Библиотека СОК

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ИЖЕВСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
профессор_____П.Б.Акмаров
«___»_____2009 г.

ТЕПЛОТЕХНИКА

Учебно-методическое пособие
к лабораторным работам для студентов,
обучающихся по направлению «Агроинженерия»,
очной и заочной форм обучения

Составители:
А.В.Савушкин
П.Л.Лекомцев
Ю.В.Новокрещенов
Л.П.Артамонова
Е.В.Дресвянникова

Ижевск
ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА
2009

УДК 621.1(076.1)
ББК 31.3я73-9
Т 34

Учебно-методическое пособие составлено в соответствии с требованиями Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования, утвержденного 17.03.2000 г.

Рассмотрены и рекомендованы к изданию редакционно-издательским советом ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА, протокол №____от_____2009 г.

Рецензент:
Г.П. Карабашев – к.т.н., доцент кафедры «Теоретические основы электротехники»

Составители:
А.В. Савушкин – д.т.н., профессор каф. электротехнологии с.-х. производства,
П.Л. Лекомцев – д.т.н., профессор каф. электротехнологии с.-х. производства,
Ю.В. Новокрещенов – к.т.н., доцент каф. электротехнологии с.-х. производства,
Л.П. Артамонова - к.э.н., доцент каф. электротехнологии с.-х. производства,
Е.В. Дресвянникова - ст.преподаватель каф. электротехнологии с.-х. производства.

Т34 Теплотехника : уч.-метод.пособие / Сост.А.В. Савушкин, П.Л. Лекомцев, Ю.В. Новокрещенов, Л.П. Артамонова, Е.В. Дресвянникова. – Ижевск: ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2009. - 99 с.

Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Агроинженерия», очной и заочной форм обучения

УДК621.1 (076.1)
ББК 31.3я73-9

© Савушкин А.В., Лекомцев П.Л., Новокрещенов Ю.В., Артамонова Л.П., Дресвянникова Е.В., составление
© ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2009

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……...4
Лабораторная работа № 1. Исследование параметров воздуха с целью определения показателя адиабаты 5
Лабораторная работа № 2. Исследование зависимости давления водяного пара от температуры 10
Лабораторная работа № 3. Определение параметров влажного воздуха …15
Лабораторная работа № 4. Определение коэффициента теплопроводности методом цилиндра..... 21
Лабораторная работа № 5. Определение теплоемкости воздуха 28
Лабораторная работа № 6. Определение коэффициента теплоотдачи от горизонтальной трубы при свободном движении воздуха 34
Лабораторная работа № 7. Определение коэффициента теплопередачи нагревательного прибора 41
Лабораторная работа № 8. Определение коэффициента теплопередачи при перекрестном движении теплоносителей..... 46
Лабораторная работа № 9. Изучение процесса конвективной сушки 51
Лабораторная работа № 10. Испытание поршневого компрессора..... 59
Лабораторная работа №11. Определение характеристик автономного кондиционера 66
Лабораторная работа № 12. Исследование соответствия потребных и установленных тепловых мощностей отопительных приборов..... 75
Лабораторная работа № 13. Определение эквивалентного коэффициента теплопроводности при теплоотдаче в ограниченном пространстве..... 81
Лабораторная работа №14. Определение степени черноты полного излучения серого тела методом сравнения с эталонным телом 87
Приложения 94

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания содержат 14 лабораторных работ, предназначенных для выполнения студентами инженерных специальностей. Каждая работа рассчитана на двухчасовое занятие.

Для получения допуска к работе необходимо ознакомится с целью, заданием, описанием лабораторной установки, рекомендуемой литературой, порядком выполнения опытов, оформить заготовку отчета, подготовить ответы на контрольные вопросы, отмеченные знаком (*).

Все измерения производятся трехкратно, при установившемся температурном режиме. Отчет по работе оформляется в соответствии с требованиями, указанными в разделе «Содержание отчета».

Приведенные в методических указаниях лабораторные работы разрабатывались и совершенствовались на протяжении ряда лет при участии многих преподавателей и лаборантов.

Лабораторная работа № 1

Исследование параметров воздуха с целью определения показателя адиабаты

Цель работы: экспериментальное определение показателя адиабаты для воздуха, исследование состояния газа.

Задание для предварительной подготовки

1. Изучить настоящие методические указания и рекомендуемую литературу.
2. Подготовить ответы на контрольные вопросы 1...3.
3. Из уравнения Майера и уравнения (1.2) получить формулы для определения теплоемкостей C_p и C_v.
4. Разработать форму таблицы для результатов измерений и расчетов.
5. Оформить заготовку письменного отчета по лабораторной работе.

Общие сведения

Процесс изменения состояния газа, происходящий без теплообмена с окружающей средой (dq=0), называется адиабатным процессом. Адиабатный процесс может быть осуществлен как при наличии тепловой изоляции системы от окружающей среды, так и при малом времени протекания процесса. Уравнение адиабаты для идеального газа имеет вид:

$$pv^k = const, \qquad (1.1)$$

где p – абсолютное давление газа, Па; v – удельный объем газа, $м^3/кг$; k – показатель адиабаты.

Величина показателя адиабаты зависит от количества степеней свободы молекул газа и равна отношению теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме.

$$k = \frac{C_p}{C_v}, \qquad (1.2)$$

где C_p – удельная массовая теплоемкость при постоянном давлении, кДж/(кг К); C_v – удельная массовая теплоемкость при постоянном объеме, кДж /(кг К).

Показатель адиабаты может быть определен из уравнения (1.1), если известны давление и объем в начальном и конечном состоянии газа. После подстановки этих параметров в уравнение (1.1) и его логарифмирования расчетная формула примет вид:

$$k = \frac{\ln(p_1 / p_2)}{\ln(v_2 / v_1)}, \qquad (1.3)$$

где p_1 и p_2 – давление в начальном и конечном состояниях газа, Па; v_1 и v_2 –удельные объемы, $м^3/кг$.

Для определения показателя адиабаты осуществляется процесс 1-2 изменения состояния воздуха (рис.1.1). Температура воздуха в точке 1 равна температуре окружающей среды. При адиабатическом расширении температура в точке 2 становится ниже температуры окружающей среды.

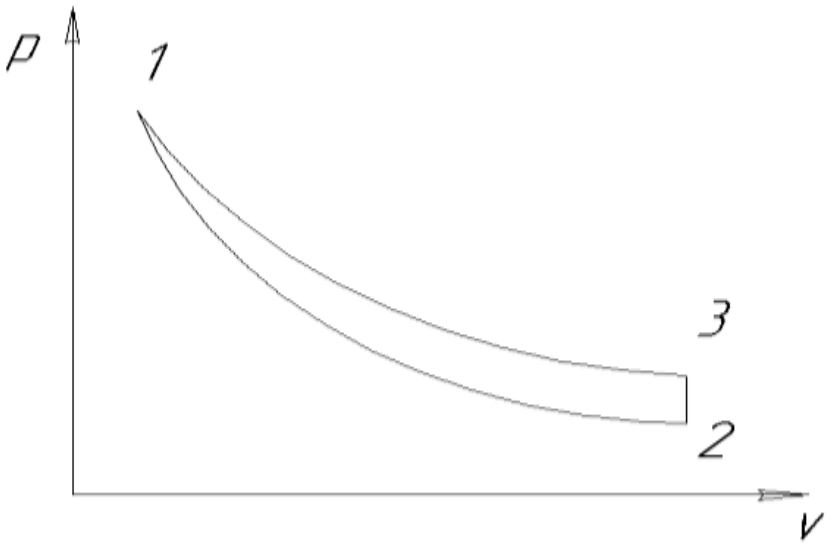


Рис. 1.1 – **Изменение состояния газа при определении показателя адиабаты k**

Ввиду сложности экспериментального определения удельного объема газа в конце процесса расширения этот параметр из выражения (1.3) целесообразно исключить.

С этой целью после адиабатного процесса расширения воздуха осуществляется изохорный процесс нагревания воздуха 2-3 до температуры окружающей среды. Состояние газа в точке 3 характеризуется удельным объемом и давлением (v_3 и p_3). Температура газа в точках 1 и 3 одинаковая, поэтому, согласно закону Бойля-Мариотта

$$\frac{v_3}{v_1} = \frac{p_1}{p_3}\ ; \quad p_1 v_1 = p_3 v_3\,. \qquad (1.4)$$

После подстановки выражения (1.4) в равенство (1.3) и замены удельного объема v_3 величиной v_2 (для изохорного процесса $v_3 = v_2$) получим:

$$k = \frac{\ln(p_1 / p_2)}{\ln(p_1 / p_3)}. \qquad (1.5)$$

Натуральный логарифм можно разложить в ряд. Тогда, если p_1/p_2 и p_1/p_3 близки к 1, то после подстановки в (1.5) и отбрасывания членов, близких к нулю, получим

$$k = \frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_3}, \qquad (1.6)$$

где p_1, p_2, p_3 – давления воздуха в точках 1,2,3 (рис.1.1), Па.

Описание лабораторной установки

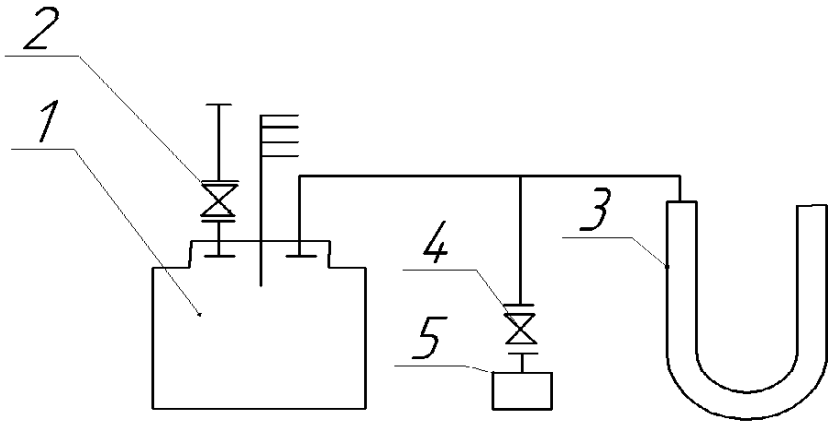


Рис.1.2 – **Схема лабораторной установки**

Стеклянный сосуд 1 (рис.1.2) соединен трубкой с насосом 5 через кран 4. С помощью крана 2 сосуд может сообщаться с окружающей средой. Давление в сосуде измеряется манометром 3.

Порядок выполнения работы

Открывается кран 4 и в сосуд нагнетается воздух до избыточного давления 20-30 мм. вод. ст., кран 4 закрывается. После того, как нагревшийся при нагнетании воздух охладится до температуры окружающей среды и показания манометра перестанут изменяться, измеряют давление p_1, которое соответствует точке 1 на рис.1.1.

Затем необходимо открыть кран 2 и быстро выпустить часть воздуха из сосуда. Истечение воздуха будет сопровождаться падением давления и температуры.

Процесс 1-2 (истечения воздуха) можно считать адиабатным ввиду его кратковременности (теплообменом за короткое время можно пренебречь). Сразу после процесса 1-2 закрывают кран 2 и измеряют давление p_2.

В результате теплообмена с окружающей средой происходит изохорный нагрев воздуха 2-3. При этом температура в сосуде возрастает до температуры окружающей среды, что можно определить по показаниям манометра. Они перестанут изменяться. Давление при этом повысится до p_3.

Для повышения достоверности опыт нужно повторить 5 раз. Окончательным результатом лабораторной работы можно считать среднее арифметическое по пяти замерам. По полученному экспериментально показателю адиабаты рассчитывают теплоемкости C_p и C_v.

Результаты проводимых исследований заносятся в таблицу. Форму таблицы студенты выбирают сами.

Содержание отчета

1. Краткие сведения об адиабатном процессе.
2. Данные об экспериментальной установке, ее устройстве, принципе действия, особенностях работы и измерений. Схема установки.
3. Примеры расчета показателя адиабаты и теплоемкостей воздуха.
4. Заполненная таблица испытаний.
5. Расчет погрешностей (приложение Б).
6. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1*. Что такое адиабатный процесс? Как он обеспечивается в данной работе? Какие условия необходимы для протекания адиабатного процесса?
2*. Рассказать ход работы.
3*. Для чего нужна третья точка (p_3, v_3)?
4. Показать математически и графически зависимость между p и T, между v и T в адиабатном процессе.
5. Расписать формулу определения показателя адиабаты и упростить ее.
6. В каком случае необходимо пользоваться логарифмической формулой для определения показателя адиабаты?
7. От чего зависит показатель адиабаты?
8. Как, зная показатель адиабаты, определить изобарную и изохорную

теплоемкости?
9. Почему в адиабатном процессе расширения тела температура убывает, а при сжатии – увеличивается?
10. При каких условиях политропные процессы переходят в изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный?

Литература

1. Теплотехника./ В.Н. Луканин [и др.];/ Под редакцией В.Н. Луканина.- 2-е изд. – М.: Высшая школа, 2000.
2. Кудинов В.А. Техническая термодинамика./Кудинов В.А., Карташов Э.М. – М.: Высшая школа, 2005.
3. Карминский В.Д. Техническая термодинамика. – М.: Высшая школа, 2005.

Лабораторная работа № 2

Исследование зависимости давления водяного пара от температуры

Цель работы: опытным путем исследовать зависимость давления парообразования от температуры, научиться пользоваться **is**-диаграммой водяного пара.

Задание для предварительной подготовки

1. Изучить настоящие методические указания и рекомендуемую литературу.
2. Подготовить ответы на контрольные вопросы 1...3.
3. Оформить заготовку письменного отчета по лабораторной работе.

Общие сведения

Парообразованием называется процесс превращения вещества из жидкого состояния в газообразное. Существует две разновидности парообразования: испарение и кипение. В первом случае пар образуется только на поверхности. С увеличением температуры интенсивность испарения возрастает.

Кипением называется такой процесс превращения жидкости в пар, который происходит не только с поверхности жидкости, но и внутри нее, т.е. это процесс образования пара во всей массе жидкости. Кипение происходит при определенной температуре, зависящей от рода жидкости и от ее давления. Процесс кипения осуществляется при подводе к жидкости теплоты при неизменном давлении. По всему объему жидкости образуются быстро растущие пузырьки пара, которые всплывают на поверхность. Пузырек пара может расти только тогда, когда давление внутри него несколько превосходит давление жидкости, складывающееся из давления воздуха на поверхность и гидростатического давления.

Если же давление пара в пузырьке падает, например, из-за уменьшения температуры, то пузырек «захлопывается». Пар вновь переходит в жидкость. Такой эффект наблюдается при кипении жидкости «белым ключом». Легко узнать этот режим по характерному шуму.

Кипение жидкости начинается при температуре T_S, когда выравниваются давления жидкости и насыщенного пара в пузырьках. При этом температура остается постоянной, и вся подводимая теплота расходуется на фазовый переход из жидкого в газообразное состояние. Температура кипения T_S не зависит от интенсивности подвода теплоты, а зависит

только от внешнего давления. Графически это иллюстрирует рисунок 2.1. Кривая начинается в точке Р, называемой точкой тройного равновесия (Тр=273,16 К при Р=0,6108 кПа), и заканчивается в критической точке К (Т=647,15 К при Р=22,087 МПа).

При параметрах, соответствующих точке 0, вода может находиться в трех агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном. В точке К и выше процесс парообразования отсутствует.

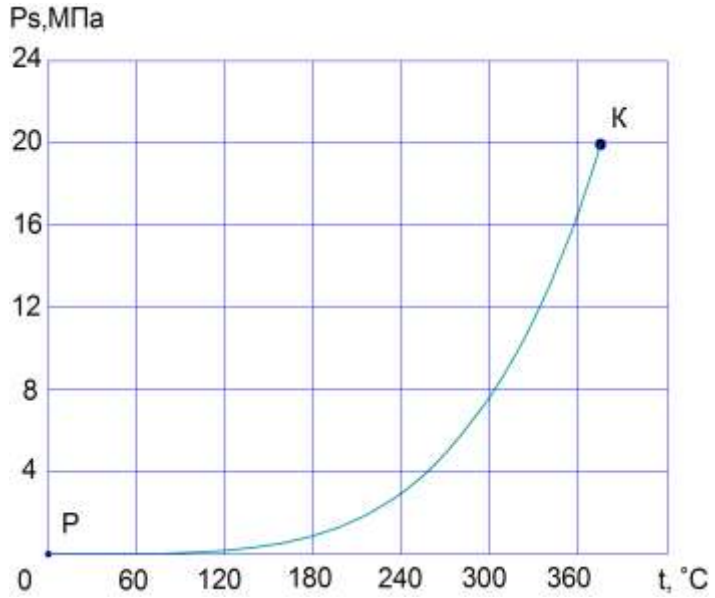


Рис.2.1. – **Сухой насыщенный пар. Кривая насыщения**

Описание лабораторной установки

Экспериментальная установка (рис.2.2) состоит из стального, теплоизолированного от окружающей среды, котла 1. На днище котла размещен электронагревательный элемент 2. К котлу через сифонную трубку 3 и тепловой компенсатор 4 присоединен манометр 5, измеряющий давление пара в котле. Тепловой компенсатор служит для исключения тепловых и механических влияний на механизм манометра.

В верхней части котла вварен карман, служащий для установки термометра 6. С целью обеспечения лучшего контакта баллона термометра с поверхностью котла свободное пространство между стенкой кармана и термометром заполнено маслом.

Порядок проведения опытов

1. Главной особенностью данной лабораторной работы является большая тепловая инерционность установки. Поэтому установка включается в начале занятия.

