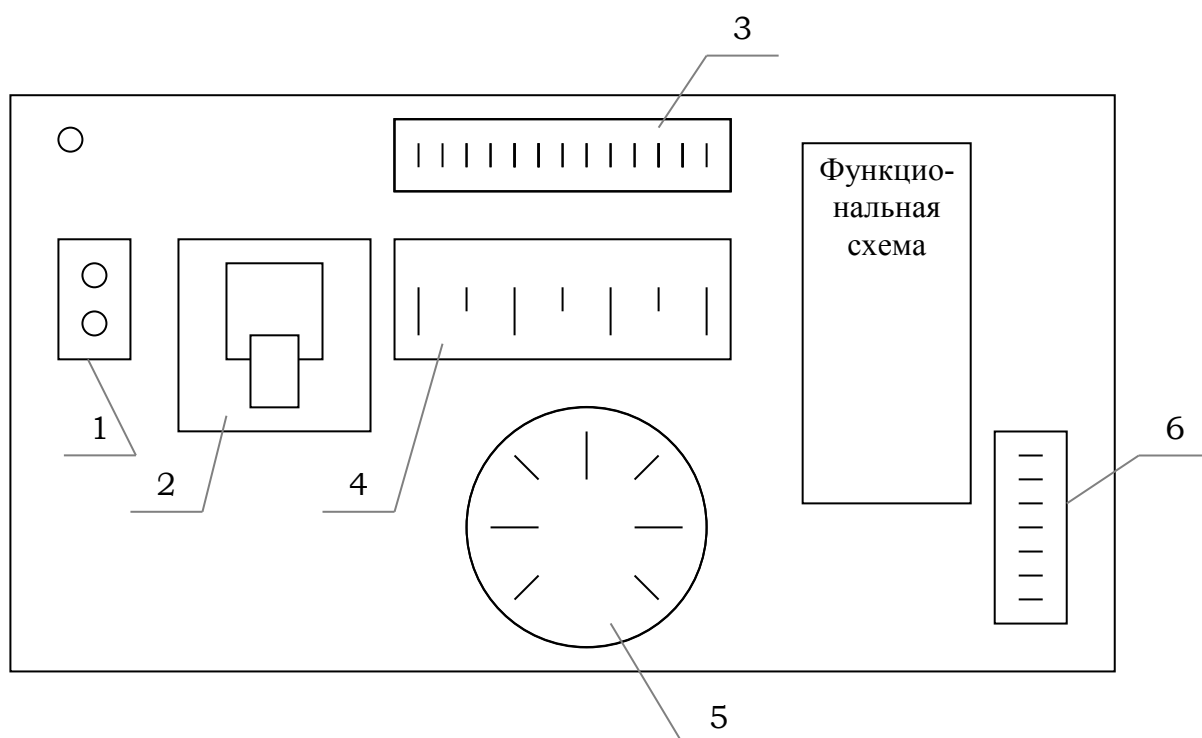


Рисунок 1.1- Лабораторный стенд

- 1 – включение нагревательных элементов;
- 2 – включение приборов;
- 3 – термопара;
- 4 – термометр сопротивления;
- 5 – манометрический термометр;
- 6 – ртутный термометр.

Оборудование

Измерение температуры осуществляется на установке, которая состоит: из круглого бака 8, наполненного жидкостью, электродвигателя с вертушкой (мешалки) 7, для перемешивания жидкости, двух нагревателей (ТЭН) 9, расположенных в днище, выключателей, контрольных лампочек, стеклянного ртутного

термометр 4, манометрического термометра 3, термопары 5 с милливольтметром МР-64, и термометра сопротивления 6 с блоком питания 4В и логометра (Ш-69000) 1.

Основные теоретические сведения

Состояние термодинамической системы однозначно характеризуется такими параметрами, как температура, давление, удельный объем. Они отражают макроскопические свойства системы и могут быть измерены непосредственно.

Температура – это термический потенциал тела, характеризующий интенсивность неупорядоченного теплового движения частиц и определяющий направление потока теплоты. Если температура двух тел, участвующих в теплообмене, не одинакова, то теплота всегда будет переходить от тела с большей температурой к менее нагретому телу. Для измерения температуры можно использовать зависимость различных физических свойств тел от их теплового состояния (температура), например расширение при нагревании, зависимость электрического сопротивления металла, от температуры, изменение интенсивности теплового излучения и т.д.

Единицей температуры в международной системе единиц СИ является Кельвин ($^{\circ}\text{K}$). Его величина равна $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды. Тройной точкой воды называют состояние, при котором равновесно существует твердая, жидкая и паровая фазы. Для воды оно соответствует температуре $0,01^{\circ}\text{C}$ и давлению $610,8 \text{ Па}$.

Основной платой для измерения температуры является термодинамическая температурная шкала (обозначается символом T , $^{\circ}\text{K}$).

Измерительные средства, у которых входной (измеряемой) величиной которых является температура, а выходной (выходным сигналом) может быть любая величина, однозначно зависящая от температуры, называют термометрами.

Термометр – это законченное измерительное устройство, представляющее собой конструктивный узел. По способу измерения различают контактные термометры и пирометры излучения. Контактные термометры делятся на: термометры расширения, термоэлектрические (термопары), термометры сопротивления.

Пирометры излучения подразделяются на: электрические, спектрального распределения (цветовые), специальных способов измерения температуры.

Термометры расширения. В термометрах расширения для измерения температуры используют тепловое расширение вещества жидкости, газа или твердого тела. В стеклянных термометрах расширения для определения температуры используется тепловое расширение специальной термодинамической жидкости. Жидкость заключена в тонкостенный резервуар, соединенный с капилляром, с которым связана температурная шкала. По конструктивному оформлению различают палочные термометры (например, обычный медицинский термометр) и термометры с вложенной внутрь стеклянной оболочки шкалой.

Проведем термодинамический анализ работы стеклянного термометра расширения. Напишем уравнение состояния (Клапейрона) для идеального газа:

$$PV = MRT \quad (1.1)$$

В левой части уравнения постоянным является давление, т.к. капилляр запаян и не связан с окружающим давлением. В правой части – постоянным являются масса рабочего тела термометра и его газовая постоянная. Таким образом, однозначному изменению объема рабочего тела в левой части соответствует однозначное изменение температуры в правой части уравнения. Стеклянные термометры расширения устанавливаются непосредственно в требуемом месте измерения температуры. Они не позволяют передавать показания температуры на расстояния. Жидкостные и газовые термометры применяют в лабораториях и промышленности для проверки (тарировки) и длительных измерений. Они обладают высокой степенью точности при измерениях температуры. Максимальная рабочая температура жидкостных, стеклянных термометров, изготовленных из кварцевого стекла до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

К недостаткам этих термометров следует отнести большую инерционность и невозможность автоматической записи показаний температуры. В качестве рабочей жидкости используется ртуть, метиловый и этиловый спирты, керосин, толуол, пентановую смесь и др. Для измерения до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ применяют специальные сплавы, например сплав талия.

У термометров со смачивающей жидкостью, свободное пространство капилляра заполняют осушенным и очищенным от кислорода инертным газом (азотом или аргоном), под давлением от $0,1$ до 7 МПа , в зависимости от измеряемой температуры.