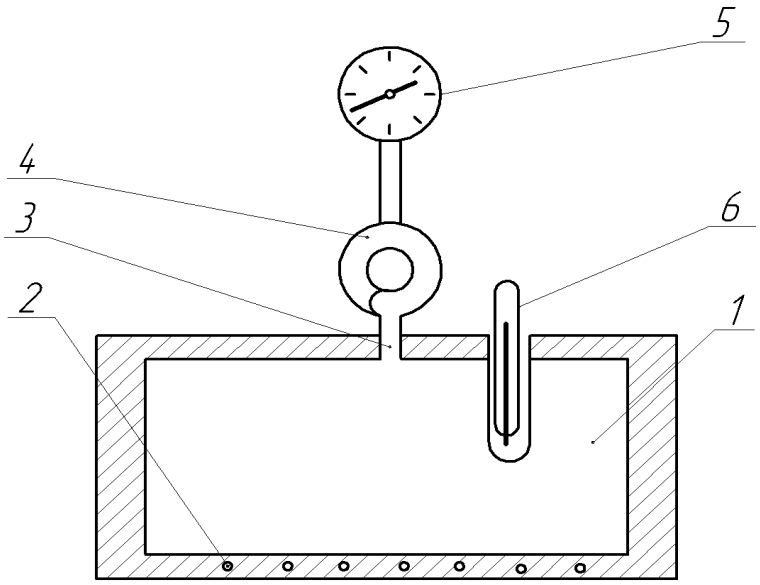


Рис.2.2 – **Схема лабораторной установки**

2. После получения допуска регистрируются показания приборов: термометра, манометра.

3. При достижении температуры t=80 °С начинают регистрировать показания термометра и манометра через каждые 3…5 °С изменения температуры. При достижении давления пара 6 Кг/см^2 необходимо выключить нагревательную установку и записать еще несколько показаний приборов. Показания приборов регистрируются в таблице 2.1.

Обработка результатов опытов

1. По барометрическому $P_б$ и избыточному давлениям $P_{изб}$ определяется абсолютное давление пара

$$P_а=P_б+P_{изб} \qquad (2.1)$$

2. Пользуясь таблицами термодинамических свойств воды и водяного пара, записать в таблице 2.1 значения давления, соответствующие значениям температуры, определенным в опыте.

3. По экспериментальным данным и табличным значениям построить зависимости давления парообразования от температуры. Для этого в масштабе на оси абсцисс отложить шкалу температур, а на оси ординат шкалу давлений; нанести экспериментальные точки и провести кривую, затем изобразить табличную кривую. Оценить среднее отклонение экспериментальных значений температуры кипения от табличных.

$$\Delta T_{СР} = \frac{\sum \Delta T}{n}, \qquad (2.2)$$

где n – число опытов; $\Delta T=T_{экс}-T_{табл}$, $T_{экс}$ и $T_{табл}$ – значения экспериментальных и табличных температур.

4. Определить энтальпию i_x и энтропию S_x влажного насыщенного пара:

$$i_x=i'+rx, \quad (2.3)$$

$$S_x=S'+(rx/T_s), \quad (2.4)$$

где r – теплота парообразования (принимается по таблицам в зависимости от давления); x – степень сухости пара, принять для условий опыта x=0,4;

i' – энтальпия кипящей воды; S' – энтропия кипящей воды;

$$i'=Cp\cdot(Ts-273), \quad (2.5)$$

где Ts – температура кипящей воды, К; Ср – массовая удельная теплоемкость воды при постоянном давлении, Ср=4,19 кДж/(кгК);

$$S'=C_p\ln(T_S/273). \quad (2.6)$$

5. Пользуясь is-диаграммой, графически определить энтропию S_x по значениям энтальпии i_x, рассчитанным по формуле (2.3). Найденные значения энтропии S_x сравнить с вычисленными. Сделать вывод о точности определения.

Таблица 2.1 – **Протокол результатов измерений и их обработки**

t	T_S	$P_{изб}$		$P_{бар}$		$P_{абс}$	$P_{таб}$	r	i_x	S_x	$S_{таб}$
^oC	K	$\frac{кгс}{см^2}$	Па	мм. рт. ст.	Па	Па	Па	$\frac{кДж}{кг}$	$\frac{кДж}{кг}$	$\frac{кДж}{кг}$	$\frac{кДж}{кг}$

Содержание отчета

1. Краткие теоретические сведения, необходимые при защите лабораторной работы.
2. Схема экспериментальной установки.
3. Таблица с результатами эксперимента и расчетными данными.
4. Пример расчета.
5. Экспериментальные и табличные графики зависимости P=f(T).

6. Расчет погрешностей (приложение Б).
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1*. Как протекает процесс кипения жидкости?
2*. Поясните схему лабораторной установки и назначение отдельных частей.
3*. Поясните методику проведения опыта с указанием особенностей выполнения лабораторной работы.
4. Как зависит температура кипения жидкости от действия внешней среды?
5. Что такое критическая точка? Каковы ее параметры?
6. Что такое точка тройного равновесия? Каковы ее параметры?
7. От чего зависят внутренняя энергия, энтальпия и энтропия влажного пара?
8. Почему для полной характеристики влажного насыщенного пара недостаточно температуры и давления? В чем состоит необходимость введения других величин?
9. Что характеризует энтальпия и энтропия пара? Где используются эти термодинамические функции?
10. Почему при увеличении давления выше критического вода уже не превращается в пар? Как этот феномен используется в теплотехнике?
11. Как пользоваться is-диаграммой?
12. Что такое степень сухости пара?
13. Показать процесс перехода из жидкости в пар на pv-диаграмме.
14. Почему в технике стремятся использовать перегретый пар?
15. Чем отличается водяной пар от идеального газа? Какими уравнениями описывается состояние водяного пара?
16. Покажите на pv-диаграмме изотермы Ван-дер-Ваальса и реальные изотермы водяного пара для нескольких значений T. Как выглядит изотерма для критической температуры и для температуры, превышающей критическую?

Литература

1. Теплотехника/ В.Н. Луканин [и др.];/ Под редакцией В.Н. Луканина.- 2-е изд. – М.: Высшая школа, 2000.
2. Кудинов В.А. Техническая термодинамика./Кудинов В.А., Карташов Э.М. – М.: Высшая школа, 2005.
3. Карминский В.Д. Техническая термодинамика. – М.: Высшая школа, 2005.

Лабораторная работа № 3

Определение параметров влажного воздуха

Цель работы: экспериментальное определение параметров влажного воздуха, исследование изменения этих параметров в процессах нагрева и увлажнения.

Задание для предварительной подготовки

1. Изучить настоящие методические указания и рекомендуемую литературу.
2. Подготовить ответы на контрольные вопросы 1..3.
3. Оформить заготовку письменного отчета по лабораторной работе.

Общие сведения

Воздух применяется в качестве рабочего тела во многих технологических процессах. Важно знать, как изменяются при этом его параметры. Например, при нагревании или охлаждении, при расширении или сжатии, при увлажнении или осушении. Атмосферный воздух всегда содержит некоторое количество влаги. Поэтому его можно рассматривать как газовую смесь, подчиняющуюся закону Дальтона

$$P=P_в+P_п, \qquad (3.1)$$

где P – давление газовой смеси (влажного воздуха); $P_в$ – парциальное давление сухого воздуха; $P_п$ – парциальное давление водяного пара.

Сухой воздух является смесью кислорода, азота, углекислого и многих других газов. Но в большинстве технических приложений, когда давление невелико и температура значительно выше температуры конденсации компонентов смеси, сухой воздух можно рассматривать как идеальный газ с парциальным давлением $P_в$.

Состояние водяного пара в воздухе определяется величиной его парциального давления $P_П$. В большинстве случаев влажный воздух – это смесь сухого воздуха и перегретого водяного пара. Перегретый пар тоже можно рассматривать как идеальный газ. Но если его охладить или увеличить парциальное давление, то водяной пар станет сухим насыщенным. Известно, что это состояние неустойчиво, за ним последует конденсация влаги (выпадение росы).

Влажный насыщенный воздух – это смесь сухого воздуха и сухого насыщенного пара. Сухой насыщенный пар существенно отличается от

идеального газа. Поэтому для определения его термодинамических параметров следует пользоваться уравнениями состояния реальных газов или имеющимися в справочной литературе таблицами и графиками (например, ***id***-диаграммой).

Влажность воздуха характеризуется количеством содержащегося в нем водяного пара. Количественно ее описывают следующие величины:

Абсолютная влажность – это масса водяного пара, находящегося в 1 $м^3$ влажного воздуха. Она равна плотности водяного пара ρ при известных парциальном давлении и температуре смеси.

Влагосодержанием называют массу водяного пара, в граммах, приходящуюся на 1 кг сухого воздуха.

$$d=(m_П/m_в)1000, \qquad (3.2)$$

где d – влагосодержание, г/кг.

Относительная влажность равна отношению плотности водяного пара, находящегося во влажном воздухе, к плотности сухого насыщенного пара при той же температуре.

$$\varphi=(\rho_п/\rho_{мах})\cdot 100, \qquad (3.3)$$

где φ – относительная влажность, %; $\rho_п$ – плотность водяного пара во влажном воздухе, кг/$м^3$; $\rho_{мах}$ – плотность сухого насыщенного пара при температуре влажного воздуха, кг/$м^3$.

Если от влажного воздуха при неизменном давлении (а значит, и при постоянном парциальном давлении водяного пара) отводить теплоту, то при некоторой температуре водяной пар в воздухе тоже станет насыщенным.

Температура $t_{р,}$ соответствующая насыщенному состоянию пара в воздухе при данном парциальном давлении, называется температурой точки росы. При охлаждении воздуха ниже точки росы происходит конденсация водяных паров (в природе – выпадение росы). Изменяется соотношение масс водяного пара и сухого воздуха. Уменьшается влагосодержание.

В основу используемой в лабораторной работе методики определения параметров влажного воздуха положен психрометрический метод. Психрометр — это прибор, содержащий два одинаковых термометра. Один из термометров обмотан увлажненной тканью. Если относительная влажность воздуха меньше 100%, то с поверхности влажного материала происходит испарение воды, на это необходимы затраты энергии. Психрометр не содержит источников теплоты, влага испаряется адиабатно,

за счет внутренней энергии. Поэтому удельная энтальпия воздуха в окрестностях мокрого термометра практически не изменяется.

По температурам сухого t_c и мокрого $t_м$ термометров на id-диаграмме находят точку, соответствующую параметрам влажного воздуха. Для этого вначале нужно найти на кривой насыщения (линия φ = 100%) точку с температурой $t_м$. Она соответствует состоянию воздуха в непосредственной близости от мокрого термометра. От найденной точки подняться по изотерме мокрого термометра (угол 135º) до изотермы сухого термометра t_c. Искомая точка находится на пересечении изотермы мокрого термометра $t_м$ = const и изотермы сухого термометра t_c = const. По найденной точке определяют влагосодержание d, энтальпию i, относительную влажность φ, точку росы t_p и парциальное давление водяного пара в воздухе $P_п$. Линия $t_м$ = const на диаграмме проходит немного положе изоэнтальпии (i=const). Обычно ее изображают пунктиром или другим цветом. Если на вашей id-диаграмме эта линия отсутствует; то с небольшой погрешностью ее может заменить изоэнтальпия.

При нагревании воздуха его влагосодержание не изменяется, а энтальпия возрастает. На диаграмме этому соответствует отрезок вертикальной прямой. Точно так же выглядит процесс охлаждения, если температура воздуха выше точки росы. При достижении t_p процесс охлаждения пойдет по кривой насыщения (φ=100 %).

Адиабатное увлажнение происходит по линии, близкой к изоэнтальпии. Если увлажнение сопровождается подводом или отводом теплоты, например, излучением или в результате контакта с нагретыми телами, то линия, изображающая процесс, будет существенно отличаться от изоэнтальпии. В простейшем случае это отрезок прямой, направление которого определяет угловой коэффициент

$$\varepsilon=(\Delta i / \Delta d). \qquad (3.4)$$

На id–диаграмме значения узлового коэффициента нанесены по периметру.

Описание лабораторной установки

Влажный воздух вентилятором 1 по воздуховоду 2 подается через нагреватель 4 в испарительную камеру 6. Психрометрами 3, 5 и 7 контролируются его параметры (на входе, поле подогрева и после увлажнения). Цифрой 8 на схеме обозначен экран, свободно пропускающий воздух, но задерживающий инфракрасные лучи. С его помощью можно предотвратить теплообмен излучением между нагревателем и испарителем.

Экран может поворачиваться на оси и фиксируется в двух положениях («открыто» и «закрыто»).

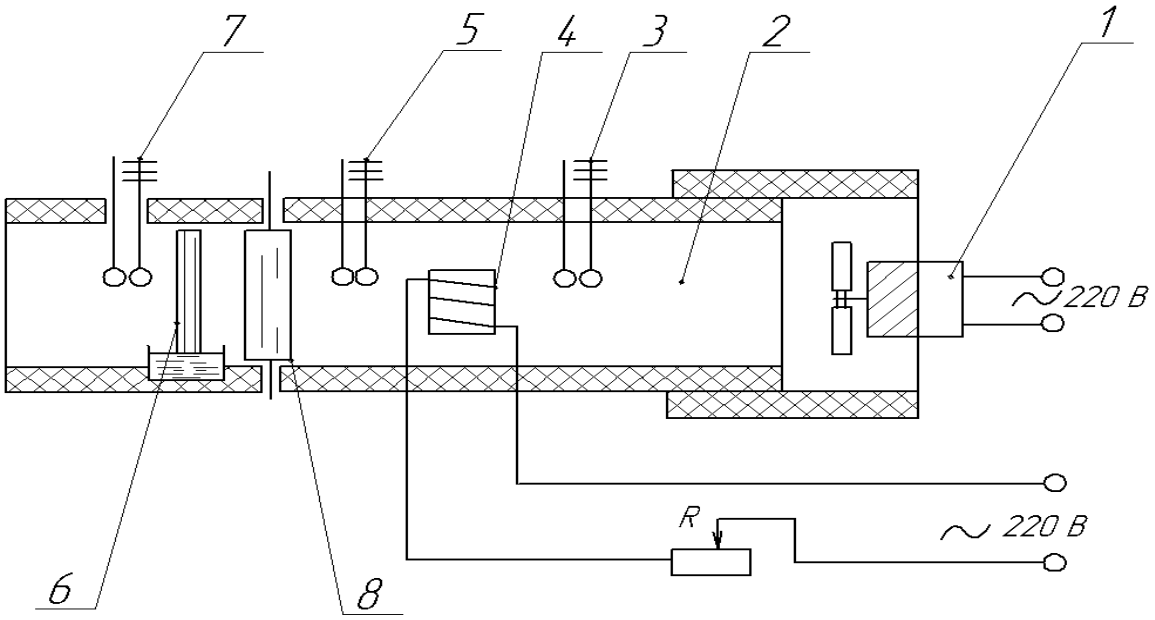


Рис.3.1 **– Схема лабораторной установки**

Порядок проведения опытов

1. Включить установку.
2. Установить заданные преподавателем ток через электронагреватель и положение инфракрасного экрана. Дождаться установившегося режима и записать в таблицу 1 показания психрометров.
3. Не изменяя мощности нагревателя, произвести еще два замера с интервалом 2...3 минуты.
4. Повторить пункты 2 и 3 для второго, а потом и третьего режимов. Заполненный протокол измерений должен содержать девять строк с показаниями психрометров.

Аналитические зависимости между параметрами влажного воздуха

$$P_n = 0{,}945\ (1 + 0{,}00367 \cdot tc) \cdot \rho\ ; \qquad (3.5)$$

$$\rho = \frac{1{,}058 Pn}{1 + 0{,}00367 t_C}\ , \qquad (3.6)$$

где P_n – давление паров воды в воздухе в мм.рт.ст. при температуре t; ρ – абсолютная влажность воздуха в г/м^3 при температуре t; t_C – температура воздуха в °С.

Таблица 3.1 – **Протокол результатов измерений**

№ п/п		И.К. экран	Психрометр №3		Психрометр №5		Психрометр №7	
			$t_с$ °С	$t_м$ °С	$t_с$ °С	$t_м$ °С	$t_с$ °С	$t_м$ °С
I	1							
	2							
	3							
Ср.								
II	1							
	2							
	3							
Ср.								
III	1							
	2							
	3							
Ср.								

$$\varphi = \frac{Pn}{Pн} 100\% \qquad (3.7)$$

где φ – относительная влажность воздуха в %; $P_н$ – давление насыщенного водяного пара в мм.рт.ст. при температуре t;

$$P_п = P_н – 0{,}00066\ P_б\ (t_с - t_м) / (1 + 0{,}00115\ (t_с - t_м)), \qquad (3.8)$$

где $P_б$ – барометрическое давление в мм.рт.ст.; $t_с$ – температура сухого термометра в °С; $t_м$ – температура влажного термометра в °С.

Обработка результатов опытов

1. Вычислить средние значения измеренных величин.
2. По показаниям сухого и влажного термометров, используя id-диаграмму, определить удельную энтальпию, влагосодержание d, относительную влажность воздуха φ, температуру точки росы $t_р$ и парциальное давление $P_н$ водяных паров в воздухе для каждого из психрометров. Полученные данные занести в таблицу 3.2.
3. Рассчитать угловой коэффициент ε для процесса увлажнения по выражению (3.4).
4. Используя формулы (3.6) и (3.7), определить значения абсолютной Р и относительной φ влажности.
5. По полученным данным на id-диаграмме строятся процессы нагревания и увлажнения воздуха. Графические зависимости сравнить с теоретическими процессами, протекающими при постоянных влагосодержании d и энтальпии i.