В *манометрических термометрах*, которые относятся к термометрам расширения, металлический резервуар (термобаллон) 1 соединен металлической капиллярной трубкой 2 с упругим элементом (трубкой Бурдона) 3. Вся система заполняется

термодинамической жидкостью или газом (парами жидкости) (рис. 1.2).

Измерение температуры манометрическими термометрами осуществляется с помощью упругого чувствительного элемента, который преобразует давление рабочего тела, однозначно зависящее от изменения температуры, в перемещение указателя. Напишем уравнение Клапейрона $PV = MRT$.

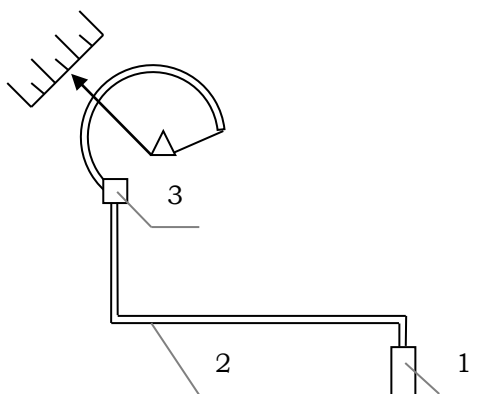


Рисунок 1.2- Манометрический термометр

- 1 – металлический резервуар (термобаллон);
- 2 – металлическая капиллярная трубка;
- 3 – упругий элемент (трубка Бурдона).

Постоянными величинами в этом уравнении являются объем V , масса рабочего тела M , газовая постоянная R . А переменными – давление P в левой части уравнения и ему однозначно соответствующее изменение температуры T в правой части того же уравнения.

Жидкостными манометрическими термометрами, заполненными ртутью, измеряют температуры от $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Давление в системе ртутных манометрических термометров составляют $8-10\text{ МПа}$.

Газовые манометрические термометры заполняют азотом или гелием под давлением $1,5-2\text{ МПа}$. Диапазон измеряемых температур от $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $550\text{ }^{\circ}\text{C}$. Критическая точка для азота равна -147°C , для гелия $-268\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Манометрические термометры благодаря большому усилию, развиваемому упругим элементом, высокой степени надежности и высокой чувствительности в конце шкалы широко используют для автоматического регулирования температуры.

Термоэлектрические термометры (термопары). В термометрических термопарах для измерения температуры используется в 1821 г. Зеебеком явление термоэлектричества (эффект Зеебека). Если два проводника из различных металлических ма-

териалов A и B соединены (спаяны) концами в замкнутый контур (рис. 1.3) и места соединений находятся при различных температурах t_1 и t_2 , то в контуре возникает электрический ток. Оба электропроводника, называемые термоэлектродами, образуют термопару. Одно из мест соединения, помещаемое в среду с измеряемой температурой, называют горячим спаем, второй, находящееся при постоянной известной температуре, называется холодным спаем. Для удобства измерений температуры с помощью термопар желательно, чтобы термоэлектродвижущая сила (т-ЭДС) была достаточно большой, и чтобы электросопротивление термопары было не слишком высоким. В этом случае можно измерить температуру без особых дополнительных устройств таких, как усилитель, а также на достаточно большом расстоянии термопары от измерительного прибора. Кроме того, характеристика термопары должна быть линейной, а диапазон применения термопары возможно более широким. Материалы для термопар должны иметь, возможно, более высокую точку плавления и стабильное качество. В материале термоэлектродов в рабочем диапазоне температур не должно происходить аллотропических превращений, вызывающих скачкообразных изменения т-ЭДС.

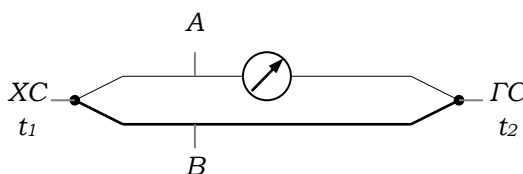


Рисунок 1.3- Термоэлектрический термометр
 ГС – горячий спай;
 ХС – холодный спай;
 А, В – проводники из различных материалов.

Температура $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ холодного спая подчеркивается с помощью тающего льда, помещенного в сосуд Дюара, или электрическим способом, например с помощью прибора «0-термостат».

Ниже приводятся типы термопар и рекомендуемые диапазоны измерений температур.

Таблица 1.1- Типы термопар

Тип термопар	Материал	Пределы измерения, $^{\circ}\text{C}$
ТХА	Хромель-алюмель	-50 – + 1300
ТХК	Хромель-копель	-50 – + 800
ТМК	Медь-константан	- 200 – + 400

ТЖК	Железо-константан	- 200 – + 1000
ТЗС	Золото-серебро	+2,5 – + 20

Термометры сопротивления (рис. 1.4). Для измерения температуры используется явление изменения электрического сопротивления металлов электролитов и полупроводников в зависимости от температуры.

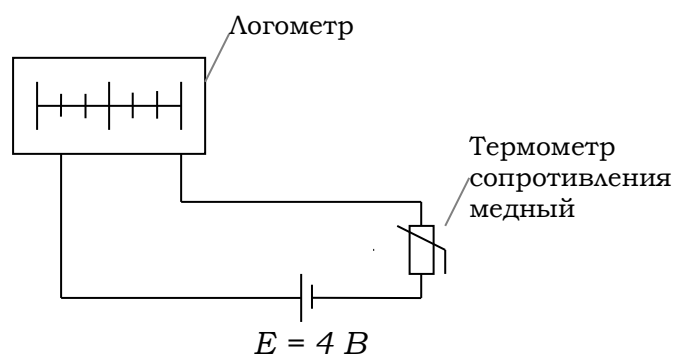


Рисунок 1.4- Термометр сопротивления

Термометры сопротивления отличаются, прежде всего, высокой точностью измерений (можно получить погрешность не более $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$) и тем, что при использовании гальванометра с помощью простых схем без добавочных измерительных преобразователей можно легко получить малый диапазон измерений с началом шкалы в любой точке. Однако при измерении термометрами сопротивления требуется вспомогательный источник постоянного напряжения 4В .

В качестве материалов для термометров сопротивления пригодны только те, физические и химические свойства которых не изменяются с течением времени в измеряемом диапазоне температур.

Сопротивление материала должно хорошо воспроизводиться и с изменением температуры монотонно снижаться или повышаться. Кроме того, внешние воздействия, такие, как давление, влажность и коррозии, а также деформация и структурные изменения в точках превращения не должны оказывать влияния на сопротивление термометра. Всем этим требованиям больше всего соответствует платина.

Полупроводники также используются для изготовления термометров сопротивления, т.к. сопротивление полупроводников при изменении температуры изменяется значительно больше, чем металлов.

Опытная установка

Измерение температуры осуществляется на установке, которая состоит из круглого бака, наполненного жидкостью 8, электродвигателя с вертушкой (мешалки) 7 для перемешивания жидкости двух нагревателей (ТЭН) 9, расположенных в днище; выключателей, контрольных лампочек, стеклянного ртутного термометра 4, манометрического термометра 3, термопары 5 с милливольтметром МР-64, и термометра сопротивления 6 с блоком питания 4 В и логометром Ш-69000.