Таблица 3.2 – **Протокол результатов обработки измерений**

	Опыт №1			Опыт № 2			Опыт № 3		
	Пс3	Пс5	Пс7	Пс3	Пс5	Пс7	Пс3	Пс5	Пс7
i									
d									
φ									
$t_р$									
$P_п$									
ε									

Содержание отчета

1. Краткие теоретические сведения, необходимые для выполнения и защиты лабораторной работы.
2. Схема лабораторной установки с обозначением отдельных деталей.
3. Таблицы с результатами опытов.
4. Графики процессов увлажнения и подогрева воздуха на id-диаграмме.
5. Расчет погрешностей (приложение Б).
6. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. *Какие процессы изменения состояния влажного воздуха рассматриваются в работе?
2. *Как изображаются в id-диаграмме процессы нагрева и увлажнения?
3. *Какие параметры характеризуют состояние влажного воздуха?
4. Что представляет собой парциальное давление? Закон Дальтона для смеси.
5. Характеристики влажного воздуха и их физический смысл.
6. Дать определение температуры точки росы.
7. Как пользоваться id-диаграммой?
8. Что такое энтальпия? Как определить ее численное значение?
9. В чем заключается графический метод расчета процессов с водяным паром с помощью id-диаграммы?

Литература

1. Теплотехника/ В.Н. Луканин [и др.];/ Под редакцией В.Н. Луканина.- 2-е изд. – М.: Высшая школа, 2000.
2. Кудинов В.А. Техническая термодинамика./Кудинов В.А., Карташов Э.М. – М.: Высшая школа, 2005.

Лабораторная работа № 4

Определение коэффициента теплопроводности методом цилиндра

Цель работы: определение коэффициента теплопроводности материалов методом цилиндра и изучение зависимости теплопроводности материалов от температуры.

Задание для предварительной подготовки

1. Изучить настоящие методические указания и основную литературу.
2. Получить формулу для определения коэффициента теплопроводности.
3. Подготовить ответы на контрольные вопросы 1...3.
4. Оформить заготовку письменного отчета по лабораторной работе.

Общие сведения

Различают три основных способа теплообмена: теплопроводность, конвективный теплообмен и тепловое излучение. Теплопроводность – процесс молекулярного переноса теплоты в сплошной среде или между непосредственно соприкасающимися телами, обусловленный наличием градиента температуры. Перенос теплоты теплопроводностью происходит в результате последовательного обмена энергией движущихся частиц. Теплопроводность в чистом виде, как правило, встречается только в твердых телах или неподвижных газах и жидкостях. В металлах перенос теплоты осуществляется свободными электронами и колебаниями атомов кристаллической решетки, в диэлектриках и жидкостях – упругими волнами, вызванными колебаниями атомов и молекул, в газах теплота переносится тепловым движением атомов и молекул.

При изучении теплопередачи основной задачей является определение температурного поля – совокупности мгновенных значений температур во всех точках тела (или пространства).

В расчетах процессов теплопроводности принимается, что тела однородны и изотропны (обладают одинаковыми физическими свойствами по всем направлениям), а размеры их велики по сравнению с расстояниями между молекулами. При нагреве такого тела температура его в различных точках неодинакова и изменяется во времени, причем теплота распространяется от мест с более высокой температурой к местам с более низкой температурой, т.е. имеет место изменение температуры, как в пространстве, так и во времени

$$t = f(x, y, z, \tau), \qquad (4.1)$$

где t – температура; x, y, z – пространственные координаты; τ – время.

Уравнение (4.1) описывает нестационарное температурное поле, которое соответствует режиму прогрева или охлаждения тела. В том случае, когда распределение температуры в теле не изменяется во времени, температурное поле называется стационарным

$$t = f(x, y, z). \tag{4.2}$$

Выражения (4.1) и (4.2) описывают трехмерные температурные поля. Наиболее простой вид имеет уравнение одномерного стационарного температурного поля

$$t = f(x). \tag{4.3}$$

Множество точек с одинаковой температурой образует поверхность равных температур, называемую изотермической.

При перемещении от одной изотермической поверхности к другой вдоль какого-либо направления l будет наблюдаться изменение температуры. Наибольшая разность температур на единицу длины имеет место в направлении нормали к изотермической поверхности.

Предел отношения изменения температуры ΔT к расстоянию между изотермами по нормали Δl , когда Δl стремится к нулю, называется градиентом температуры (К/м)

$$gradT = \lim_{\Delta l \to 0} \frac{\Delta T}{\Delta l} = \frac{dT}{dl} \bar{n}; \tag{4.4}$$

$$gradT = \frac{\partial T}{\partial x} \bar{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \bar{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \bar{n}. \tag{4.5}$$

Градиент температуры есть вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры и являющийся мерой интенсивности изменения температуры в указанном направлении.

Количество теплоты, проходящей в единицу времени через произвольную поверхность, называют тепловым потоком (Вт)

$$\Phi = \frac{dQ}{d\tau}. \tag{4.6}$$

Плотность теплового потока – это вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности, в сторону уменьшения температуры (Вт/м^2)

$$\bar{q} = \frac{d\Phi}{dF}\bar{n} \ . \tag{4.7}$$

Согласно закону Фурье тепловой поток через единицу изотермической поверхности пропорционален градиенту температуры

$$d\Phi = -\lambda \cdot grad\ T \cdot dF, \tag{4.8}$$

или для плотности теплового потока

$$\bar{q} = -\lambda \cdot gradT \ . \tag{4.9}$$

Коэффициент пропорциональности λ называют коэффициентом теплопроводности. Знак минус указывает на то, что теплота передается в направлении уменьшения температуры, т.е. плотность теплового потока и градиент температуры имеют противоположные направления.

Коэффициент теплопроводности есть физический параметр вещества, характеризующий его способность проводить теплоту, численно он равен плотности теплового потока, проходящей через единицу изотермической поверхности при градиенте температуры, равном единице (gradT= 1) (Вт/(м К))

$$\lambda = \frac{\left|\bar{q}\right|}{\left|gradT\right|}. \tag{4.10}$$

Коэффициент λ различных материалов зависит от их структуры, температуры, влажности и др.

Наилучшими проводниками теплоты являются металлы λ=20-400 Вт/(мК); наихудшими – газы λ=0,005-0,5 Вт/(мК); (λ воздуха при 0^0С равно 0,0244 Вт/(мК).

С возрастанием температуры коэффициент теплопроводности газов увеличивается, а металлов – уменьшается.

Материалы с λ<0,25 Вт/(мК) считаются теплоизоляционными. Эти материалы имеют пористую структуру и низкий λ, обусловленный наличием в порах воздуха, имеющего низкую теплопроводность.

Коэффициент теплопроводности пористых материалов растет с по-

вышением их температуры и увеличением влажности и уменьшается при увеличении объемной плотности, т.к. при больших размерах пор появляются конвективные потоки, ухудшающие теплоизоляционные свойства материалов.

Различают следующие методы определения коэффициента теплопроводности; метод плиты, метод шара и метод цилиндра.

В методе цилиндра тепловой паток при стационарном режиме определяется уравнением

$$\Phi = \frac{2\pi \cdot \lambda \cdot l}{\ln(d_2 / d_1)}(t_1 - t_2) \qquad (4.11)$$

где Ф – тепловой поток, Вт; l – длина трубы, м; d_1 – наружный диаметр трубы, м; d_2 – внутренний диаметр трубы, м; t_1 – средняя температура внутренней поверхности трубы, °С; t_2 – средняя температура наружной поверхности трубы, ^{0}С; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м ^{0}С).

Описание лабораторной установки

Экспериментальная установка представлена на рис.4.1. Она состоит из нагревателя 1 и трубы 2, расположенных концентрически. Наружный диаметр нагревателя составляет 30 мм, а внутренний диаметр трубы 12 мм, между нагревателем и трубой засыпан исследуемый материал 3 (песок), коэффициент теплопроводности которого следует определить. Торцы цилиндра теплоизолированы пластмассовыми пробками 4.

Нагреватель представляет собой трубчатый нагревательный элемент (ТЭН). Для измерения температуры наружной поверхности нагревателя и внутренней поверхности трубы использованы хромель-алюминиевые термопары 5 и измеритель температуры 6. На наружной и внутренней поверхностях установлено по четыре термопары (внутренняя поверхность нагревателя t_1’, t_2’, t_3’, t_4’; наружная поверхность трубы – t_1’’, t_2’’, t_3’’, t_4’’). Тепловой поток, вырабатываемый ТЭНом, регулируется с помощью автотрансформатора 7. Для измерения теплового потока используются амперметр 8 и вольтметр 9, установленные в электрический тракт нагревателя.

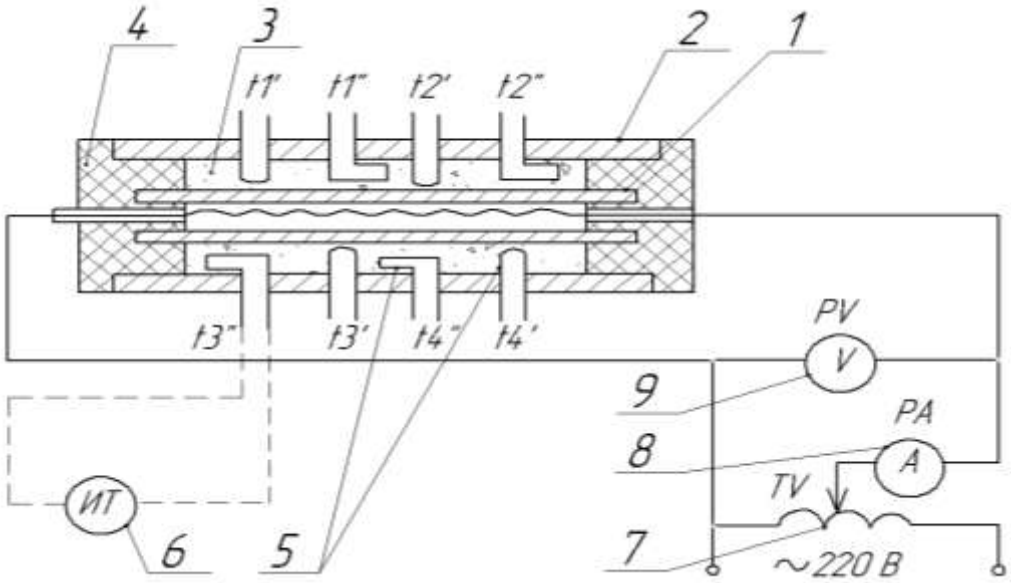


Рис.4.1 – **Схема лабораторной установки**

Порядок проведения опытов

1. После изучения опытной установки включить ее и установить первый из трех заданных преподавателем режимов работы.
2. Дождавшись установившегося режима (время прогрева установки около 10 минут), о чем будет свидетельствовать постоянство температуры на внутренней и наружной поверхностях, произвести запись показаний всех измерительных приборов. Показания амперметра и вольтметра записываются непосредственно, а показания измерителя температуры записываются последовательно для каждой точки поверхности.
3. Результаты занести в протокол измерений (таблица 4.1). В данном режиме произвести вторую и третью записи через 2 и 4 минуты после первой записи соответственно.
4. Установить второй температурный режим из заданных преподавателем и также, дождавшись установившейся температуры, сделать первую, вторую и третью записи в протокол измерений по данному температурному режиму.
5. Аналогично исследовать работу установки и в третьем температурном режиме.
6. Протокол измерений должен содержать девять записей по трем температурным режимам.

Обработка результатов опытов

1. Определяют средние температуры внутренней и наружной труб, а также среднюю температуру сыпучего материала:

$$t_1 = \frac{t'_1 + t'_2 + t'_3 + t'_4}{4};\ t_2 = \frac{t''_1 + t''_2 + t''_3 + t''_4}{4};\ tcp = \frac{t_1 + t_2}{2},$$

где t'_1, t'_2, t'_3, t'_4 – температуры в отдельных точках поверхности нагревателя, ^{0}C; $t''_1, t''_2, t''_3, t''_4$ – температуры в отдельных точках внутренней поверхности наружной трубы, ^{0}C; t_1 – средняя температура поверхности нагревателя, ^{0}C; t_2 – средняя температура внутренней поверхности наружной трубы, ^{0}C; $t_{ср}$ – средняя температура исследуемого материала, ^{0}C.

2. Тепловой поток определяют по потребляемой мощности электронагревателя:

$$Ф = UI, \qquad (4.12)$$

где Ф – тепловой поток, Вт; I – сила тока,А; U – напряжение, В.

3. Определяют коэффициент теплопроводности для каждого режима питания по формуле, полученной самостоятельно, при этом учесть d_1 – это диаметр нагревателя, d_2 – внутренний диаметр наружной трубы.

Таблица 4.1 – **Протокол результатов измерений**

№	Нагреватель			Температура исследуемого образца											
	U	I	Ф	t'_1	t'_2	t'_3	t'_4	t_1	t''_1	t''_2	t''_3	t''_4	t_2	tcp	λ
I	B	A	Вт	^{0}C	^{0}C	^{0}C	^{0}C	^{0}C	^{0}C	^{0}C	^{0}C	^{0}C	^{0}C	^{0}C	Вт/(мК)
1															
2															
3															
ср															
II															
III															

Содержание отчета

1. Краткие теоретические сведения из методических указаний и другой литературы.
2. Данные экспериментальной установки, принцип действия и особенности работы.
3. Раскрытый пример расчета одной из строк таблицы 4.1.
4. Заполненный протокол измерений и расчетов.
5. Графическая зависимость коэффициента теплопроводности от температуры.
6. Расчет погрешностей (приложение Б).
7. Вывод по работе.

Контрольные вопросы

1*. Что понимают под температурным полем?
2*. Расскажите ход лабораторной работы.
3*. Как формулируется закон Фурье?
4. Дать определение стационарного и нестационарного, одно-, двух- и трехмерного температурного поля. Какое температурное поле изучается в лабораторной работе?
5. Что понимают под градиентом температуры и плотностью теплового потока? Физический смысл коэффициента теплопроводности. Математическое выражение для их определения.
6. Раскройте, как осуществляется процесс передачи теплоты теплопроводностью в различных с физической точки зрения телах.
7. Чем отличается процесс передачи теплоты теплопроводностью от других процессов теплообмена?
8. Почему теплопроводность играет главенствующую роль именно в твердых телах и именно в металлах?
9. В чем заключается сущность изученного метода определения коэффициента теплопроводности? В чем принципиальное отличие данного метода от других?
10. По какой функции изменяется температура внутри цилиндрической стенки?
11. В чем заключается метод электрической аналогии процессов теплообмена? Для чего он используется в теории теплопроводности?
12. Какую роль играет коэффициент теплопроводности в технике? Приведите конкретные примеры.
13. В чем отличие процессов теплопередачи и теплоотдачи?

Литература

1. Теплотехника/ В.Н. Луканин [и др.];/ Под редакцией В.Н. Луканина.- 2-е изд. – М.: Высшая школа, 2000.

Лабораторная работа № 5

Определение теплоемкости воздуха

Цель работы: Экспериментальное определение теплоемкости воздуха и ознакомление с основными методами проведения калориметрического опыта**.**

Задание для предварительной подготовки

1. Изучить настоящие методические указания и рекомендуемую литературу.
2. Получить соотношение между средней и истинной теплоемкостями.
3. Подготовить ответы на контрольные вопросы 1...3.
4. Оформить заготовку письменного отчета по лабораторной работе.

Общие сведения

Теплоемкостью называется отношение количества теплоты, затраченного на нагревание тела, к изменению его температуры.

$$C = \frac{dq}{dt} \tag{5.1}$$

Теплоемкость, определяемая по формуле (5.1) при данных значениях v и t ; или P и t , называют истинной теплоемкостью. В практических расчетах пользуются средней теплоемкостью. Для интервала температур от t_1 до t_2 средняя теплоемкость определяется из выражения:

$$C_m\Big|_{t_2}^{t_1} = \frac{q_{1-2}}{t_2 - t_1} \tag{5.2}$$

где q_{1-2} – количество теплоты, подведенное к телу.

Если теплоемкость относят к какой-либо единице количества вещества, выраженной в кг, м^3, молях, то различают теплоемкости: массовую С, кДж/(кгК); объемную С', кДж/(м^3 К); мольную C_μ кДж/(моль К).

Связь между теплоемкостями такова:

$$C = \frac{C'}{\rho}\ ; \tag{5.3}$$

$$C_\mu = C\mu\ , \tag{5.4}$$

где ρ – плотность газа при нормальных условиях**,** кг/м^3; μ – молярная масса газа, кг/кМоль.

Наиболее широкое применение в технике нашли изохорная C_v и изобарная C_p теплоемкости. Для идеальных газов связь между изохорной и изобарной теплоемкостями устанавливается уравнением Майера:

$$C_p - C_v = R, \tag{5.5}$$

где R – газовая постоянная, кДж/(кгК).

Для реальных газов C_p - C_v > R; т. к. при их расширении в изобарном процессе совершается не только внешняя, но и внутренняя работа против сил взаимодействия между молекулами.

Кроме уравнения Майера теплоемкости связаны между собой через показатель адиабаты:

$$K = \frac{C_p}{C_v}. \tag{5.6}$$

Классическая молекулярно-кинетическая теория устанавливает зависимость теплоемкости только от плотности газов и не учитывает зависимости теплоемкости от температуры. Квантовая теория учитывает и эту связь, используя для этого энергии внутримолекулярных колебаний атомов. Наиболее широкое распространение получила зависимость вида:

$$C_x = a + bt + ct^2, \tag{5.7}$$

где *a, b* и *c* – постоянные, определяемые дли различных газов экспериментальным путем.

Для опытного определения теплоемкости газов используют методы смещения и постоянного протока.

В методе смещения предварительно нагретый газ охлаждается в калориметре. Измеренное в калориметре количество теплоты соотносят с количеством газа и определенным уменьшением его температуры, что позволяет вычислить теплоемкость данного газа.

Метод постоянного протока, используемый в данной лабораторной работе, более прост и не требует точных приборов. Он состоит в том, что к потоку газа, протекающему через калориметр, подводится известное количество теплоты и измеряется изменение температуры и его объемный расход через калориметр.

При установившемся режиме работы, когда параметры установки и исследуемого газа в отдельных его точках сохраняются постоянными, можно расчетным путем получить значение изобарной теплоемкости газа (в нашем случае при атмосферном давлении).

Описание лабораторной установки

Опытная установка, схема которой представлена на рис.5.1, состоит из проточного калориметра 1, покрытого теплоизоляционным материалом, электрического нагревателя 2, термометров 3 и 4. Для подачи воздуха в калориметре установлен вентилятор 5, расход воздуха которого постоянный. Регулирование напряжения, подаваемого на нагреватель, производится автотрансформатором 6, измерение напряжения и тока производится вольтметром 7 и амперметром 8.

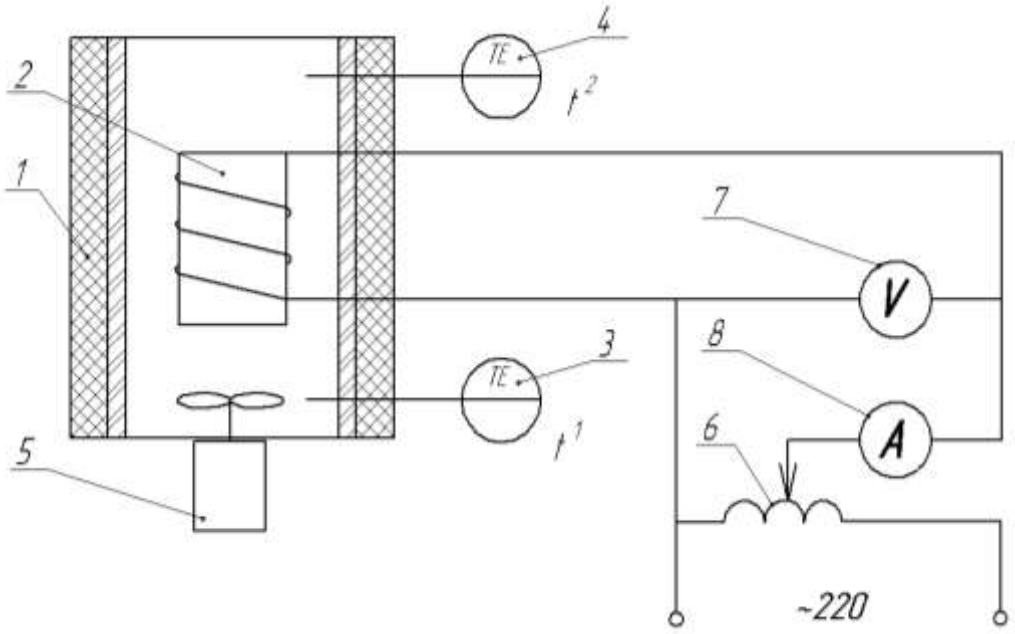


Рис.5.1 – **Схема лабораторной установки.**

Порядок проведения опытов

После получения допуска и ознакомления с устройством лабораторной установки следует включить вентилятор и регулятором напряжения установить по указанию преподавателя первый из трех режимов питания нагревателя.

После достижения стационарного теплового режима, о чем свидетельствует постоянство температуры на выходе калориметра, записать показания измерительных приборов. При данном тепловом режиме измерения провести 3 раза через 2...3 минуты. Результаты занести в протокол измерений (таблица 5.1).

Затем установить второй температурный режим, и при стационарных условиях зафиксировать показания приборов. Аналогично снять данные и при третьем температурном режиме. Протокол испытаний должен содержать 9 измерений для трех температурных режимов.

Обработка результатов опытов

По данным протокола измерений определяют среднеарифметические результаты опытов в трех исследованных режимах.

1. Определяем объемный расход воздуха *Lo* через калориметр, приведенный к нормальным условиям (T_o = 273,15 К и P_o = 101,3 кПа), считая, что состояние воздуха описывается уравнением:

$$\frac{P_o L_o}{T_o} = \frac{PL}{T}, \tag{5.8}$$

где Р – абсолютное давление в лаборатории, кПа; Т – температура воздуха в лаборатории, К; L – объемный расход воздуха через калориметр при температуре воздуха в лаборатории (определяют как произведение скорости воздуха в трубе на сечение трубы), $м^3/с$.

Таблица 5.1 – **Протокол результатов измерений**

	№ п/п	Температура воздуха в ^{0}С		Напряжение U,В	Ток I, А	Скор.воз W, м/с
		вх.t_1	вых.t_2			
1 режим	1					
	2					
	3					
	среднее					
2 режим	1					
	2					
	3					
	среднее					
3 режим	1					
	2					
	3					
	среднее					

2. Выразив тепловой поток Ф через мощность нагревателя *P=UI*, определяем объемную изобарную теплоемкость воздуха С’р(кДж/($м^3$К));

$$C'_p = \frac{U \cdot I}{10^3 L_0 (T_2 - T_1)} \tag{5.9}$$

3.Определяем массовую изобарную теплоемкость воздуха *Ср* (кДж/(кгК)):

$$C_p = \frac{C'_p \cdot 22{,}4}{\mu}; \tag{5.10}$$

где – μ молярная масса воздуха (29,97 кг/моль).

4. Определяют массовую изохорную теплоемкость, используя уравнение Майера (5.5).

5. Определяют показатель адиабаты по формуле (5.6).

6. Определяют значения энтальпии и внутренней энергии воздуха по формулам

$$i = C_p(T_2 - 273) \quad (5.11)$$

$$u = C_v(T_2 - 273). \quad (5.12)$$

7. Результаты расчетов заносятся в таблицу 5.2.

8. Построить графические зависимости теплоемкости от средней температуры воздуха Ср, Cv = $f(t_{ср})$, $t_{ср} = (t_1 + t_2)/2$.

9. Значения Ср, Cv сравнить с результатами лабораторной работы №1.

Таблица 5.2 – **Протокол результатов обработки измерений**

№ пп	P, Вт	L_o $м^3/с$	Теплоемкости			Показатель адиабаты К	I $\frac{кДж}{кг}$	U $\frac{кДж}{кг}$
			Ср' $\frac{кДж}{м^3К}$	Ср $\frac{кДж}{кгК}$	Cv $\frac{кДж}{кгК}$			
1								
2								
3								

Содержание отчета

1. Краткие теоретические сведения.
2. Схема экспериментальной установки.
3. Подробные расчеты.
4. Заполненные протоколы измерений и расчетов.
5. Графические зависимости удельных теплоемкостей от температуры.
6. Расчет погрешностей (приложение Б).
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1*. По каким признакам классифицируется теплоемкость?
2*. Рассказать ход работы.
3*. Какие величины необходимо измерить в опыте для вычисления теплоемкости?
4. В чем сущность основных методов опытного определения теплоемкости?
5. Какая связь между массовой, объемной и мольной теплоемкостями?

6. Приведите основные соотношения между изобарной и изохорной теплоемкостями для идеальных газов.
7. От чего зависит показатель адиабаты для идеальных газов?
8. В чем заключается физический смысл газовой постоянной?
9. Почему изохорная теплоемкость меньше изобарной?
10. Что происходит с теплоемкостью при изменении температуры и как этот эффект трактует теория?
11. Почему в технике нашла широкое применение средняя теплоемкость, а не истинная?
12. Как изменится уравнение Майера для реальных газов и почему?

Литература

1. Теплотехника/ В.Н. Луканин [и др.];/ Под редакцией В.Н. Луканина.- 2-е изд. – М.: Высшая школа, 2000.
2. Кудинов В.А. Техническая термодинамика./Кудинов В.А., Карташов Э.М. – М.: Высшая школа, 2005.
3. Карминский В.Д. Техническая термодинамика. – М.: Высшая школа, 2005.

Лабораторная работа № 6

Определение коэффициента теплоотдачи от горизонтальной трубы при свободном движении воздуха

Цель работы: определение коэффициента теплоотдачи от горизонтальной трубы при свободном движении воздуха и исследование его зависимости от температурного напора.

Задание для предварительной подготовки

1. Изучить настоящие методические указания и рекомендуемую литературу.
2. Получить формулу для определения коэффициента теплоотдачи α.
3. Подготовить ответы на контрольные вопросы 1...3.
4. Оформить заготовку письменного отчета по лабораторной работе.

Общие сведения

Один из трех видов теплообмена – конвекция, может иметь место в движущихся средах (жидкостях и газах). Перенос теплоты конвекцией осуществляется подвижными объемами (макроскопическими элементами) среды и всегда сопровождается теплопроводностью. Совместный процесс конвекции и теплопроводности называется конвективным теплообменом.

По природе возникновения различают свободную и вынужденную конвекцию. Вынужденная конвекция создается внешними побудителями: насосами, вентиляторами, ветром и т.д.

Если в помещение, воздух которого находится в спокойном состоянии и имеет одинаковую температуру во всем объеме, внести нагретое тело, то между телом и воздухом возникнет теплообмен. Интенсивность теплообмена определяется разностью температур теплообменной поверхности тела и окружающей среды; физическими свойствами среды (теплоемкостью C_P, теплопроводностью λ, плотностью ρ, кинематической вязкостью ν); формой и размерами поверхности тела, ее ориентацией в пространстве.

В основу практических расчетов теплоотдачи нагретого тела при свободном движении жидкости или газа положена формула Ньютона-Рихмана:

$$\Phi_K = \alpha \cdot F\,(Tc - Tж); \qquad (6.1)$$

где $\Phi_К$ – конвективный тепловой поток, Вт; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2 К); F – площадь поверхности тела, м^2; $T_С$ – средняя температура поверхности тела, К; $T_Ж$ - температура жидкости или газа на большом расстоянии от нагретого тела вне зоны, охваченной процессом теплообмена, К.

Для определения $\Phi_К$ необходимо знать α, F, $T_С$, $T_Ж$.

Значения $T_С$, $T_Ж$, F легко измеряются в каждом конкретном случае. Определение α связано со значительными трудностями и теоретически в большинстве случаев невозможно.

При экспериментальном исследовании процесса теплоотдачи коэффициент α определяется из выражения (6.1).

Коэффициент теплоотдачи численно равен количеству теплоты, отдаваемому или воспринимаемому единицей поверхности за единицу времени при разности температур между поверхностью тела и окружающей средой в 1 К.

Значение коэффициента теплоотдачи определяют опытным путем на моделях небольших размеров, а затем на основании теории подобия переносят на промышленные установки.

На основании обобщения многочисленных экспериментальных данных предложено критериальное уравнение для расчета теплообмена при свободной конвекции:

$$Nu = C(Gr\ Pr)^n, \tag{6.2}$$

где Nu – критерий Нуссельта; Gr – критерий Грасгофа; Pr – критерий Прандтля; С и n – экспериментальные величины.

Критерий Нуссельта характеризует интенсивность конвективного теплообмена на границе стенка – жидкость, в так называемом пограничном слое.

Чем интенсивнее происходит теплообмен, тем больше число Nu и коэффициент теплоотдачи α

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda_{æ}}. \tag{6.3}$$

Критерий Грасгофа характеризует соотношение подъемной силы, вызываемой разностью плотностей холодных и нагретых частиц жидкости, и сил молекулярного трения (вязкости), т.е. характеризует интенсивность свободного движения жидкости:

$$G_r = \frac{\beta \cdot d^3 \cdot g \cdot \Delta T}{\nu_{æ}^2}; \tag{6.4}$$

Критерий Прандтля определяет физические свойства жидкости и способность распространения в ней теплоты:

$$Pr = \frac{v}{a_p}; \qquad (6.5)$$

где α – конвективный коэффициент теплоотдачи, Вт/ (м^2 К); d – диаметр трубы, м; λ – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м К); g – ускорение свободного падения, 9,81 м/с^2*;*

$a_P = \frac{\lambda}{C_p \cdot p}$ – коэффициент температуропроводности, м^2/с;

$\beta = \frac{1}{273 + t_{ж}} = \frac{1}{T_{ж}}$ – температурный коэффициент объемного расширения, 1/К;

$\Delta T = T_c - T_ж$ – температурный напор, К.

$\nu_ж$ – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м^2/с:

C_p – массовая теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К); ρ плотность жидкости, кг/м^3.

Определяющей температурой пограничного слоя, при котором выбирают $\lambda_ж$, a_p, C_p, $\rho_ж$, $\nu_ж$ является средняя температура, которая находится по формуле (^{0}С):

$$t = \frac{t_c + t_{ж}}{2}.$$

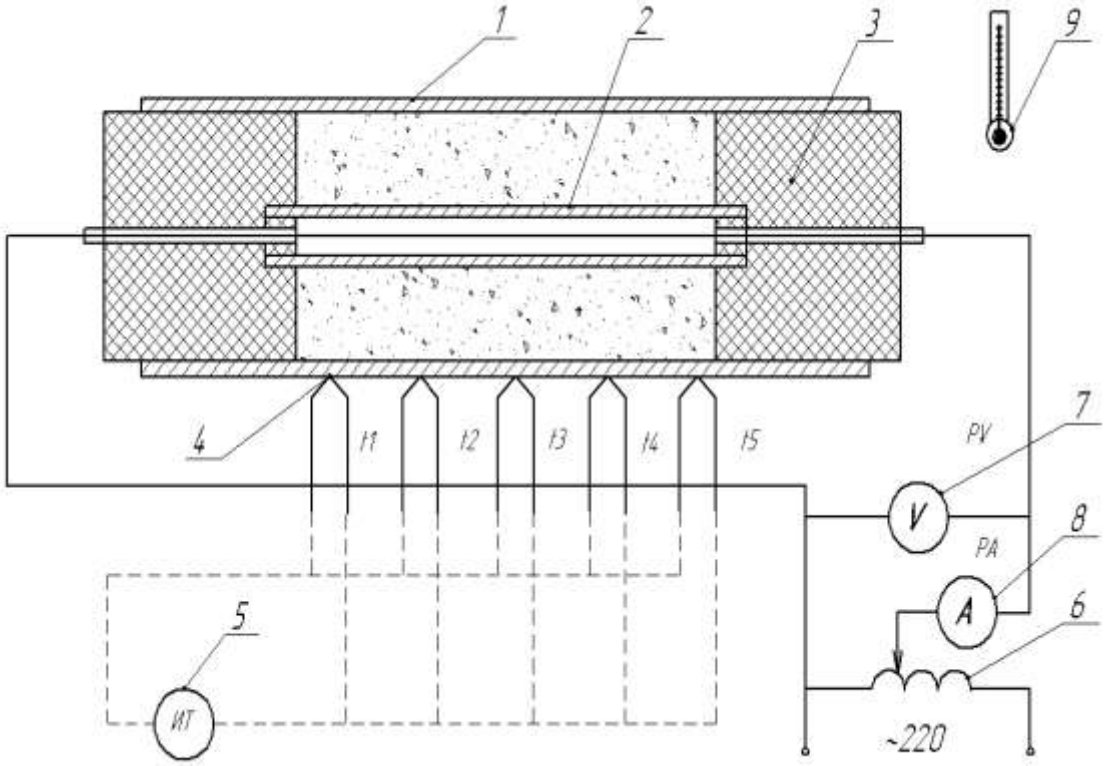


Рис.6.1 **– Схема лабораторной установки**

Описание лабораторной установки

Экспериментальная установка (рис.6.1) выполнена в виде металлической трубы 1 наружным диаметром *d=30 мм* и длиной *l=866 мм,* внутри которой имеется электрический нагреватель 2. С торцов труба закрыта теплоизоляционными пробками 3 для снижения потерь теплоты в осевом направлении.

Температура теплоотдающей поверхности (стены трубы) измеряется пятью хромель-алюминиевыми термопарами 4, расположенными по всей длине трубы на одинаковом расстоянии друг от друга. Для усреднения температуры по периметру трубы термопары расположены на различных участках ее поверхности и закреплены в углублениях для спаев термопар. Температура точек на поверхности трубы измеряется электронным измерителем температуры.

Мощность нагревателя можно регулировать автотрансформатором 6 и определить по показаниям вольтметра 7 и амперметра 8. Количество теплоты, отдаваемое поверхностью трубы окружающему воздуху, принимается равным мощности нагревателя. Температура окружающего воздуха измеряется ртутным термометром 9, расположенным вдали от установки.

Порядок проведения опытов

1. После ознакомления с устройством опытной установки и проверки ее схемы по разрешению преподавателя включают электронагреватель и автотрансформатором 6 устанавливают первый заданный режим. Периодически (через 3...5 минут) контролируют температуру поверхности трубы до наступления установившегося режима, который характеризуется неизменностью показаний измерителя температуры.
2. После установления стационарного режима измеряют силу тока и напряжение на нагревателе, температуру поверхности трубы в точках 1..5, а также температуру окружающего воздуха.
3. Устанавливают по рекомендации преподавателя второй режим, а затем третий, на которых проводят аналогичные измерения. На каждом режиме следует провести не менее трех опытов. Во время опытов следует избегать резких движений около трубы, дверь и окна лаборатории должны быть закрыты.
4. После выполнения опытов снизить ток автотрансформатора до минимума, отключить установку.
5. Результаты опытов записать в протокол измерений (таблица 6.1).

Таблица 6.1 – **Протокол результатов измерений**

	№ пп	Напр. U	Ток I	Мощ-ность P	Тем. среды tср	Температура поверхности трубы					Ср. тем tс
						1	2	3	4	5	
		В	А	Вт	^{0}C	^{0}C	^{0}C	^{0}C	^{0}C	^{0}C	^{0}C
1 режим	1										
	2										
	3										
	ср										
2 режим	1										
	2										
	3										
	ср										
3 режим	1										
	2										
	3										
	ср										

Обработка результатов опытов

Для обработки результатов опытов необходимо пользоваться средними значениями величин, полученных при установившемся режиме.