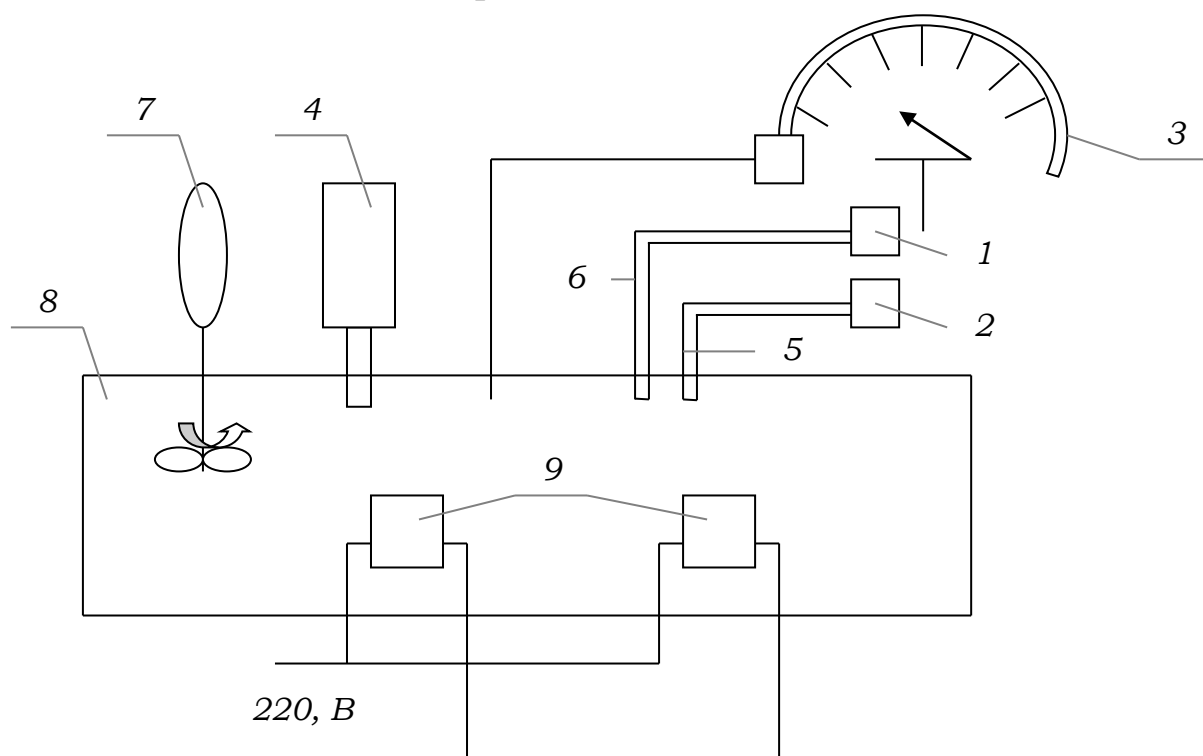


Рисунок 1.5- Схема установки для измерения температуры

Порядок выполнения работы

Включить нагревательные элементы и приборы. Найти на щите стеклянный ртутный термометр, манометрический термометр, милливольтметр, логометр (термометр сопротивления).

Самым точным является стеклянный термометр – он будет контрольным. При измерении разными термометрами возникает дополнительная (инструментальная) погрешность, вызванная различным температурным полем возле датчиков при нагреве,

различным погружением датчиков в измеряемую жидкость, изменяющейся температурой окружающего бак воздуха – холодный спай термопары.

В процессе нагрева жидкости снимаем показания всех термометров при достижении стеклянным термометром температур 30 °С, 40 °С, 50 °С, 60 °С, 70 °С.

Обработка результатов измерений

Данные измерений заносим в таблицу 1.2.

Таблица 1.2- Данные измерений

№ n/n	Показания термометров и абсолютная погрешность							Средняя абсолютная погрешность
	Контрольный	Термометр сопротивления		Манометрический термометр		Термопара		
	Измеряемая температура, А, °С	Температура, А ₁ , °С	Погрешность, ΔА ₁	Температура, А ₂ , °С	Погрешность, ΔА ₂	Температура, А ₃ , °С	Погрешность, ΔА ₃	
1.	30							
2.	40							
3.	50							
4.	60							
5.	70							

Расчет абсолютной погрешности

За действительное значение принимаем показания стеклянного термометра – А, °С; А_{изм} – температура измеренная различными термометрами, °С

$$\Delta A = \frac{A_{изм} - A}{A}, \quad (1.2)$$

где - ΔА – абсолютная погрешность,

Средняя абсолютная погрешность $\frac{\Delta A_1 + \Delta A_2 + \Delta A_3}{3}$,

Расчет погрешности для термометра сопротивления

ΔА₁ =

Расчет погрешности для манометрического термометра

ΔА₂ =

Расчет погрешности для термопары

ΔА₃ =

Расчет абсолютной погрешности для $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Содержание отчета

1. Тема.
2. Цель работы.
3. Задание.
4. Схема установки и краткое описание различных термометров.
5. Занести полученные опытные данные в табл.1.2.
6. Определить абсолютную и среднюю абсолютную погрешность и занести полученные расчетные данные в таблицу 1.2.
7. Вывод.
8. Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Определение температуры. Какая величина принимается за единицу температуры СИ?
2. Расскажите о классификации термометров, по способу измерения температуры.
3. Объясните работу стеклянного термометра расширения с термодинамической точки зрения, пределы измерения температуры.
4. Объясните работу манометрического термометра с термодинамической точки зрения, пределы измерения температуры.
5. Объясните работу термопары, пределы измерения температуры.

Лабораторная работа 2 (2ч.)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ K АДИАБАТЫ ДЛЯ ВОЗДУХА

Цель работы

Закрепление знаний по разделу «Термодинамические процессы идеальных газов».

Задание

На опытной установке осуществить адиабатный и изохорный процессы: затем, воспользовавшись термодинамическими выражениями, определить показатель адиабаты K для воздуха.

Описание лабораторного стенда

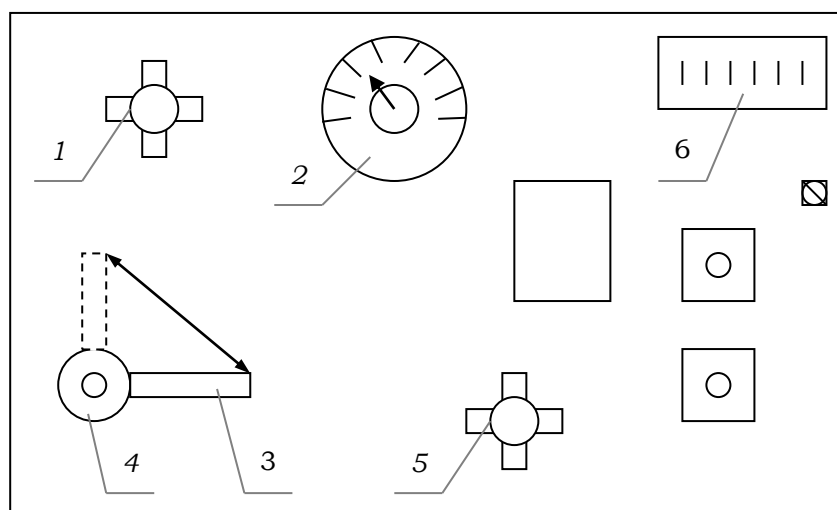


Рисунок 2.1- Лабораторный стенд

- 1 – вспомогательный кран, регулирующий давление;
- 2 – давление воздуха;
- 3 – ручка крана;
- 4 – кран выпуска воздуха;
- 5 – вентиль подачи воздуха;
- 6 – температура воздуха.