1. Определяется тепловой поток $\Phi_К$ (Вт), передаваемый трубой путем конвекции:

$$\Phi_К = \Phi_П - \Phi_Л \qquad (6.6)$$

где $\Phi_П$ – суммарный тепловой поток, передаваемый во внешнюю среду конвекцией и излучением (равен мощности нагревателя), Вт; $\Phi_Л$ – тепловой поток, передаваемый излучением, Вт.

Тепловой поток $\Phi_Л$ равен:

$$\hat{O}_{\ddot{E}} = \varepsilon \cdot \tilde{N}_{\hat{i}} \cdot F \cdot \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{æ}}}{100} \right)^4 \right], \qquad (6.7)$$

где ε - степень черноты трубы (для условий опыта ε=0,1), C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, C_0=5,67 Вт/(м^2 К^4); F – площадь поверхности трубы, м^2.

2. Определяют коэффициент теплоотдачи α (по формуле, полученной самостоятельно при подготовке), Вт/(м^2 К).

3. Определяют значения критериев *Nu, Gr, Pr* по формулам (6.3), (6.4), (6.5).

4. Определяют значение *lgNu* и *lg(Gr · Pr)* и строят график

$$lgNu = f(lg(Gr \cdot Pr)). \qquad (6.8)$$

5. Из графика находят постоянные С и n. Зависимость (6.2) в логарифмических координатах выражается прямой

$$lgNu = lgC + n \cdot lg(Gr \cdot Pr)\ . \qquad (6.9)$$

Следовательно, постоянную *n* можно определить как тангенс угола наклона прямой к оси абсцисс, а постоянную *C* из выражения (6.9) для любой точки прямой. Полученное критериальное уравнение справедливо для расчета теплоотдачи в интервале измеренных значений произведения $Gr \cdot Pr$.

6. Полученное опытным путем уравнение подобия необходимо сравнить с формулой (6.2), предложенной Михеевым М.А. Коэффициенты *C* и *n* даны в приложении А.

7. Построить зависимости $\alpha = f(t_c)$.

8. Результаты расчетов занести в протокол обработки измерений (таблица 6.2).

Таблица 6.2 – **Протокол результатов обработки измерений**

№	Полный поток Фп	Конв. поток Фк	Поток излуч. Фл	Коэфф. теплоотдачи α	Nu	Gr·Pr	lg Nu	lg (Gr Pr)	C		n	
									расч	табл	расч	табл
	Вт	Вт	Вт	Вт/м^{2}К								
1												
2												
3												

Содержание отчета

1. Краткое описание работы.
2. Схема установки.
3. Протокол записи показаний измерительных приборов и обработки результатов измерений.
4. Графики зависимостей коэффициента теплоотдачи от температурного напора $\alpha = f(\Delta t)$ и $Nu = f(Gr \cdot Pr)$ в логарифмических координатах.
5. Результаты сравнения критериального уравнения подобия, полученного опытным путем, с уравнением (6.2).
6. Расчет погрешностей (приложение Б).
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1*. Назовите и опишите основные виды теплообмена.
2*. Что представляет собой процесс теплоотдачи от горизонтальной трубы?
3*. Запишите основные уравнения теплоотдачи и уравнение для коэффициента теплоотдачи при конвективном теплообмене.
4. Поясните методику определений коэффициента теплоотдачи.
5. От каких величин зависит коэффициент теплоотдачи?
6. Назовите виды конвекции и режимы движений жидкости и газа.
7. Что такое критерии подобия и критериальное уравнение?
8. Назовите определяющие и неопределяющие критерии подобия, характеризующие конвективный теплообмен. Приведите выражения этих критериев.
9. Что такое определяющая температура и определяющий размер?
10. Опишите характер движения жидкости вблизи горизонтальной трубы.

Литература

1. Теплотехника./ В.Н. Луканин [и др.];/ Под редакцией В.Н. Луканина.- 2-е изд. – М.: Высшая школа, 2000.

Лабораторная работа № 7

Определение коэффициента теплопередачи нагревательного прибора

Цель работы: определение коэффициента теплопередачи нагревательного прибора и его изменение в зависимости от температурного напора.

1. Изучить настоящие методические указания и рекомендуемую литературу.
2. Получить формулу для определения коэффициента теплопередачи нагревательного прибора.
3. Подготовить ответы на контрольные вопросы 1...4.
4. Оформить заготовку письменного отчета по лабораторной работе.

Общие сведения

Наиболее часто встречаемый случай передачи теплоты от тела с высокой температурой к телу с низкой температурой происходит через разделительную стенку. При этом в передаче теплоты одновременно принимают участие все виды теплообмена – теплопроводность, конвекция, лучистый теплообмен. Теплообмен, учитывающий все виды теплообмена, называется сложным теплообменом.

Количественной характеристикой интенсивности процесса сложного теплообмена является коэффициент теплопередачи k. При передаче теплоты через плоскую однородную стенку коэффициент теплопередачи k определяется по формуле

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} . \qquad (7.1)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи на границе «горячий теплоноситель-стенка», Вт/м^{2}К; α_2 – коэффициент теплоотдачи на границе «стенка - холодный теплоноситель», Вт/м^{2}К; δ – толщина стенки, м; λ – коэффициент теплопроводности стенки, Вт/м К.

Примером сложного теплообмена может служить передача теплоты горячего теплоносителя окружающему воздуху через стенку радиатора.

Нагревательные приборы передают теплоту горячей воды или пара отапливаемым помещениям. Они должны удовлетворять определенным теплотехническим, санитарно-гигиеническим и технико-экономическим требованиям.

Основным теплотехническим показателем нагревательного прибора является коэффициент теплопередачи, который равен потоку теплоты,

проходящему через м^2 поверхности нагрева прибора при разности средней температуры теплоносителя и температуры воздуха в помещении в 1°С.

Передача теплоты от теплоносителя к стенке нагревательного прибора осуществляется конвекцией, через стенку прибора – теплопроводностью, от нагревательного прибора воздуху помещения – конвекцией и излучением.

Различают вынужденную и свободную конвекции. Свободная конвекция возникает при наличии разности плотностей холодных и нагретых слоев жидкости. Вынужденная конвекция создается искусственно с помощью вентиляторов и других дутьевых устройств.

Тепловой поток от нагретого тела при естественной конвекции определяют по формуле Ньютона-Рихмана (Вт)

$$Фк = \alpha \cdot F(t_c - t_в), \qquad (7.2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2°С); F – площадь поверхности нагрева, м^2; $t_с$ – средняя температура поверхности нагрева, ^{0}С; $t_в$ – температура воздуха на большом удалении от поверхности нагрева, ^{0}С.

Тепловой поток излучения в практике инженерных расчетов определяют по формуле

$$Фл = \varepsilon \cdot C_0 \cdot F\left[\left(\frac{T_c}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_в}{100}\right)^4\right], \qquad (7.3)$$

где ε – степень черноты, поверхности тела, ε = 0,1; C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, C_0 = 5,67 Вт/(м^2 К^4).

Суммарный тепловой поток, передаваемый нагревательным прибором во внешнюю среду конвекцией и излучением:

$$Ф = Фк + Фл; \qquad (7.4)$$

$$Ф = k \cdot F(t_{пр} - t_в), \qquad (7.5)$$

$$\text{или } Ф = G \cdot C_р (t_1 - t_2) \qquad (7.6)$$

где k – коэффициент теплопередачи нагревательного прибора, Вт/(м^2 ^{0}С); F – поверхность нагрева испытуемого прибора, м^2; $t_{пр} = (t_1+t_2)/2$ – средняя температура теплоносителя в приборе, ^{0}С; t_1 – температура горячей воды на входе в прибор, ^{0}С; t_2 – температура охлажденной воды на выходе из прибора, ^{0}С; G – расход воды через нагревательный прибор, кг/с; $C_р$ – массовая изобарная теплоемкость воды, равная 4,19 кДж/(кг°С).

Описание лабораторной установки

Опытная установка (рис.7.1) представляет собой стальной штампо-

ванный радиатор 1, присоединенный к циркулярному контуру горячей воды, действующему от электрического водонагревателя 2.

Количество горячей воды G, проходящей в единицу времени через нагревательный прибор, измеряется расходомером 3. Установка оборудована краном 4 для выпуска воздуха из прибора и вентилями 5, 6 для изменения расхода воды через радиатор 1.

Температура горячей воды на входе в прибор и охлажденной воды на выходе из прибора измеряется термометрами 7 и 8. Температура окружающего воздуха измеряется термометром, расположенным вдали от установки.

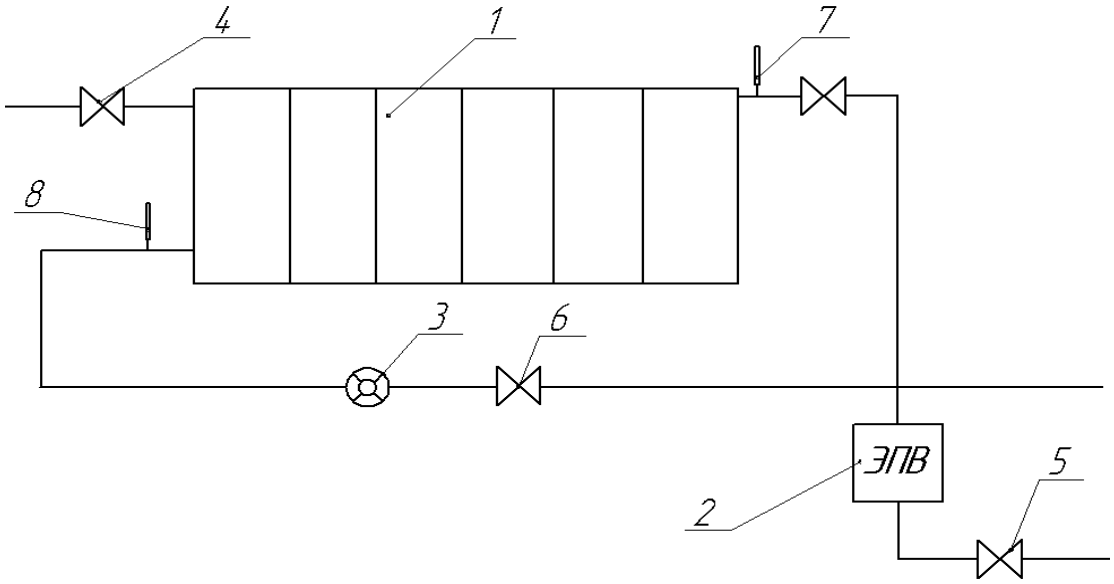


Рис.7.1 – **Схема лабораторной установки**

Таблица 7.1 – **Протокол результатов измерений**

	№ п/п	Расход теплоносителя G, кг/с	Температура воды на входе t_1, ^{0}C	Температура воды на выходе t_2, ^{0}C	Температура окружающей среды $t_в$, ^{0}C
1 режим	1				
	2				
	3				
	ср				
2 режим	1				
	2				
	3				
	ср				
3 режим	1				
	2				
	3				
	ср				

Порядок проведения опытов

1. После ознакомления с устройством опытной установки и проверки ее схемы по разрешению преподавателя открывают вентили 6 и 5 и включают водонагреватель.

2. Расход воды через нагреватель G_1 устанавливается по рекомендации преподавателя.

3. Через 3...5 минут после установления стационарного режима измеряют температуру воды t_1 и t_2 на входе и выходе нагревательного прибора.

4. Устанавливают второй режим при $G_2 < G_1$, проводят аналогичные измерения, а затем третий – при $G_3 < G_2$. На каждом режиме следует провести не менее трех опытов через 2...3 минуты.

5. Отключить установку, закрыть вентили.

6. Результаты измерений записывают в таблицу 7.1.

Для обработки результатов опытов следует пользоваться средними значениями величин, полученных при установившемся режиме.

1. Определяют полный тепловой поток нагревательного прибора Ф по выражению (7.6).

2. Определяют коэффициент теплопередачи нагревательного прибора k по формуле, полученной из выражения (7.5).

3. Определяют тепловой поток излучением Фл по формуле (7.3).

4. Определяют конвекционный тепловой поток по формуле (7.4).

5. Расчеты записать в протокол обработки измерений (таблица 7.2).

6. Строятся графики зависимости $k=f(\Delta t)$ и $\Delta t=f(G)$.

Таблица 7.2 **– Протокол результатов обработки измерений**

Режим работы	Средняя температура теплоносителя $t_{пр}$, ^{0}C	Температурный напор $(t_{пр} - t_в)$, ^{0}C	Коэфф. теплопер. прибора k, Вт/(м^2 ^{0}C)	Полный тепловой поток прибора $Ф_п$, Вт	Тепловой поток излучения Фл, Вт	Конвек. тепловой поток Фк, Вт
I						
II						
Ш						

Содержание отчета

1. Краткое описание работы.
2. Принципиальная схема установки.
3. Протокол записи показаний измерительных приборов.
4. Обработка результатов опытов.

5. Графики зависимостей коэффициента теплопередачи от температурного напора.
6. Графики зависимостей температурного напора от расхода воды через прибор.
7. Сопоставление результатов опытов с расчетными данными.
8. Расчет погрешностей (приложение Б).
9. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1*. Что представляет собой процесс теплопередачи?
2*. Что показывает коэффициент теплопередачи нагревательного прибора?
3*. Как определить коэффициент теплопередачи прибора?
4*. От каких величин и факторов зависит коэффициент теплопередачи прибора?
5. Как определить коэффициент теплопередачи через термические сопротивления?
6. Как определить тепловой поток через плоскую однослойную стенку?
7. Что такое температурный напор?
8. Что такое термическое сопротивление теплопередачи, единицы измерения?
9. Как определить тепловой поток при теплопередаче через плоскую многослойную стенку?
10. Объясните механизм передачи теплоты через плоскую однослойную стенку.

Литература

1. Драганов Б.Х. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве. / Б.Х. Драганов и др. – М.: Агропромиздат, 1990.
2. Захаров А.А. Практикум по применению теплоты в сельском хозяйстве.- М.: Агропромиздат, 1985.
3. Теплотехника./ В.Н. Луканин [и др.];/ Под редакцией В.Н. Луканина.- 2-е изд. – М.: Высшая школа, 2000.

Лабораторная работа № 8

Исследование отопительно-вентиляционного агрегата

Цель работы: определить коэффициент теплопередачи отопительно-вентиляционного агрегата, а также производительность по воздуху и тепловую мощность агрегата.

Задание для предварительной подготовки

1. Изучить настоящие методические указания и рекомендуемую литературу.
2. Подготовить ответы на контрольные вопросы 1...2.
3. Оформить заготовку письменного отчета по лабораторной работе.

Общие сведения

В системах воздушного отопления с сосредоточенной подачей нагретого воздуха широко применяются отопительно-вентиляционные агрегаты, работающие при полной или частичной рециркуляции воздуха помещения.

Агрегат включает в себя пароводяной калорифер и вентилятор с электродвигателем. В отличие от вентиляционной установки обычного типа, где калорифер располагают до вентилятора, во всасывающем потоке воздуха, в отопительно-вентиляционном агрегате калорифер устанавливают за вентилятором, на линии нагнетания воздуха, а это несколько увеличивает его теплоотдачу.

Коэффициент теплопередачи калорифера (Вт/м^2°С), представляющий собой поток теплоты (Вт), передаваемый от теплоносителя воздуху через 1 м^2 поверхности нагрева при разности температур между теплоносителем и воздухом в 1^{0}С определяют по формуле

$$K = \frac{\Phi}{F_k \cdot \Delta t_{cp}}, \qquad (8.1)$$

где Ф – тепловой поток, отдаваемый теплоносителем воздуху в калорифере, Вт; Fк – площадь поверхности нагрева калорифера, м^2; $\Delta t_{ср}$ – средний температурный напор, ^{0}С.

Средний температурный напор находят из выражения

$$\Delta t_{cp} = \zeta \frac{(t' - t''в) - (t'' - t''в)}{\ln \frac{t' - t''в}{t'' - t'в}}, \qquad (8.2)$$

где t’ и t’’ – температура теплоносителя на входе в калорифер и на выходе из него, ^{0}C; $t'_в$ и $t''_в$ – температура воздуха до и после калорифера, ^{0}C.

Коэффициент ζ, учитывающий особенности перекрестной схемы движения сред в теплообменном аппарате, определяют по графику (рис.8.1) как функцию параметров:

$$P = \frac{t''_в - t'_в}{t' - t'_в},$$

$$R = \frac{t' - t''}{t''_в - t'_в}$$

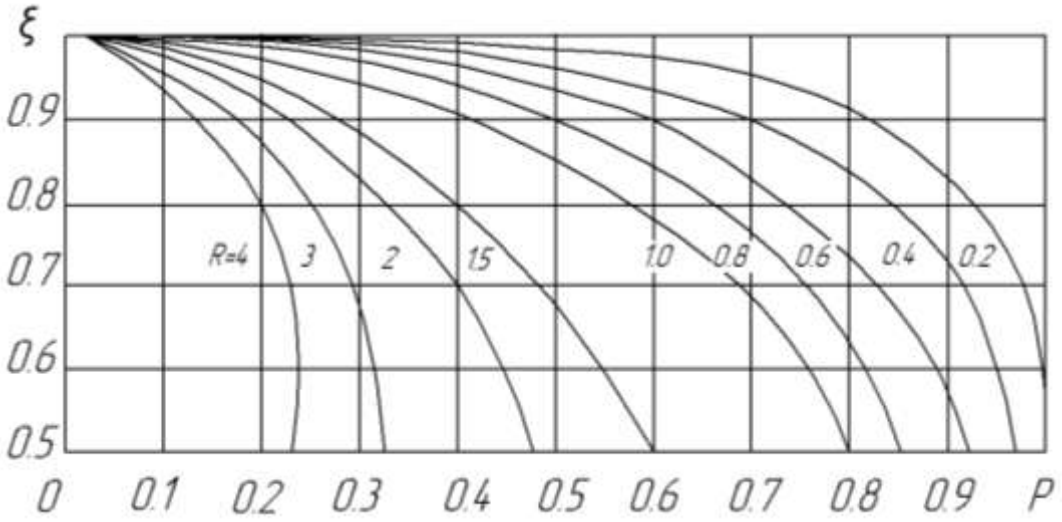


Рис 8.1 – **График зависимости ζ, = *f(P,R)***

Значение теплового потока Ф находят по формуле

$$Ф=0{,}278G\cdot C_p\cdot(t'-t''), \qquad (8.3)$$

где G – расход горячего теплоносителя через калорифер, кг/ч; C_p – массовая теплоемкость теплоносителя, равная для воды 4,19 кДж/(кг^{0}C).