Основные теоретические сведения

Адиабатным называется процесс, который протекает без теплообмена с окружающей средой. Уравнение адиабатного процесса связывает давление, удельный объем и показатель адиабаты:

$$K = \frac{C_P}{C_V}; p \cdot V^K = const \quad (2.1)$$

Напишем уравнение адиабаты для двух состояний: начального и конечного:

$$p_1 V_1^K = p_2 V_2^K. \quad (2.2)$$

Откуда после небольших преобразований найдем:

$$K = \frac{\lg\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}{\lg\left(\frac{V_1}{V_2}\right)} \quad (2.3)$$

Определять по этому выражению показатель адиабаты K нецелесообразно, т.к. весьма затруднительно произвести точное измерение удельного объема V_2 в конце адиабатного процесса 1-2.

Для определения показателя адиабаты K необходимо заменить отношение удельных объемов $\frac{V_1}{V_2}$ отношением давлений, которые легко можно измерить.

Адиабатный и изотермический процессы расширения газа в координатах p - V имеют вид представленный на рис. 2.2.

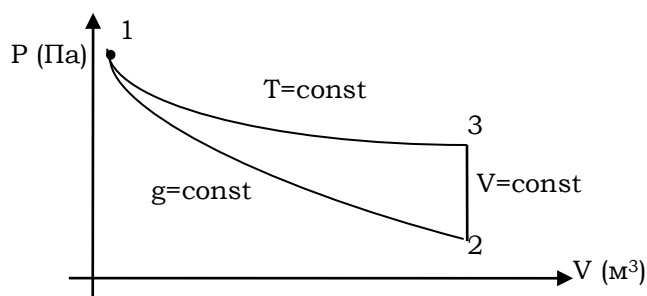


Рисунок 2.2- Адиабатный и изотермический процессы

После адиабатного процесса 1-2 сразу же осуществляется изохорный процесс 2-3. В состояниях 1, 3 температуры равны между собой и равны температуре окружающей среды, т.е. температуре в лаборатории. В изохорном процессе $V = const$, $V_2 = V_3$.

В изотермическом $pV = const$, $p_1 V_1 = p_3 V_3$ или $\frac{V_1}{V_3} = \frac{p_3}{p_1}$. Заменяя

удельный объем $V_3 = V_2$, получим $\frac{V_1}{V_3} = \frac{p_3}{p_1}$.

Выражение для определения показателя адиабаты K окончательно примет вид

$$K = \frac{\lg\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}{\lg\left(\frac{p_3}{p_1}\right)} \quad (2.4)$$

Таким образом, если измерить давление в начале и конце адиабатного процесса 1-2 и конце изохорного процесса 2-3, то можно вычислить показатель адиабаты K .

Опытная установка

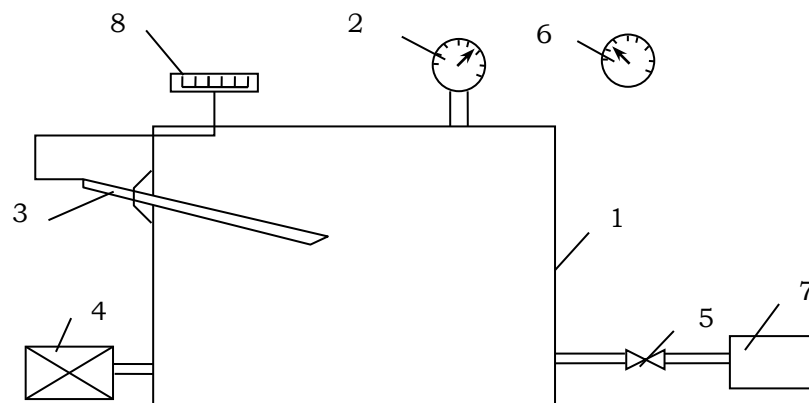


Рисунок 2.3- Функциональная схема

- 1 – металлический сосуд для воздуха;
- 2 – манометр МО;
- 3 – датчик температуры ТСМ *гр.23*;
- 4 – кран быстрого выпуска воздуха;
- 5 – вентиль подачи воздуха в сосуд;
- 6 – барометр давления окружающей среды;
- 7 – логометр измерения температуры воздуха в сосуде А-64;
- 8 – компрессор СО-7Б.

Опытная установка состоит из металлического сосуда 1, испытанного избыточным давлением $3 \cdot 10^5$ Па, манометра 2; барометра 6; термометра 3; управляемого крана 4; вентиля 5; компрессора 7, подающего на установку сжатый воздух (рис 2.3) с максимальным давлением 80 кПа. Вентилем 5 прекращается подача воздуха в сосуд. Путем выпуска через кран 4 осуществляется быстрый сброс давления.

Порядок выполнения работы

1. Открыть вентиль 5.
2. Кран 4 плотно закрыть.

3. Включить электродвигатель компрессора и создать в сосуде 1 максимально возможное давление – 80 кПа. При этом воздух в сосуде будет сжиматься. Температура воздуха в результате сжатия повысится, о чем можно судить по показаниям термометра 3.

4. Отключить компрессор, закрыть вентиль 5. Выждать пять минут, пока установится тепловое равновесие между воздухом в сосуде 1 и окружающей средой, об этом будет свидетельствовать стабилизация показаний давления манометра 2.

5. Быстро открыв кран 4 сбросить давление в сосуде до 0. При этом в сосуде ввиду скоротечности процесса будет осуществляться адиабатное расширение воздуха.

6. Снова быстро закрыть кран 4. В сосуде 1 будет протекать изохорный процесс 2-3 нагнетания воздуха за счет нагревания от температуры окружающего воздуха. Окончание изохорного процесса зафиксирует показание манометра 2. Понижение температуры воздуха в сосуде происходит в результате адиабатного расширения. Уравнение первого закона термодинамики $Q = dU + dl$ или $Q = C_v dT + dl$. Термодинамическая работа увеличивается, т.к. при расширении воздух совершает работу. В термодинамическом адиабатном процессе (без теплообмена с окружающей средой) положительная термодинамическая работа dl совершается за счет уменьшения внутренней энергии рабочего тела dU .

Внутренняя энергия рабочего тела при постоянной изохорной теплоемкости может уменьшаться только за счет уменьшения абсолютной температуры рабочего тела T , а следовательно и t .

Выполнив пункты 1 – 6, получим одну точку. В лабораторной работе необходимо провести пять опытов, данные занести в таблицу 2.1. Опыты провести на давлениях примерно – 80 кПа, 70 кПа, 60 кПа, 50 кПа, 40 кПа.

Таблица 2.1- Данные результатов измерений

№ замеров	$P_{изб1},$ Па	$P_{изб2},$ Па	$P_{изб3},$ Па	$P_1,$ Па	$P_2,$ Па	$P_3,$ Па	K	K_{CP}
1.								
2.								
3.								
4.								
5.								

Обработка результатов измерений

Давление в точках 1, 2, 3 процессов 1-2 адиабатного, 2-3 изохорного подсчитать по следующим выражениям.

Точка 1. Абсолютное давление, Па

$$P_1 = P_{изб1} + P_{бар}, \quad (2.5)$$

где $P_{изб1}$ – избыточное давление, Па, замеряемое по манометру 2;

$P_{бар}$ – барометрическое давление, Па, по барометру 6.