При измерении расхода теплоносителя-воды ротаметром

$$G=L\cdot\rho, \qquad (8.4)$$

где *L* – расход теплоносителя по ротаметру, м^3/ ч; *ρ* – плотность теплоносителя-воды при температуре *t''*, кг/м^3;

При определении расхода при помощи мерного бака

$$G = m/t\ , \qquad (8.5)$$

где *m* – масса теплоносителя, прошедшего через калорифер за время опыта, кг; *t* – продолжительность опыта, с.

Производительность отопительно-вентиляционного агрегата по воздуху ($м^3$/ч) определяют по формуле:

$$Lв=3600\ F \cdot w, \qquad (8.6)$$

где *F* – площадь поперечного сечения нагнетательного воздуховода, $м^2$; *w* –средняя скорость потока воздуха в нагнетательном воздуховоде, м/с, равная 0,3 м/с.

Тепловой поток агрегата (Вт) находят из выражения:

$$Фв=0,278\ Lв \cdot \rho \cdot C_р\ (t''_в - t'_в), \qquad (8.7)$$

где *Lв* – производительность агрегата по воздуху, $м^3$/ч; *ρ* – плотность воздуха при температуре *t''в*, кг/ $м^3$; $C_р$ – удельная изобарная теплоемкость воздуха, равная 1,003 кДж/(кг^{0}С).

К.п.д. рекуперации определяют по формуле:

$$\eta = \frac{t''_в - t'_в}{t' - t'_в}, \qquad (8.8)$$

Описание лабораторной установки

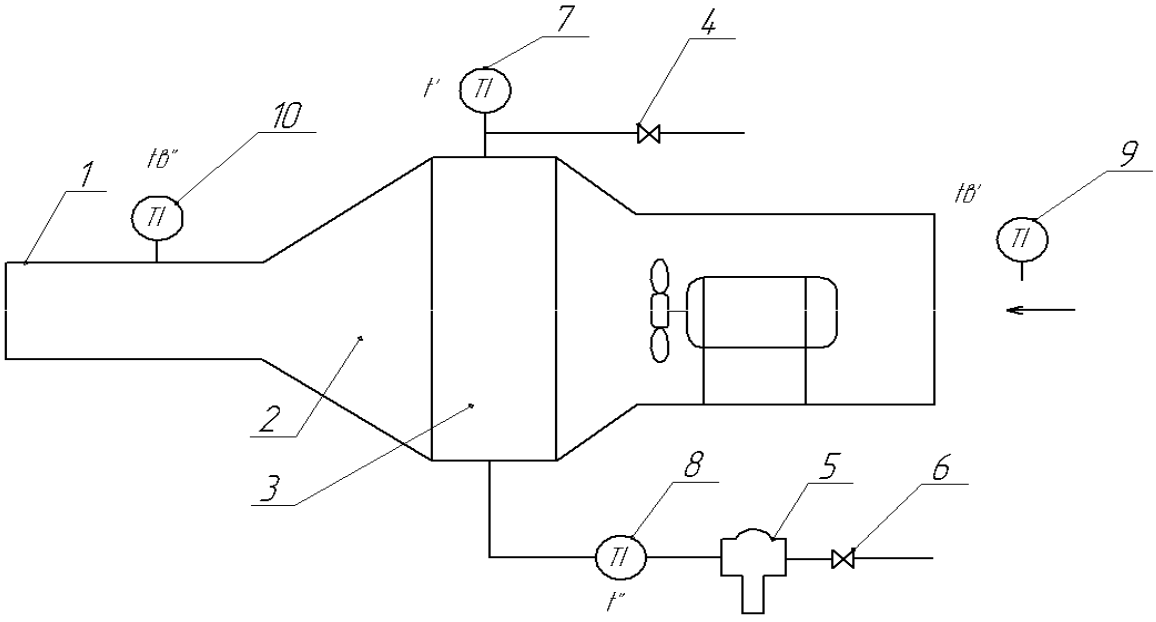


Рис.8.2 – **Схема лабораторной установки**

Лабораторная установка (рис.8.2) включает в себя водяной калорифер и вентилятор с электродвигателем, объединенные общим кожухом. К

агрегату 3 вместо жалюзи, направляющих поток нагретого воздуха, при помощи конфузора 2 присоединен прямоугольный воздуховод 1. Теплоноситель-вода подается в калорифер 3 через вентиль 4. Расход ее определяется ротаметром 5. Расход теплоносителя регулируют вентилем 6. Температуру до калорифера и после него определяют соответственно термометрами 7,8; температуру воздуха – термометрами 9,10.

Порядок проведения опытов

1. Открыв вентили 4 и 6, включают вентилятор установки.
2. Вентилем 6 устанавливают такой расход теплоносителя, чтобы был в пределах шкалы ротаметра.
3. После установления стационарного режима, т.е. через 10...15 мин. работы установки, проводят первые измерения. Расход теплоносителя и воздуха определяют один раз за опыт, который длится 10..12 мин. Показания всех термометров записывают через каждую минуту.
4. Результаты измерений и последующих расчетов сводят в таблицу 8.1.
5. По окончании измерений установку выключают.

Таблица 8.1 – Протокол результатов измерений и их обработки

№	Теплоноситель					Воздух					$\Delta t_{ср}$	k	η
	t’	t’’	L	G	Ф	$t'_в$	$t''_в$	w	$L_в$	$Ф_в$			
	^{0}C	^{0}C	м^3/ч	кг/ч	Вт	^{0}C	^{0}C	м/с	м^3/ч	Вт	^{0}C	Вт/(м$^2\cdot{}^0$C)	

Обработка результатов опытов

Все расчетные параметры определяют по приведенным выше формулам. Значения Ф, $Ф_в$ и $\Delta t_{ср}$ вычисляют по средним входным и выходным температурам теплоносителя и воздуха, которые находят как среднее арифметическое показание соответствующих термометров за все измерения.

Полученные значения $Ф_в$ будут несколько ниже соответствующих значений Ф, так как часть теплоты передается в окружающую среду через стенки установки.

Содержание отчета

1. Краткое описание работы.
2. Схема отопительно-вентиляционного агрегата.

3. Протокол измерений и результатов расчетов.
4. Зависимости $k = f(\Delta t_{ср})$.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1*. Какие преимущества и недостатки имеют отопительно-вентиляционные агрегаты по сравнению с обычными приточными вентиляционными камерами с подогревом воздуха?
2*. Что представляет собой коэффициент теплопередачи калорифера?
3. Как учитывается особенность перекрестного движения сред в отопительно-вентиляционном агрегате?
4. От чего зависит производительность по воздуху и тепловой поток агрегата?
5. Что характеризует к.п.д. рекуперации?
6. Как определить коэффициент теплопередачи калорифера, зная скорость теплоносителя в трубках и массовую скорость воздуха?
7. Что такое фактическая теплоотдача калорифера? Как она определяется?
8. Пояснить работу рекуперативного теплообменника.
9. Какие схемы движения теплоносителей применяются в рекуперативных теплообменниках?

Литература

1. Драганов Б.Х. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве. / Б.Х. Драганов и др. – М.: Агропромиздат, 1990.
2. Захаров А.А. Практикум по применению теплоты в сельском хозяйстве.- М.: Агропромиздат, 1985.
3. Теплотехника./ В.Н. Луканин [и др.];/ Под редакцией В.Н. Луканина.- 2-е изд. – М.: Высшая школа, 2000. .

Лабораторная работа № 9

Изучение процесса конвективной сушки

Цель работы: экспериментальное изучение процесса конвективной сушки, получение кривых сушки и скорости сушки, а также температурной кривой.

Задание для предварительной подготовки

1. Изучить настоящие методические указания и рекомендуемую литературу.
2. Получить формулу дли определений массы сухого материала m_c по равновесному влагосодержанию и массе материала в конце сушки.
3. Подготовить ответы на контрольные вопросы 1...3.
4. Оформить заготовку письменного отчета по лабораторной работе.

Общие сведения

Удаление влаги из материалов можно осуществить механическим способом – фильтрованием, прессованием, центрофугированием; сорбционным способом – в контакте с гигроскопическим веществом (хлористым кальцием и др.), а также посредством сушки.

Среди указанных способов удаления влаги из вещества наибольшее распространение получила сушка.

Сушка различных материалов является процессом удаления поглощенной влаги из материалов путем ее испарения, сопровождающимся изменением технологических свойств материала.

В процессе сушки подвод теплоты к материалу может осуществляться теплопроводностью, конвекцией, излучением или комбинацией этих способов. В соответствии с указанными способами передачи теплоты выделяют кондуктивный (контактный), конвективный, радиационный способы сушки, а также широко применяют комбинированный способ: конвективный совместно с кондуктивным, высокочастотным или радиационным и др.

В тех случаях, когда необходимо сохранить первоначальные свойства материала, применяют сушку в условиях вакуума, в том числе сушку сублимацией (молекулярная сушка). Наиболее распространен конвективный способ сушки, когда теплоносителем (агентом сушки) является воздух, дымовые газы или перегретый пар.

Скорость процесса сушки влажного материала зависит от интенсивности внешнего и внутреннего тепло- и массообмена. Под внутрен-

ним тепло- и массообменом понимают совокупность процессов переноса теплоты и перемещения влаги внутри сушимого материала, которые в некоторых случаях решающим образом влияют на скорость сушки, т.к. от этих процессов зависит количество влаги, подведенное к поверхности испарения.

Изменение в процессе сушки физико-механических свойств влажного материала зависит в первую очередь от коллоидно-физических свойств и формы связи влаги с материалом.

В процессе сушки происходит разрыв связи влаги с твердым веществом, на что затрачивается определенное количество энергии. Энергией связи называют работу отрыва одного моля воды при постоянной температуре без изменения состава вещества.

Схема классификации форм связи влаги с материалом, предложенная академиком П.А. Ребиндером, построена по принципу интенсивности энергии связи. Все формы связи, согласно этой схеме, делятся на три большие группы: химическая связь, физико-химическая связь, физико-механическая связь. Химическая связь характеризуется строго определенными молекулярными соотношениями (стехиометрическая связь), к ней относится ионная связь (вода-гидрата, связанная в виде гидроксильных ионов) и связь в виде молекулярных соединений типа кристаллогидратов в строгих количественных соотношениях, например,

$$Na_2SO_4 - 10H_2O,\ CuSO_4 - 5H_2O.$$

Такая связь наиболее прочна и может быть нарушена лишь в результате химического взаимодействия. В процессе сушки химически связанная влага, как правило, не удаляется.

Физико-химическая связь существует в различных, не строго определенных соотношениях. К ней относятся адсорбционная и осмотическая связь.

Под адсорбционно связанной влагой понимают жидкость, которая удерживается на внешней поверхности макромолекул (мицелл). При поглощении влаги выделяется теплота и происходит контракция (сжатие) тела, т.е. объем тела, поглотившего количество влаги, становится меньше суммы объемов сухого вещества и поглощенной влаги, хотя в общем имеет место набухание тела (увеличение в размерах по сравнению с размерами сухого вещества). Удаление прочно связанной с телом адсорбционной влаги возможно при больших затратах энергии. При этом адсорбционно связанная жидкость сначала испаряется в материале, а затем перемещается в виде пара к его поверхности.

Осмотически связанная влага характеризует вторую стадию набухания материала. Влага проникает внутрь коллоидного тела через полупроницаемые оболочки и находится в замкнутых ячейках структуры материала. Поглощение влаги происходит без контракции системы тело-

вода и выделения теплоты. Осмотически поглощенная влага за счет разности концентрации внутри и вне клеток может диффундировать внутри тела в виде жидкости через стенки клеток. Для удаления этой формы влаги требуется меньшая затрата энергии, чем при адсорбционной.

Физико-механическая связь есть удержание воды в неопределенных соотношениях. К этой форме относится жидкость, находящаяся в макро- и микрокапиллярах, и жидкость смачивания (прилипание воды при непосредственном соприкосновении с поверхностью тела). К микрокапиллярам относятся поры, радиус которых меньше средней длины свободного пробега молекул ($r<10^{-5}$ см). Макрокапилляры заполняются влагой только при непосредственном соприкосновении их с водой, а микрокапилляры как при непосредственном соприкосновении с жидкостью, так и при поглощении ее из влажного воздуха.

Жидкость в капиллярах, ограниченная свободными менисками, является свободной влагой. Она наименее связана с материалом и в процессе сушки удаляется в первую очередь. Эта влага в большинстве случаев перемещается к зоне испарения, расположенной у поверхности материала, в виде жидкости; а затем превращается в пар и удаляется. Последней удаляется адсорбционно-связанная влага как наиболее прочно связанная с материалом. Ее удаление происходит в основном в виде пара.

При соприкосновении влажного материала с нагретым воздухом влага на поверхности начинает испаряться в окружающую среду. Испарение влаги с поверхности создает перепад влагосодержания между внутренними и поверхностными слоями, что вызывает перемещение влаги к поверхности материала под действием градиента влагосодержания. Таким образом, в процессе сушки наблюдается непрерывный подвод влаги от внутренних слоев к поверхности, вследствие чего уменьшается среднее влагосодержание материала. Изменение среднего влагосодержания и средней температуры материала в процессе сушки составляет кинетику этого процесса. На рис.9.1 приведена примерная кривая изменения среднего влагосодержания материала во времени при сушке нагретым воздухом. Подобные зависимости называются кривыми сушки. Как видно из рис 9.1 на кривой сушки можно выделить ряд характерных периодов:

1. Период прогрева (участок 1) характеризуется увеличением температуры материала от $t_н$ до $t_м$, уменьшением среднего влагосодержания от $U_н$ до промежуточного значения и увеличением скорости сушки $N = -\frac{dU}{d\tau}$ от нуля до максимального значения.

2. Период постоянной скорости сушки, что наглядно видно на нижней кривой. Интенсивность испарения с поверхности влажного

материала в этом периоде при мягких режимах сушки, совпадает с интенсивностью испарения жидкости со свободной поверхности при тех же параметрах теплоносителя.

При мягких режимах сушки, характеризующихся небольшой температурой и скоростью движения воздуха при достаточно большой его влажности, температура материала не изменяется в течении всего периода и равна температуре мокрого термометра, а парциальное давление пара у поверхности испарения равно давлению насыщения при температуре мокрого термометра.

Изменение влагосодержания во времени в этом периоде происходит линейно и зависит лишь от условий теплообмена теплоносителя и сушимого материала. Повышение температуры и скорости воздуха и уменьшение его относительной влажности приводит к увеличению количества переданной материалу теплоты и пропорциональному уменьшению его влагосодержания, так как нагрев материала не происходит и вся переданная теплота тратится на испарение влаги.

3. Период убывающей скорости сушки. Период постоянной скорости сушки продолжается до некоторого влагосодержания Uкр, называемого критическим. Начиная с этого момента (участок 3), температура материала непрерывно повышается, стремясь к температуре омывающего воздуха t_c, а скорость сушки непрерывно убывает от максимального своего значения до нуля. Скорость сушки равна нулю после достижения материалом равновесного влагосодержания Up.

Описание лабораторной установки

Основными элементами экспериментальной сушильной установки (рис.9.2) являются тепловентилятор 1 с регулятором температуры 2, воздуховод 4, сушильная камера 6, весы 7, термометры 3 и 5.

Тепловентилятором 1 воздух заданной температуры tc подается по воздуховоду 4 и направляется в сушильную камеру 6. Нагретый воздух омывает образец и выходит наружу. Вес образца в процессе сушки периодически определяется с помощью весов 7.

Регулирование температуры воздуха, поступающего в сушильную камеру, осуществляется изменением положения ручки регулятора температуры. Измерение температуры воздуха после тепловентилятора и температуры материала производится термометрами 3 и 5.