Точка 2. Абсолютное давление, Па

$$P_2 = P_{изб2} + P_{бар}, \quad (2.6)$$

где $P_{изб2} = 0$, т.к. в этой точке внутренний объем сосуда сообщается с атмосферой;

$P_{бар}$, Па.

Точка 3. Абсолютное давление, Па

$$P_3 = P_{изб3} + P_{бар}, \quad (2.7)$$

где $P_{изб3}$ – избыточное давление, Па, замеряемое по манометру 2;

$P_{бар}$, Па.

Посчитать для каждого из десяти опытов при различных давлениях в *т. 1* значения показателя адиабатного процесса K . Данные занести в таблицу 2.1. Определить среднее значение K_{CP} .

Определить относительную погрешность определения K_{CP} по отношению к теоретическому значению K для воздуха.

$$K = \frac{C_P}{C_V} = \frac{0,240}{0,172} = 1,4 \text{ по выражению в \%} \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_{K_{CP}} = \frac{K - K_{CP}}{K} \cdot 100\% \quad (2.9)$$

Содержание отчета

1. Тема.
2. Цель работы.
3. Задание.
4. Схема и описание опытной установки.
5. В отчет включить: изображение процессов 1-2 адиабатного, 2-3 изохорного и 1-3 изотермического в координатах p - V (рис.2.2); подсчет относительной погрешности определения показателя адиабатного процесса для воздуха.
6. Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Какой процесс называется адиабатным? Напишите уравнение адиабатного процесса.
2. При каких условиях в реальном опыте можно считать процесс адиабатным?
3. Объясните причину понижения температуры воздуха в адиабатном процессе расширения (показать аналитически).
4. Чему равен показатель адиабатного процесса для воздуха, продуктов сгорания двигателей внутреннего сгорания?
5. Изобразите в координатах p - V ; T - S (из одной общей точки) сжатие в адиабатном и изотермическом процессах.

Лабораторная работа 3 (2ч.)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССОВОЙ ИЗОБАРНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОДЫ

Цель работы

Закрепить знания по разделу «Теплоемкость идеальных газов».

Задание

1) Определить экспериментально среднюю массовую изобарную теплоемкость воды при нагревании от t_1 до t_2 °C ($C_{pm \text{ фак}}$).

2) Определить среднюю массовую изобарную теплоемкость воды при нагревании от t_1 до t_2 °C ($C_{pm \text{ таб}}$) с помощью справочников. Аналогичным способом вычислить среднюю объемную изобарную теплоемкость воды ($C'_{pm \text{ таб}}$).

3) Сравнить полученные опытные данные с табличными, и определить относительную погрешность определения фактической теплоемкости по отношению к табличной.

Основные теоретические сведения

Теплоемкость или удельной теплоемкостью называется количество теплоты, которое необходимо сообщить единице количества газа при его нагревании на 1 °C в данном процессе.

В зависимости от единицы количества газа теплоемкости могут быть массовые – $C \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}} \right]$, объемные – $C' \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{K}} \right]$ и молярные $\mu C \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{K}} \right]$.

Теплоемкость газа в изохорном процессе ($\nu = \text{const}$) называется изохорной, и соответственно обозначается: C_ν , C'_ν , μC_ν .

Теплоемкость газа в изобарном процессе ($p = \text{const}$) называется изобарной и соответственно обозначается: C_p , C'_p , μC_p .

Соотношение между изобарной и изохорной теплоемкостями можно описать уравнением Майера:

$$C_p = C_\nu + R, \quad (3.1)$$

где R – газовая постоянная, $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}} \right]$, определяемая по таблицам справочников для каждого газа.

По средним значениям массовых теплоемкостей можно определить количество теплоты, подводимой к 1 кг газа в интервале температур:

$$\text{от } 0 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ до } t_1: \quad q_1 = C \int_0^{t_1} dt \quad (3.2)$$

$$\text{от } 0 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ до } t_2 \quad q_2 = C \int_0^{t_2} dt \quad (3.3)$$

Средняя массовая изобарная теплоемкость в интервале температур от t_1 до t_2 определяется по выражению:

$$C_p \int_{t_1}^{t_2} dt = \frac{q_2 - q_1}{t_2 - t_1} = \frac{C \int_0^{t_2} dt - C \int_0^{t_1} dt}{t_2 - t_1} \quad (3.4)$$

Если в процессе участвует M кг газа, или V_H , м^3 , то количество тепла необходимое для их нагрева определяется из выражения:

$$Q_p = MC_{pm}(t_2 - t_1) = V_H C'_{pm}(t_2 - t_1) \quad (3.5)$$

Опытная установка

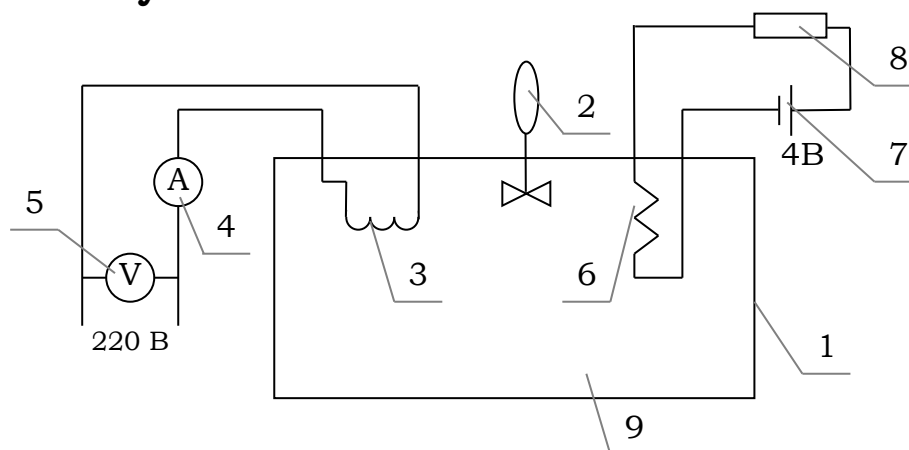


Рисунок 3.1- Функциональная схема

- 1 – термостат $V = 12$ л;
- 2 – мешалка электродвигателя АОЛО 12-1500 об/мин,
 $P = 80$ Вт;
- 3 – электронагреватели ТЭН-200-1,5 кВт;
- 4 – амперметр Э365-1, 0-10 А, переменный ток;
- 5 – вольтметр Э8030, 0-250 В;
- 6 – термометр сопротивления ТСМ50, 0-100°С;
- 7 – блок питания СВ-4, $U = 4$ В;
- 8 – логометр Ш69000, 0-100 °С;
- 9 – вода.

Опытная установка (рис. 3.1) состоит из термостата (1), заполняемого водой; двух нагревателей (3) внутри термостата; логометра (8) с блоками питания (7); термопреобразователя сопротивления (6) и миксера (2).

Мощность нагревателей определяется по показаниям амперметра (4) и вольтметра (5). Температура воды в термостате регистрируется по показаниям логометра (8). Чтобы температура воды во всем объеме термостата была одинаковой, воду перемешивают миксером. Интервалы определения температуры фиксируются секундомером.

Порядок выполнения работы

1. Включить миксер. Через 5 минут записать начальную температуру воды $t^{\circ}\text{C}$, затем включить нагреватель и по секундомеру зафиксировать начальный момент отсчета времени τ_1 .