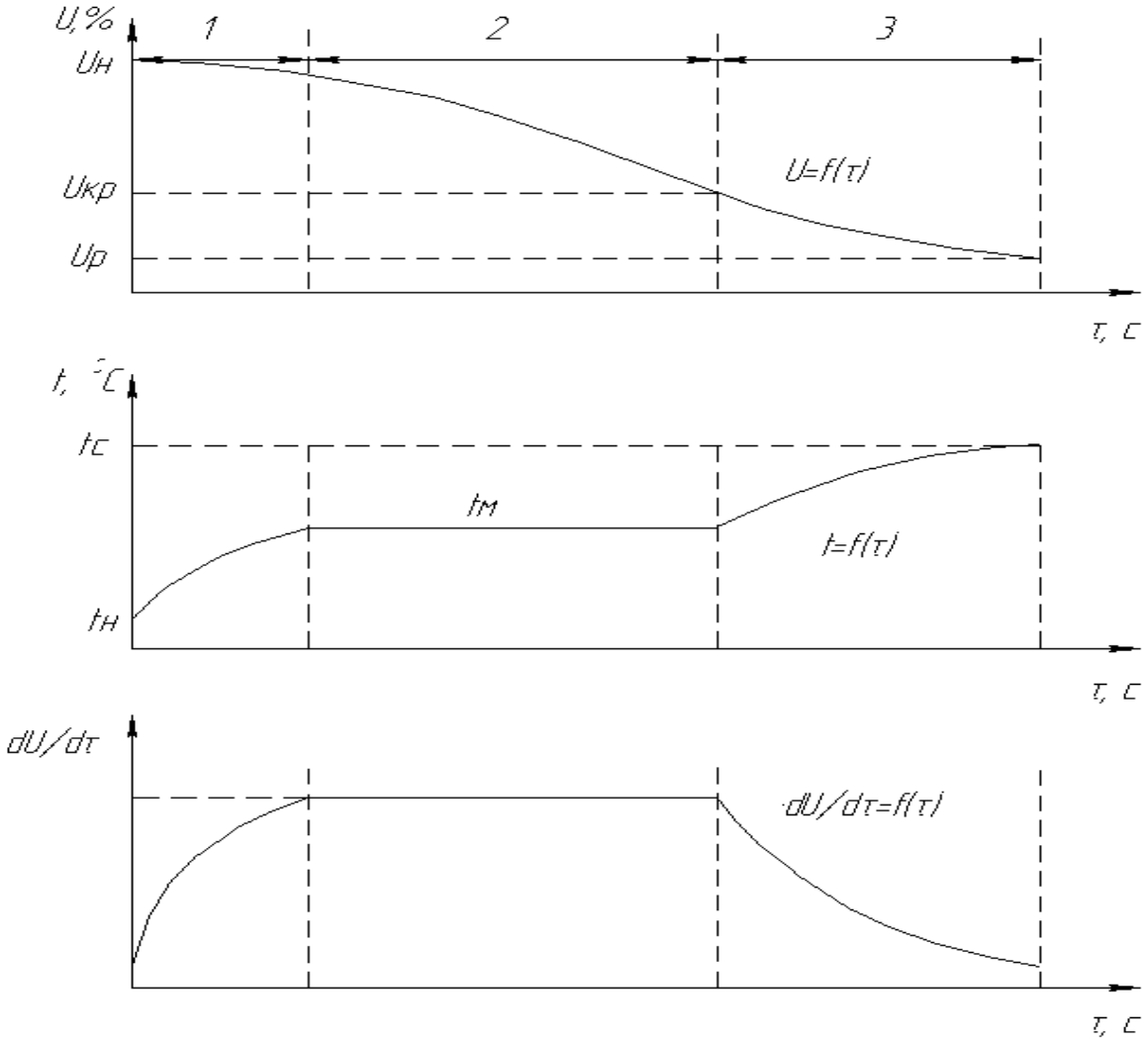


Рис. 9.1 – **Кривые сушки**

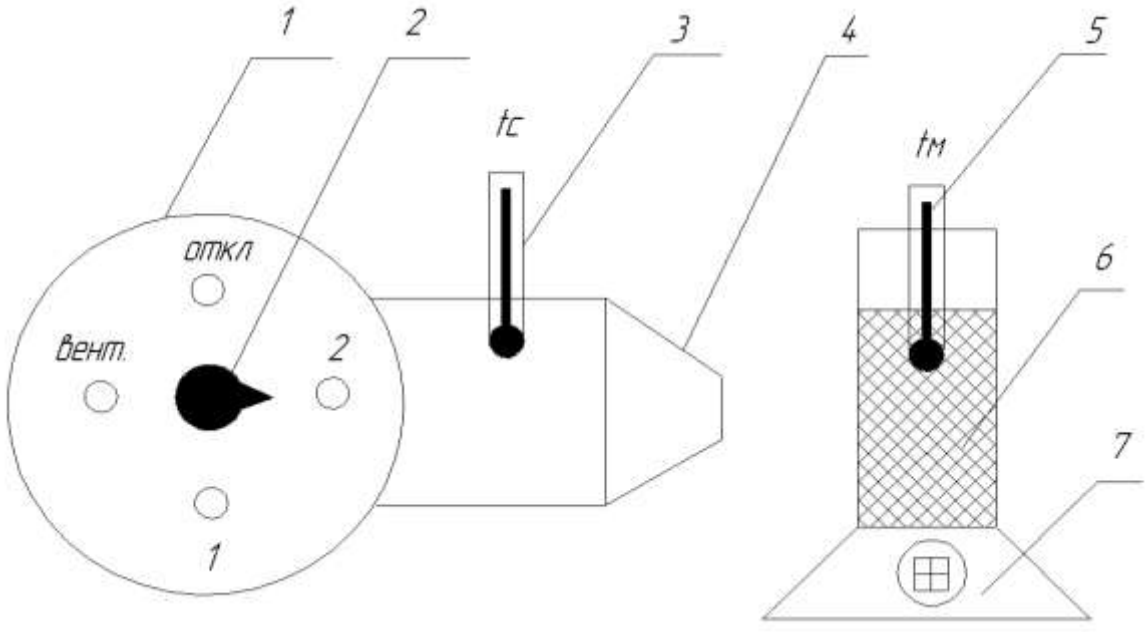


Рис. 9.2 – **Схема лабораторной установки**

Порядок проведения работы

Перед началом опыта включают тепловентилятор установки и по рекомендации преподавателя устанавливают режим сушки (положение регулятора температуры 1 или 2).

Заполняют кювету влажным материалом и помещают в него термометр. Включают весы и проверяют их работу.

После достижения стационарного режима кювету с образцом устанавливают на весы и фиксируют начальную массу.

В ходе опыта через 1 минуту записывают температуру образца и его массу.

Опыт продолжается до тех пор, пока масса образца станет практически постоянной, а температура материала приблизится к температуре воздуха перед сушильной камерой.

В конце сушки материал достигает равновесного влагосодержания, которое определяется равенством давлений паров воды в материале и агенте сушки. В большинстве случаев равновесное влагосодержание Up = 10..15%.

Результаты измерений заносят в протокол измерений (таблица 9.1).

Обработка результатов опытов

По результатам измерений построить температурную кривую сушки и кривую скорости сушки (подобно рис.9.1).

1. Температурную кривую ($t_м = f(\tau)$ строят непосредственно по результатам измерений.

2. Для построения кривой сушки определяют влагосодержание материала в каждой точке

$$U = \frac{m_в - m_c}{m_c} \cdot 100$$

где $m_в$ – масса влажного материала, кг; m_c – масса сухого материала (определяется по последнему значению массы влажного материала и равновесному влагосодержанию Up), кг.

Результаты расчетов заносят в протокол (таблица 9.1).

3. Скорость сушки является первой производной влагосодержания по времени $N = -\frac{dU}{d\tau}$ (знак минус указывает на уменьшение U.). Для определения значений скорости сушки используется метод графического дифференцирования. Производная численно равна тангенсу угла наклона ($tg\alpha$) касательной относительно оси абсцисс - τ. Для характерных точек кривой сушки строят касательные и находят значения $tg\alpha$. Результаты

расчетов заносят в таблицу 9.1. Для периода линейного изменения влагосодержания скорость сушки *N* – величина постоянная.

4. Определяют критическое влагосодержание *Uкр*.

Таблица 9.1 – **Протокол результатов измерений и их обработки**

№ п/п	Время t, с	Температура после тепловентилятора t_c , ^{0}C	Температура образца $t_м$, ^{0}C	Масса влажного материала $m_в$, кг	Масса сухого материала m_c, кг	Масса влаги $m_в$-m_c, кг	Влагосодержание U ,%	Скорость сушки tgα, %/^{0}C
1								
2								
3								

Содержание отчета

1. Краткое описание работы.
2. Принципиальная схема установки.
3. Протокол измерений.
4. Обработка результатов опытов.
5. Кривые сушки, скорости сушки и температурная кривая.
6. Расчет погрешностей (приложение Б).
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1*. Формы связи влаги с материалом. Особенности удаления влаги при различных формах связи.
2*. Какие применяются способы удаления влаги из материала?
3*. Поясните метод определения скорости сушки.
4. Как определить влажность материала?
5. Сформулируйте определение сушки. Какие способы сушки применяются в сельском хозяйстве?
6. Дать определение характеристик кинетики процесса сушки: кривой сушки, скорости сушки, температуры сушки. Объяснить, как строятся указанные зависимости.
7. Какие периоды сушки различают? Особенности каждого периода сушки.
8. Смысл критической влажности. Как установить значение критической влажности с помощью кривой сушки?

Литература

1. Драганов Б.Х. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве. / Б.Х. Драганов и др. – М.: Агропромиздат, 1990.
2. Теплотехника./ В.Н. Луканин [и др.];/ Под редакцией В.Н. Луканина.- 2-е изд. – М.: Высшая школа, 2000.

Лабораторная работа № 10

Испытание поршневого компрессора

Цель работы: определение производительности одноцилиндрового поршневого компрессора, политропной мощности, объемного коэффициента и коэффициента подачи.

Задание для предварительной подготовки

1. Изучить настоящие методические указания и рекомендуемую литературу.
2. Получить формулу для определения показателя политропы по температурам и давлениям в двух точках.
3. Подготовить ответы на контрольные вопросы 1...3.
4. Оформить заготовку письменного отчета по лабораторной работе.

Общие сведения

Машины, служащие для сжатия и перемещения газов, называются компрессорами.

По принципу действия и устройству компрессоры подразделяются на поршневые с возвратно-поступательным движением поршня, ротационно-пластинчатые, центробежные, осевые, винтовые, мембранные и струйные. Компрессоры используются для снабжения сжатым воздухом пневматического инструмента, для сжатия и транспортировки газов в газопроводах, для наддува поршневых двигателей внутреннего сгорания, в тормозных системах, холодильных установках и т.д.

В лабораторной работе предусмотрено испытание одноцилиндрового поршневого компрессора. Реальный поршневой компрессор рассчитывается и строится так, что при его работе остается вредное пространство. Объем вредного пространства $V_{вр}$ слагается из небольшой части цилиндра, заключенной между крышкой и днищем поршня в момент нахождения его в верхней мертвой точке, и объема двух каналов, соединяющих полость цилиндра с всасывающим и нагнетательным клапанами.

Теоретическая диаграмма поршневого компрессора с учетом вредного пространства представлена на рис. 10.1.

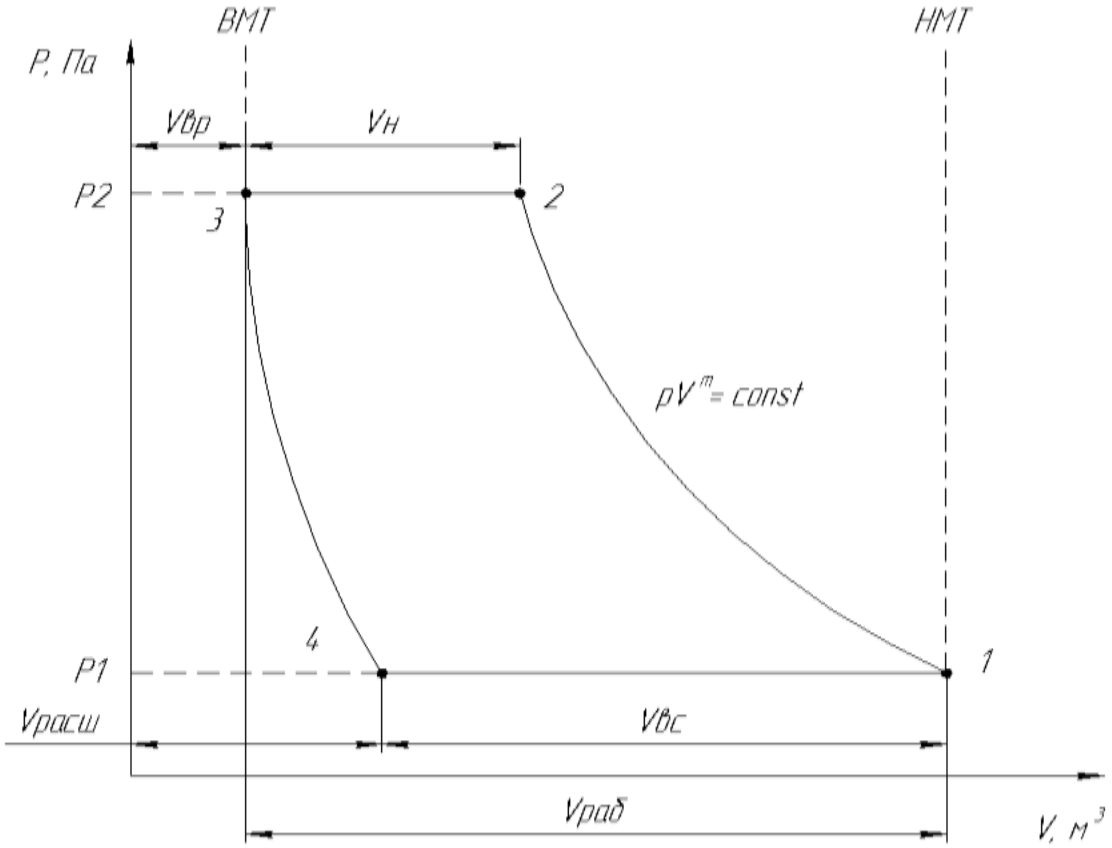


Рис.10.1 – **Теоретическая диаграмма поршневого компрессора**

Отношение объема вредного пространства $V_{вр}$ к рабочему объему цилиндра $V_{раб}$ называется коэффициентом вредного пространства σ

$$\sigma = \frac{V_{вр}}{V_{раб}} \ . \qquad (10.1)$$

В современных компрессорах σ = 0,025 –0,08. Для компрессора, используемого в лабораторной работе, σ = 0,06.

В процессе нагнетания во вредном пространстве остается сжатый воздух, поэтому всасывание может начаться лишь после того, как газ расширится, и давление его снизится настолько, что давление с внешней стороны всасывающего клапана сможет преодолеть усилие пружины и открыть его. Таким образом, часть объема, описываемого поршнем, окажется потерянной, и объем всасывания составит лишь некоторую долю рабочего объема цилиндра. Эта доля определяется объемным или валюметрическим коэффициентом компрессора $\lambda_{об}$.

$$\lambda_{об} = \frac{V_{вс}}{V_{раб}}, \qquad (10.2)$$

где $V_{вс}$ – объем всасывания.

С увеличением относительной величины вредного пространства объем всасывания, а значит, и производительность компрессора уменьшаются. Производительность компрессора уменьшается с уменьшением показателя политропы расширения m и с увеличением степени повышения давления:

$$E = \frac{P_2}{P_1}. \qquad (10.3)$$

Весьма жестким фактором ограничения степени сжатия в одной ступени компрессора является температура. Максимально возможная температура при сжатии воздуха в компрессоре определяется условиями безопасности и ограничивается значениями 160-180 ºС. При повышении температуры до 220-240 ºС могут воспламениться пары масла, вводимого в цилиндр для смазки, и вызвать взрыв в нагнетательном воздуховоде.

При работе компрессора всегда имеет место нагрев воздуха от горячих частей и утечка через неплотности. Учет этих обстоятельств осуществляется соответственно термическим коэффициентом $\lambda_т$ и коэффициентом герметичности $\lambda_г$.

Действительный объем всасывания компрессора

$$V_{вс} = \lambda_{об} \cdot \lambda_т \cdot \lambda_г \cdot V_{раб}. \qquad (10.4)$$

Произведение $\lambda = \lambda_{об} \cdot \lambda_т \cdot \lambda_г$ называется коэффициентом подачи. Коэффициент подачи характеризует степень использования рабочего объема цилиндра и зависит от состояния износа компрессора. При хорошем компрессоре λ = (0,9-0,98) $\lambda_{об}$. Теоретически возможная производительность компрессора простого действия вычисляется по формуле

$$V_т = V_{раб}\, n = 0{,}785 \cdot d^2 \cdot S \cdot n \cdot i, \qquad (10.5)$$

где d – диаметр цилиндра, м; S – ход поршня, м; n – частота вращения вала, $с^{-1}$; i – число цилиндров.

Действительная производительность компрессора

$$V = \lambda \cdot V_г. \qquad (10.6)$$

Описание лабораторной установки

Установка выполнена на базе одноцилиндрового компрессора 1, приводимого в действие через ременную передачу от трехфазного электродвигателя 2. Поршень 3 совершает возвратно-поступательное движение в цилиндре 4. Крайние положения поршня в цилиндре называются

мертвыми точками: верхней мертвой точкой (ВМТ) и нижней мертвой точкой (НМТ). Цилиндр компрессора имеет два клапана – впускной 5 и выпускной 6. При движении поршня от ВМТ до НМТ в цилиндре впускной клапан открыт и происходит засасывание воздуха в цилиндр. При обратном движении цилиндра от НМТ до ВМТ сначала происходит сжатие воздуха до давления, превышающего давление с противоположной стороны выпускного клапана, после чего последний открывается и сжатый воздух подается в ресивер-газосборник 7. Ресивер служит для накопления воздуха и сглаживания пульсации давления воздуха. Регулирование режимов работы компрессора (изменение давления в ресивере) осуществляется вентилем 8.