В дальнейшем через каждые 10°C нагрева воды, что контролируется по логометру одновременно записывать: температуру воды $t^{\circ}\text{C}$, время нагревания τ , с; силу тока I , А; напряжение U , В. Нагрев воды осуществлять до температуры $70-80^{\circ}\text{C}$. Данные опыта занести в табл. 3.1.

Обработка результатов измерений

Таблица 3.1- Результаты измерений

№ замера	$t_1, ^{\circ}\text{C}$	$t_2, ^{\circ}\text{C}$	I, A	U, B	$P, \text{кВт}$	$Q, \text{кДж}$	$\tau, \text{с}$
1.							
2.							
3.							
4.							

Измеренные в каждом опыте величины заносим в табл. 3.1.

2. Определяем массу воды в термостате, занимающую объем $V_{тер} = 20 \text{ л}$ по формуле:

$$m_{тер} = V_{тер} \cdot \rho, \text{ кг} \quad (3.6)$$

где ρ – плотность воды при температуре $t^{\circ}\text{C}$, определяем по таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Плотность воды при атмосферном давлении

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$0 \text{ }^\circ\text{C}$	$4 \text{ }^\circ\text{C}$	$10 \text{ }^\circ\text{C}$	$20 \text{ }^\circ\text{C}$	$30 \text{ }^\circ\text{C}$	$40 \text{ }^\circ\text{C}$	$50 \text{ }^\circ\text{C}$	$60 \text{ }^\circ\text{C}$
$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	999,82	1000,0	999,73	998,23	995,67	992,24	988,07	983,24

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$70 \text{ }^\circ\text{C}$	$80 \text{ }^\circ\text{C}$	$90 \text{ }^\circ\text{C}$	$100 \text{ }^\circ\text{C}$
$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	977,81	971,83	965,34	958,38

3. Определяем мощность электронагревателя, кВт:

$$\rho = 10^{-3} \cdot I \cdot U \quad (3.7)$$

$$\rho_1 = 10^{-3} \cdot I_1 \cdot U_1 \quad [\text{кВт}] \quad \rho_2 = 10^{-3} \cdot I_2 \cdot U_2 \quad [\text{кВт}]$$

$$\rho_3 = 10^{-3} \cdot I_3 \cdot U_3 \quad [\text{кВт}] \quad \rho_4 = 10^{-3} \cdot I_4 \cdot U_4 \quad [\text{кВт}]$$

4. Определяем количество теплоты, кДж, переданной нагревателями воде:

$$Q = P \cdot \tau \quad (3.8)$$

$$Q_1 = P_1 \cdot \tau_1 \quad [\text{кДж}] \quad Q_2 = P_2 \cdot \tau_2 \quad [\text{кДж}]$$

$$Q_3 = P_3 \cdot \tau_3 \quad [\text{кДж}] \quad Q_4 = P_4 \cdot \tau_4 \quad [\text{кДж}]$$

5. Определяем средние значения экспериментальных данных и заносим в табл. 3.3.

Таблица 3.3- Значения экспериментальных данных

$t_2, \text{ }^\circ\text{C}$	$I_{\text{ср}}, \text{ A}$	$U_{\text{ср}}, \text{ B}$	$P_{\text{ср}}, \text{ кВт}$	$Q_{\text{ср}}, \text{ кДж}$	$\sum_{i=1}^{i=4} \tau, \text{ c}$	$m, \text{ кг}$

$\sum_{i=1}^{i=4} \tau, \text{ c}$ – суммарное время нагревания воды от t_1 до t_2 .

t_2 – температура воды в конце последнего замера, $^\circ\text{C}$.

$t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ – температура воды в начале первого замера.

6. Определяем среднюю массовую изобарную теплоемкость воды используя экспериментальные данные:

$$C_{\text{рт фак.}} \int_{t_1}^{t_2} = \frac{Q_{\text{ср}}}{m(t_2 - t_1)} \quad \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг K}} \right] \quad (3.9)$$

7. Определяем среднюю массовую изобарную теплоемкость воды при нагревании от t_1 до t_2 , используя таблицы справочников:

$$C_{pm \text{ таб.}} \int_{t_1}^{t_2} = \frac{C_{pm} \int_0^{t_2} - C_{pm} \int_0^{t_1}}{t_2 - t_1} \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right], \quad (3.10)$$

где $C_{pm} \int_0^{t_2}$ – средняя массовая изобарная теплоемкость при температуре t_2 °С, определяемая по таблице П-1;

$C_{pm} \int_0^{t_1}$ – средняя массовая изобарная теплоемкость при температуре t_1 °С, определяемая по таблице П-1.

8. Определяем относительную погрешность средней массовой изобарной теплоемкости фактической к табличной.

$$E_{cp} = \frac{C_{pm \text{ таб.}} - C_{pm \text{ фак.}}}{C_{pm \text{ таб.}}} \cdot 100\% \quad (3.11)$$

9. Определяем среднюю объемную теплоемкость воды при нагревании от t_1 до t_2 , используя таблицы справочников:

$$C'_{pm \text{ таб.}} \int_{t_1}^{t_2} = \frac{C'_{pm} \int_0^{t_2} - C'_{pm} \int_0^{t_1}}{t_2 - t_1}, \quad (3.12)$$

где $C'_{pm} \int_0^{t_2}$ – средняя объемная теплоемкость воды при температуре t_2 °С, определяемая по таблице П-3;

$C'_{pm} \int_0^{t_1}$ – средняя объемная теплоемкость воды при температуре t_1 °С, определяемая по таблице П-3.

Вывод

Как изменяется теплоемкость воды с увеличением температуры? Сравнить значения массовой и объемной теплоемкостей, вычисленных по таблицам с фактическими (экспериментальными).

Содержание отчета

1. Тема.
2. Цель работы.
3. Задание.
4. Схема и описание опытной установки.
5. Занести полученные опытные данные в табл. 3.1. Затем в табл. 3.3.
6. Определить значения фактической теплоемкости и табличной.
7. Определить относительную погрешность.
8. Вывод.
9. Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Дать определение теплоемкости.
2. Дать определение истинной и средней теплоемкости.
3. Какая теплоемкость называется изохорной?
4. Какая теплоемкость называется изобарной?
5. Дать определение линейной и нелинейной теплоемкости.
6. Как изменяется значение теплоемкости при увеличении температуры?
7. Какое выражение устанавливает зависимость между массовой, мольной и объемной теплоемкостями?
8. Какое выражение устанавливает зависимость между изобарной и изохорной теплоемкостями.

Лабораторная работа 4 (4 ч.)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕНЦИИ

Цель работы. Закрепление знаний по разделам «Конвективный теплообмен», «Теплообмен излучением», «Основы теории подобия», получение навыков опытного исследования теплоотдачи при свободном движении воздуха и обобщение данных эксперимента с помощью чисел подобия.

Задание. Определить значение коэффициента теплоотдачи при конвективном теплообмене, используя опытные данные.

Теоретические основы

В газообразной и жидкой средах с неоднородным распределением температуры благодаря некоторым физическим свойствам (например, слабое взаимодействие между молекулами и др.) всегда возникает макроскопическое перемещение элементов среды, сопровождающееся переносом теплоты. Такой теплоперенос называется конвективным, или молярным. В указанной системе также имеет место молекулярный перенос (теплопроводность) посредством теплового движения микрочастиц. Теплообмен, обусловленный совместным действием конвективного и молекулярного переноса теплоты, называется конвективным теплообменом. Наиболее распространенным случаем конвективного теплообмена является теплообмен между поверхностью твердого (жидкого) тела и движущейся средой при их непосредственном соприкосновении называемый теплоотдачей.

В стационарном режиме для бесконечно длинной цилиндрической трубы тепловой Баланс можно представить уравнением:

$$Q = Q_{\text{к}} + Q_{\text{л}}, \quad (5.1)$$

где Q – теплота, отданная поверхностью трубы;

$Q_{\text{к}}$ – теплота, передаваемая конвекцией (конвективный теплоперенос);

$Q_{\text{л}}$ – теплота, передаваемая лучеиспусканием.

По выражению (5.1) найдем теплоту, передаваемую конвекцией, Вт

$$Q_{\text{к}} = Q - Q_{\text{л}} \quad (5.2)$$

Количество теплоты, передаваемое при теплоотдаче от поверхности тела (трубы) к среде (воздуху), определяется формулой Ньютона, Вт

$$Q_K = \alpha \cdot F \cdot (T_{II} - T_B) \quad (5.3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$ (искомая величина в данной работе);

F – теплоотдающая поверхность трубы, м^2 ;

T_{II} – температура поверхности трубы, К ;

T_B – температура окружающего воздуха в удалении от теплоотдающей поверхности трубы, К .

Теплота, передаваемая лучеиспусканием с поверхности трубы, определяется уравнением, являющимся видоизмененным выражением закона Стефана-Больцмана:

$$Q_{\Lambda} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot F \left[\left(\frac{T_{II}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_B}{100} \right)^4 \right] \quad (5.4)$$

где ε – степень черноты поверхности трубы, $\varepsilon = 0,33$ для технического листового алюминия;

C_0 – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела,

$$C_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}^4}.$$

Используя выражения (5.2; 5.3; 5.4) найдем опытный коэффициент теплоотдачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$

$$\alpha = \frac{Q - C_0 F \varepsilon \left[\left(\frac{T_{II}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_B}{100} \right)^4 \right]}{F(T_{II} - T_B)} \quad (5.5)$$

где Q – теплота, отданная поверхностью трубы, равна количеству теплоты, выделяемой электрическим нагревателем внутри трубы.

Зависимость (5.5) положена в основу опытного определения коэффициента теплоотдачи конвекцией от поверхности горизонтальной трубы при свободном движении воздуха для заданного барометрического давления.

Опытные данные обрабатываются в форме уравнений подобия, представляющих собой степенную зависимость между числами подобия.

Числами подобия называются безразмерные степенные комплексы, составленные из величин, существенных для данного процесса.

Для конвективного теплообмена в условиях свободного движения воздуха для горизонтальных труб диаметром d при ламинарном режиме, уравнение подобия имеет вид

$$N_{\text{u}} = 0,5(\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0,25} \quad (5.6)$$

И справедливо при условии

$$10^3 < (\text{Gr} \cdot \text{Pr}) < 10^8$$

В уравнении (5.6) числа подобия имеют следующие значения:

Число Нуссельта – характеризует интенсивность теплообмена между твердым телом и средой

$$N_{\text{u}} = \alpha_{\text{p}} \frac{d}{\lambda_{\text{в}}} \quad (5.7)$$

где α_{p} – расчетный коэффициент теплоотдачи;

d – характерный размер теплоотдающей поверхности (наружный диаметр трубы), м;

$\lambda_{\text{в}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, определяем по таблице 5.2 по $t_{\text{в}}$, $^{\circ}\text{C}$.

Число Грасгофа – устанавливает подобие при свободном движении воздуха, обусловленного различием плотности, причем причиной отмеченной неоднородности является температурное поле

$$\text{Gr} = \beta \frac{g \cdot d^3}{\nu_{\text{в}}} (T_{\text{п}} - T_{\text{в}}) \quad (5.8)$$

где β – коэффициент объемного расширения для воздуха

$$\beta = \frac{1}{T_{\text{в}}} = \frac{1}{273 + t_{\text{в}}} \text{ K}^{-1};$$

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

d – наружный диаметр трубы, м;

$\nu_{\text{в}}$ – коэффициент кинематической вязкости воздуха при температуре $T_{\text{в}}$, $\text{м}^2/\text{с}$;

$T_{\text{в}}$ – температура окружающего воздуха, К.

Число Прандтля – определяет физические свойства среды

через коэффициент кинематической вязкости и коэффициент температуропроводности a

$$P_r = \frac{\nu_B}{a} \quad (5.9)$$

По уравнениям (5.6; 5.7) находим расчетный коэффициент теплоотдачи $\alpha_P, \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$.

$$\alpha_P = \frac{0,5(G_r \cdot P_r)^{0,25} \cdot \lambda_B}{d} = \frac{0,5 \cdot \lambda_B}{d} \cdot \left[\beta \frac{gd^3 \cdot \lambda_B}{\nu_B} (T_{Пср} - T_B) \right]^{0,25} \cdot P_r^{0,25} \quad (5.10)$$

Оборудование. Лабораторный стенд, барометр.

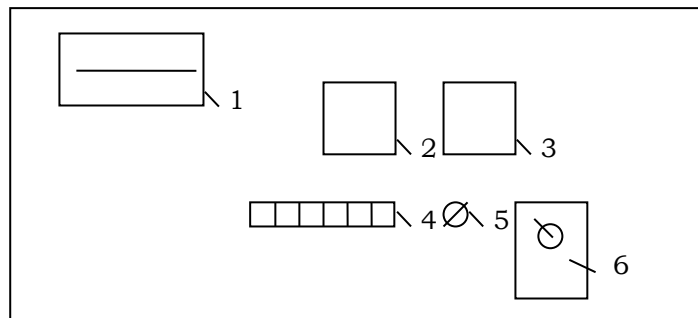


Рисунок 5.1 - Общий вид стенда

1. Милливольтметр марки М-64 (класс точности 1,5).
2. Вольтметр электромагнитный марки Э-8030 (класс 2,5) (пределы 30/100 В).
3. Амперметр Э-421, (класс 2,5) (от 1 до 5 А).
4. Переключатель ступеней.
5. Переключатель режимов (I режим / II режим).
6. Сеть (автоматическое включение).

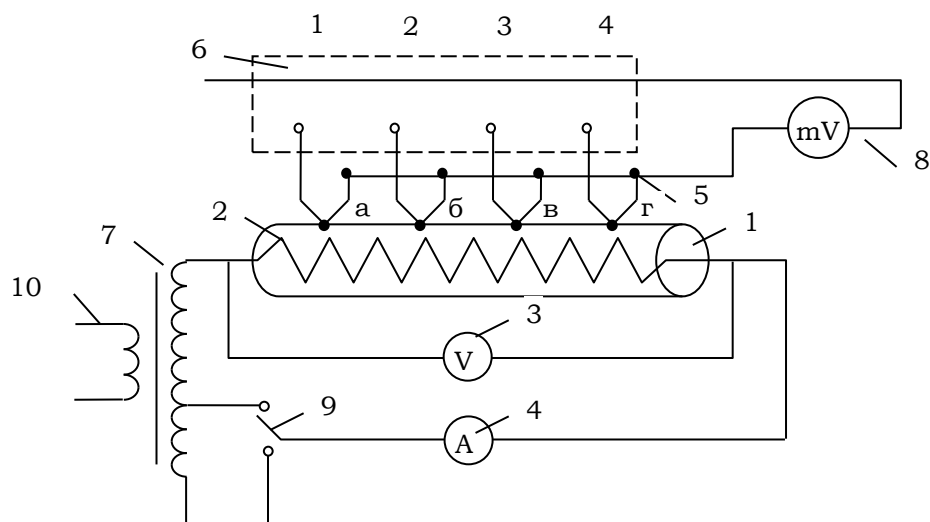


Рисунок 5.2- Функциональная схема установки

1. Труба алюминиевая $l = 0,85$ м, $d = 0,03$ м.
2. Электронагреватель ТЭН – 220 – 0,5.
3. Вольтметр Э8030, 0 – 100 В.
4. Амперметр Э421, 0 – 5 А.
5. Термопары ТМП, $t = 0 - 160$ °С.
6. Переключатель ступеней ПКУ-3, 220 В, 10 А.
7. Трансформатор ОСМ-0,63, 220 В, 630 Вт.
8. Милливольтметр М-64, $t = 30 - 150$ °С.
9. Переключатель режимов ПК- 5 ступеней.
10. Автомат включения установки АБЗМ, 4 А.

Порядок выполнения работы

1. Включите автомат «Сеть» установки за 30 минут до начала опыта для достижения установившегося режима.
2. Переключатель режимов поставить в 1 положение.
3. Через 30 минут снять показания: барометра, вольтметра, амперметра, температуры окружающего воздуха.
 - 3.1. Включить переключатель ступеней в положение 1 снять показания температуры по милливольтметру в точке а.
 - 3.2. Включить переключатель ступеней на 2 ступень, снять показания температуры в точке б.
 - 3.3. Включить переключатель ступеней на 3 ступень, снять показания в точке в.
 - 3.4. Включить переключатель ступеней на 4 ступень, снять показания в точке г.

4. Через 5 минут повторить измерения по пунктам 3, 3.2, 3.3,3.4.

5. Через 5 минут снова снять показания по пунктам 3, 3.2, 3.3,3.4.

6. Все кнопки переключателя ступеней отжать, выключить установку.

7. Результаты измерений занести в таблицу 5.1, найдя средние значения.

Таблица 5.1 - Результаты измерений

№ замера	Измеряемые параметры								
	Р _Б , Па	I, А	U, В	Температура окружающего воздуха t _в , °С	Температура поверхности трубы в точках t _п , °С				t _{пер} , °С
					а	б	в	г	
1.									
2.									
3.									
Среднее значение									

Обработка результатов измерений

1. Тепловая мощность, Вт, подводимая к рабочему участку поверхности трубы через электрический нагреватель

$$Q = IU \frac{l_p}{l}$$

2. Теплоотдающая поверхность рабочего участка трубы, м²

$$F = \pi d l_p$$

где d = 0,03 м, l = 0,45 м.

3. Теплота, передаваемая лучеиспусканием с поверхности трубы

$$Q_{\Lambda} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot F \left[\left(\frac{T_{\Pi}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{В}}}{100} \right)^4 \right]$$

где $C_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$ – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела;

$\varepsilon = 0,09$ – степень черноты алюминия;

$T_B = 273 + t_B$, °K – температура окружающего воздуха в удалении от поверхности трубы;

$T_{\Pi} = 273 + t_{\Pi}$, °K – средняя температура поверхности трубы.

4. Коэффициент теплоотдачи α на основании опытных данных по усредненным значениям измеренных величин определяют из выражения 5.5.

5. Значение расчетного коэффициента теплоотдачи α_P определяют по выражению 5.10. Необходимые данные берут из таблицы 5.2.

6. Подсчитать абсолютную и относительную погрешности определения коэффициента теплоотдачи α :

$$\alpha_{\text{АБС}} = \alpha - \alpha_P, \quad \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}} \right)$$

$$\alpha_{\text{ОТН}} = \frac{\alpha - \alpha_P}{\alpha} \cdot 100, \quad (\%)$$

Таблица 5.2 - Физические параметры сухого воздуха при давлении $1,013 \cdot 10^5$ Па (760 мм.рт.ст)

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^2$ Вт/м·К	$a \cdot 10^2$ м ² /ч	$\nu \cdot 10^2$ м ² /с	P_r	ρ , кг/м ³
-10	2,361	6,28	12,43	0,712	1,342
0	2,442	6,77	13,28	0,707	1,293
10	2,512	7,22	14,16	0,705	1,247
20	2,593	7,71	15,06	0,703	1,205
30	2,675	8,23	16,00	0,701	1,165
40	2,756	8,75	16,96	0,699	1,128
50	2,826	9,26	17,95	0,698	1,093
60	2,896	9,79	18,97	0,696	1,060
70	2,966	10,28	20,02	0,694	1,029
80	3,047	10,87	21,09	0,692	1,000
90	3,128	11,48	22,10	0,690	0,972
100	3,210	12,11	23,13	0,688	0,946
120	3,338	13,26	25,45	0,686	0,898
140	3,489	14,52	27,80	0,684	0,854
160	3,640	15,80	30,09	0,682	0,815
180	3,780	17,10	32,49	0,681	0,779
200	3,931	18,49	34,85	0,680	0,746

Содержание отчета

1. Тема.
2. Цель работы.
3. Задание.
4. Схема и описание функциональной схемы установки.
5. Выполнить пункты задания 3; 4; 5.
6. Заполнить таблицу 5.1.
7. Выполнить пункт 7.
8. Обработать результаты измерений.
9. Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Что называется конвективным теплообменом?
2. Что называется теплоотдачей?
3. Назовите факторы, влияющие на коэффициент теплоотдачи.
4. Что характеризует коэффициент Нуссельта?
5. Что характеризует число подобия Прандтля?
6. Что характеризует число подобия Грасгофа?
7. Для чего нужна теория подобия?
8. В чем состоит сущность теории подобия? Какие условия должны выполняться, чтобы два явления были подобными?

Список используемой литературы

Основные источники:

- 1 Смирнова М.В. Теоретические основы теплотехники. - Волгоград: ИД «Ин-Фолио», 2015 г. - 272 с.: ил.
- 2 Прибытков И.А., Левицкий И.А. Теоретические основы теплотехники. - М.: Академия, 2015 г. - 680 с.: ил.
- 3 Брюханов О.Н., Мелик-Аракелян А.Т., Коробко В.И. Основы гидравлики и теплотехники -4-е изд., стер.-М.:Издательский центр «Академия», 2015-240 с.

Дополнительные источники:

- 1 Костерев Ф.М., Кушнырев В.И. Теоретические основы теплотехники. – М.: Энергия, 2013. - 360 с.: ил.
- 2 Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике.- М.: машиностроение, 2013 г. - 376 с.: ил.
- 3 Черняк О.В. Основы теплотехники и гидравлики. - М.: Высшая школа, 2013 г. - 287 с.: ил.
- 4 Теплотехника под редакцией Н.Н. Сушкина - М.: Металлургия, 2013 г. . – 686 с.: ил.
- 5 Краснощеков Е.А., Сухомел А.С. Задачник по теплопередаче. – М.: Энергия, 2013.- 176 с.: ил.