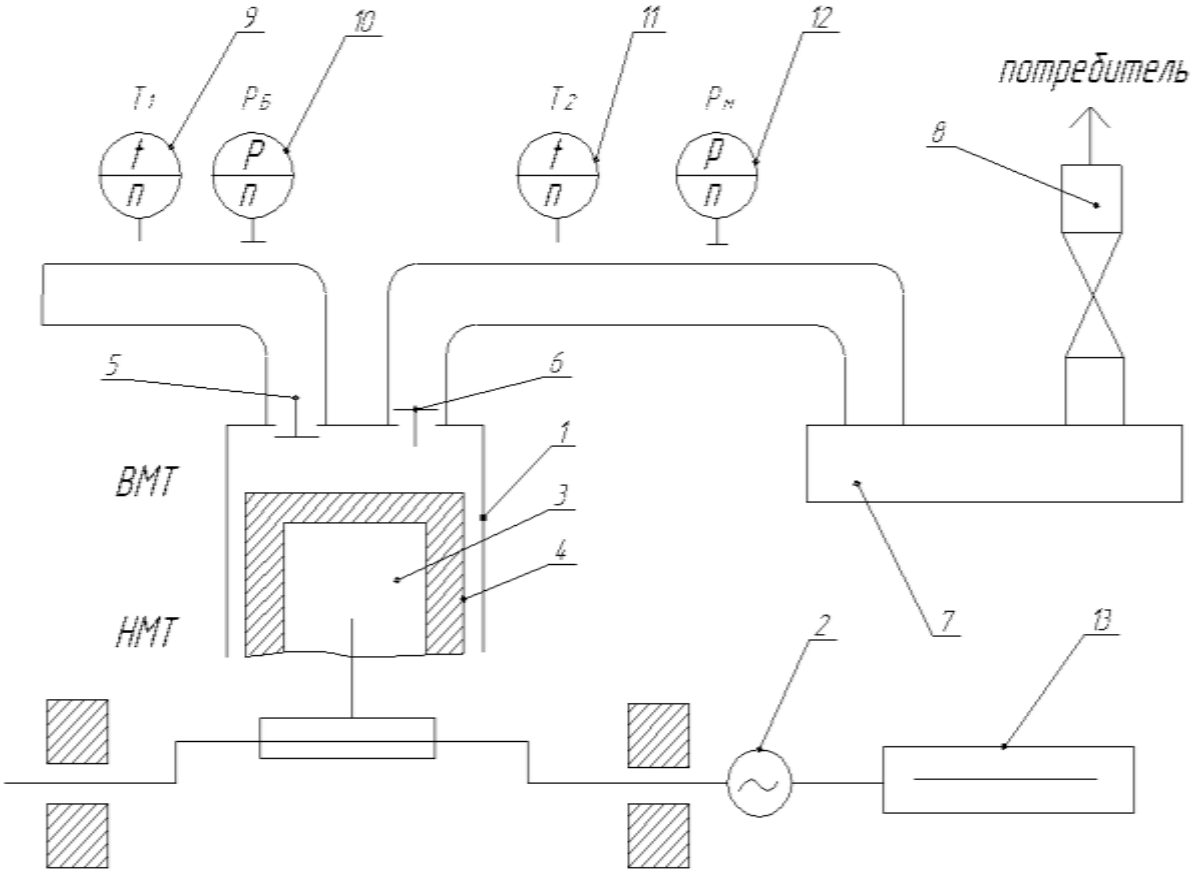


Рис.10.2 – **Схема лабораторной установки**

Температура T_1 и давление $P_б$ воздуха на входе в цилиндр компрессора измеряется соответственно термометром 9 и барометром 10, а на выходе температура T_2 и давление $P_м$ – соответственно электронным термометром 11 и манометром 12. Частота вращения вала компрессора измеряется электронным тахометром 13. Указанные приборы и пускозащитная аппаратура электродвигателя установлены на стенде. Там же установлены приборы для измерения напряжения и тока электродвигателя.

Порядок проведения работы

Перед началом опыта измеряются температура T_1 и барометрическое давление $P_б$ в помещении. Значения T_1 и $P_б$, а также заданные преподавателем конечные значения давления воздуха на линии нагнетания для трех режимов заносятся в таблицу 10.1.

Включают установку и с помощью вентиля 8 по манометру 12 *(Рм)* устанавливают первый заданный режим. После установившегося режима, о чем свидетельствует неизменность показаний термометра 11 (T_2), записывают показания приборов: термометра, манометра и тахометра.

Затем переходят последовательно на второй и третий режимы, перекрывая вентиль 8, и измеряя T_2 и *n*.

Результаты измерений заносят в таблицу 10.1.

После окончания измерений установку отключить.

Таблица 10.1 – **Протокол результатов измерений и их обработки**

№ п/п	Режим работы		Результаты измерений и расчетов									
	Рм	n	T_1	$P_б$	P_1	P_2	T_2	V	V_o	Nп	$\lambda_{об}$	λ
	кгс/см^2	мин$^{-1}$	К	мм. рт. ст.	Па	Па	К	м^3/с	м^3/с	кВт		

Обработка результатов опытов

1. Определяют рабочий объем цилиндра компрессора

$$V_д = \frac{\pi \cdot d^2}{4} S \text{ ,} \qquad (10.7)$$

где d – диаметр цилиндра, м; S – ход поршня, м.

Для компрессора, используемого в работе $d=51 \cdot 10^{-3}$ м, $S=28{,}3 \cdot 10^{-3}$ м.

2. Находят объем вредного пространства $V_{вр}$ по формуле (10.1), принимая $\sigma = 0{,}06$.

3. Давление на входе и на выходе компрессора выражают в Паскалях, т.е.:

$$P_1 = P_б\,(1\text{-}0{,}000172t_1) \cdot 133{,}3 \qquad (10.8)$$

где t_1 – температура в помещении, °С;

$$P_2 = P_м + P_1. \qquad (10.9)$$

4. Считая, что процесс расширения воздуха (рис.10.1, линия 3-4) происходит по политропе с показателем m, определяют объем воздуха после расширения $V^m_{расш}$ по уравнению политропы:

$$P_2 \cdot V^m_{вр} = P_1 \cdot V^m_{расш,}; \qquad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}} \qquad (10.10)$$

5. Определяют объем всасывания $V_{вс}$

$$V_{вс} = V_р + V_{вр} - V_{расш} \qquad (10.11)$$

6. Определяют объемный коэффициент $\lambda_{об}$

$$\lambda_{об} = \frac{V_{вс}}{V_р} \qquad (10.12)$$

а также коэффициент подачи, считая, что $\lambda_т \cdot \lambda_р = 0{,}92$

$$\lambda = 0{,}92\lambda_{об}. \qquad (10.13)$$

7. Определяют теоретически возможную производительность компрессора

$$V_т = V_р \cdot n. \qquad (10.14)$$

8. Действительная производительность компрессора

$$V = \lambda \cdot V_т. \qquad (10.15)$$

9. Производительность компрессора при нормальных физических условиях, т.е. при $T_0 = 273°К$ и $P_0 = 1{,}013 \cdot 10^5$ Па

$$V_0 = \frac{T_0}{T_1} \cdot \frac{P_1 \cdot V}{P_0}. \qquad (10.16)$$

10. Работу по политропе сжатия 1 кг воздуха определяют по формуле

$$\ell = \frac{m}{m-1} R(T_2 - T_1). \qquad (10.17)$$

11. Политропная мощность компрессора

$$N_п = M \cdot l. \qquad (10.18)$$

где $M = V_0 \rho$ – массовая производительность компрессора, кг/с; $\rho = 1{,}295$ – плотность воздуха при нормальных физических условиях, кг/м^3.

12. Результаты расчетов заносятся в таблицу 10.1.

13. По результатам расчетов построить цикл поршневого компрессора в P - V координатах.

Содержание отчета

1. Краткое описание работы.
2. Схема экспериментальной установки.
3. Протоколы записи, показаний измерительных приборов и результатов обработки измерений.
4. Расчет объемного коэффициента, коэффициента подачи, производительности и мощности, подводимой к валу компрессора.
5. Построить цикл компрессора в P-V координатах.
6. Расчет погрешностей (приложение Б).
7. Выводы no работе.

Контрольные вопросы

1*. Назначение и область применения компрессоров.
2*. Объяснить смысл коэффициента вредного объема, объемного коэффициента и коэффициента подачи. Указать факторы, от которых зависят названные коэффициенты.
3*. Какое влияние на производительность компрессора оказывает повышение температуры воздуха на линии всасывания, а также увеличение степени повышения давления?
4. При каких условиях производительность компрессора равна 0?
5. Какое допустимое повышение температуры воздуха возможно после сжатия и почему?
6. Представить в P - V координатах цикл компрессора и объяснить характер протекающих процессов.
7. Какие известны типы компрессоров?
8.Какие процессы сжатия могут осуществляться в поршневом компрессоре?
9. Какие кпд вводятся для оценки эффективности работы компрессора, и по каким формулам подбирается мощность привода к компрессорам?

Литература

1. Драганов Б.Х. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве. / Б.Х. Драганов и др. – М.: Агропромиздат, 1990.
2. Теплотехника./ В.Н. Луканин [и др.];/ Под редакцией В.Н. Луканина.- 2-е изд. – М.: Высшая школа, 2000.
3. Кудинов В.А. Техническая термодинамика./Кудинов В.А., Карташов Э.М. – М.: Высшая школа, 2005.

Лабораторная работа №11

Определение характеристик автономного кондиционера

Цель работы: ознакомление с конструкцией и принципом работы автономного кондиционера, определение количества теплоты и массы влаги, отводимой от воздуха в кондиционере, изучение процессов кондиционирования по *id*- диаграмме.

Задание для предварительной подготовки

1. Изучить настоящие методические указания и рекомендуемую литературу.
2. Получить формулу для определения коэффициента влаговыделения в воздухоохладителе.
3. Подготовить ответы на контрольные вопросы 1..3.
4. Оформить заготовку письменного отчета по лабораторной работе.

Общие сведения

Кондиционирование воздуха (от латинского слова conditio - условие) – автоматическое поддержание в закрытых помещениях всех или отдельных его параметров (температуры, относительной влажности, чистоты, подвижности) на определенном уровне для обеспечения главным образом оптимальных метеорологических условий, наиболее благоприятных для самочувствия людей, ведения технологического процесса и обеспечения сохранности оборудования, материалов и др.

Заданные параметры воздуха получают с помощью систем кондиционирования. Системы кондиционирования воздуха должны выполнять все следующие задачи или их часть:

1) очистку воздуха от пыли;
2) нагревание воздуха;
3) охлаждение воздуха;
4) увлажнение воздуха;
5) осушку воздуха;
6) очистку воздуха от запахов;
7) сообщение воздуху специальных запахов (парфюмеризация, одоризация);
8) ионизацию воздуха;
9) заглушение шумов.

Первые пять из указанных требований должны выполнять все системы кондиционирования воздуха, а последующие – при наличии специальных требований. Наличие технических средств для осуществления

указанных задач еще не определяет установку как законченную систему кондиционирования воздуха, пока в ней не предусмотрены средства автоматического регулирования. В систему кондиционирования входят также устройства, выполняющие функции регулирования и управления ее работой, устройства для перемещения и раздачи воздуха в помещении, для забора наружного и рециркуляционного воздуха.

Благоприятные условия окружающей среды в помещении задаются совокупностью нескольких характеристик, определяющими из которых является температура, относительная влажность и концентрация вредных газов и пыли. Создание требуемых условий в животноводческих помещениях и хранилищах продуктов во многих случаях является определяющим фактором, от которого зависит качество продукции, продуктивность животных и птиц и др.

Кондиционирование воздуха, осуществляемое с целью создания и поддержания наилучших условий воздушной среды, носит название комфортного, а предназначенное для создания искусственных климатических условий в соответствии с требованием условий производства - технологического.

Кондиционирование воздуха осуществляется системами кондиционирования воздуха (СКВ), т.е. комплексом технических средств и устройств для приготовления приточного воздуха с заданными параметрами в целях поддержания в помещениях требуемого состояния воздуха независимо от изменения режима поступления вредных выделений и состояний наружного воздуха. Такая система в отличие от вентиляционной обеспечивает не только смену воздуха в помещении по принципу общеобменной вентиляции, но и автоматически поддерживает необходимые параметры микроклимата.

Системы кондиционирования могут быть местными и центральными. Центральными СКВ называют обслуживающие несколько помещений из одного центра, внешнего по отношению к обслуживающим помещениям.

Кондиционирование воздуха может быть зимним, летним или круглогодичным.

В данной работе определяются характеристики установки летнего кондиционирования воздуха. В летний период энтальпия и влагосодержание наружного воздуха часто превышают допустимые значения, поэтому летнее кондиционирование сводится к охлаждению и осушению приточного воздуха в кондиционере.

Воздухоохладители бывают двух типов: «мокрые» и «сухие».

В «мокрых» воздухоохладителях, воздух охлаждается, осушается или увлажняется при непосредственном соприкосновении с холодной водой, которая разбрызгивается форсунками в специальных камерах.

В «сухих» воздухоохладителях поверхностного типа (к которым относится используемый в работе автономный кондиционер) воздух контактирует с охлаждающими поверхностями гладких или оребренных труб, внутри которых пропускается холодная вода или холодный агент.

Следует различать два вида охлаждения:

а) температура поверхности ниже температуры воздуха, но выше температуры точки росы. В этом случае от воздуха отводится только явная теплота при постоянном влагосодержании *d = const.* Температура воздуха будет понижаться.

б) температура поверхности ниже температуры воздуха и ниже температуры точки росы. Здесь процесс охлаждения сопровождается конденсацией паров воды из воздуха *(d = var).* Происходит охлаждение и осушение воздуха.

Аналогично протекают процессы охлаждения и осушения воздуха в «мокрых» воздухоохладителях. Увлажнение и охлаждение воздуха происходит при температуре разбрызгиваемой воды выше температуры точки росы.

Тепловой поток Ф (Вт), отводимый от воздуха в воздухоохладителе (холодопроизводительность кондиционера), определяется из уравнения теплового баланса

$$Ф=G_в(i_н - i_к) \cdot 10^3 . \qquad (11.1)$$

где Gв – массовый расход воздуха через воздухоохладитель, кг/с; $i_н$, $i_к$ – соответственно энтальпия воздуха перед воздухоохладителем и после воздухоохладителя, кДж/кг.

Массу сконденсированных из воздуха водяных паров определяют из уравнения

$$m = G_в \frac{d_н - d_k}{1000}, \qquad (11.2)$$

где m – масса водяных паров, кг/с; $d_н$, d_k – соответственно влагосодержание воздуха перед воздухоохладителем и после воздухоохладителя, г/кг.

Полный тепловой поток Ф (Вт), отводимый от воздуха, можно также определить из уравнения

$$Ф = Ф_я + Ф_с,, \qquad (11.3)$$

$$Ф = \zeta \cdot Ф_я \ ,$$

где $Ф_я$ – количество явной теплоты, отданное воздухом в воздухоохладителе, Вт; $Ф_с$ – количество теплоты, отданное воздухом в скрытом виде с конденсировавшимся водяным паром; ζ – коэффициент влаговыделения в воздухоохладителе.

Поток явной теплоты определяют из уравнения

$$Ф_я = G_в \cdot C_р \, (t_н - t_к) \cdot 10^3 , \qquad (11.4)$$

где $C_р$ – теплоемкость воздуха, кДж/(кг К); $t_н$, $t_к$ – соответственно температура воздуха перед воздухоохладителем и после воздухоохладителя, ^{0}С.

Установки кондиционирования воздуха в летний период могут обрабатывать или наружный воздух, или смесь наружного и отработанного воздуха.

Если обработанный воздух не загрязнен примесями, то с экономической точки зрения более выгодным является схема с рециркуляцией при минимальной подаче наружного воздуха.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка, принципиальная схема которой приведена на рис.11.1, представляет собой камеру (имитирующую помещение), установленную совместно с бытовым кондиционером БК-1500.

Основными рабочими узлами кондиционера являются: ротационный фреоновый компрессор 1; конденсатор воздушного охлаждения 2; осевой вентилятор 3, предназначенный для охлаждения конденсатора, с электродвигателем 4; центробежный вентилятор 5 (служит для всасывания воздуха из помещения через решетчатую декоративную панель и нагнетания охлажденного воздуха через поворотную заслонку); панель управления 6; испаритель - ребристый воздухоохладитель 7; фильтр для очистки воздуха от пыли 8.

Источниками тепловлаговыделения в камере служат генераторы теплоты 9 и влаги 10.

Рециркуляционный воздух, подогретый и увлажненный в камере, подается во всасывающий воздуховод 11, где смешивается с наружным воздухом, поступающим через заслонку 12. Количество рециркулирующего и наружного воздуха устанавливают заслонками 13 и 12, скорости потоков измеряют анемометром, а температуры и относительные влажности – психрометрами 14 и 15.

Воздух, поступающий во всасывающий воздуховод 11 (по схеме 1 – наружный воздух, по схеме 2 – рециркуляционный воздух, по схеме 3 – смесь наружного и рециркуляционного воздуха) центробежным вентилятором 5, подается через фильтр 8 на испаритель-воздухоохладитель 7, охлаждаясь и осушаясь в котором вновь подается в камеру.

Температуры воздуха (смеси) перед воздухоохладителем измеряются термометром 16, а после кондиционера психрометром 17.

Заслонка 18 имитирует вытяжную шахту.

Режим охлаждения воздуха задается ручкой терморегулятора на панели управления кондиционера.

Порядок проведения опытов

Характеристики установки летнего кондиционирования воздуха (по заданию преподавателя) определяют в следующих режимах:

а) в кондиционере обрабатывается наружный воздух и поддерживаются заданные параметры воздуха, находящегося в камере (увлажненного и подогретого генераторами теплоты и влаги);

б) в кондиционере обрабатывается рециркуляционный воздух, идущий из камеры;

в) в кондиционере обрабатывается смесь рециркуляционного воздуха, идущего из камеры и воздуха, поступающего из окружающей среды.

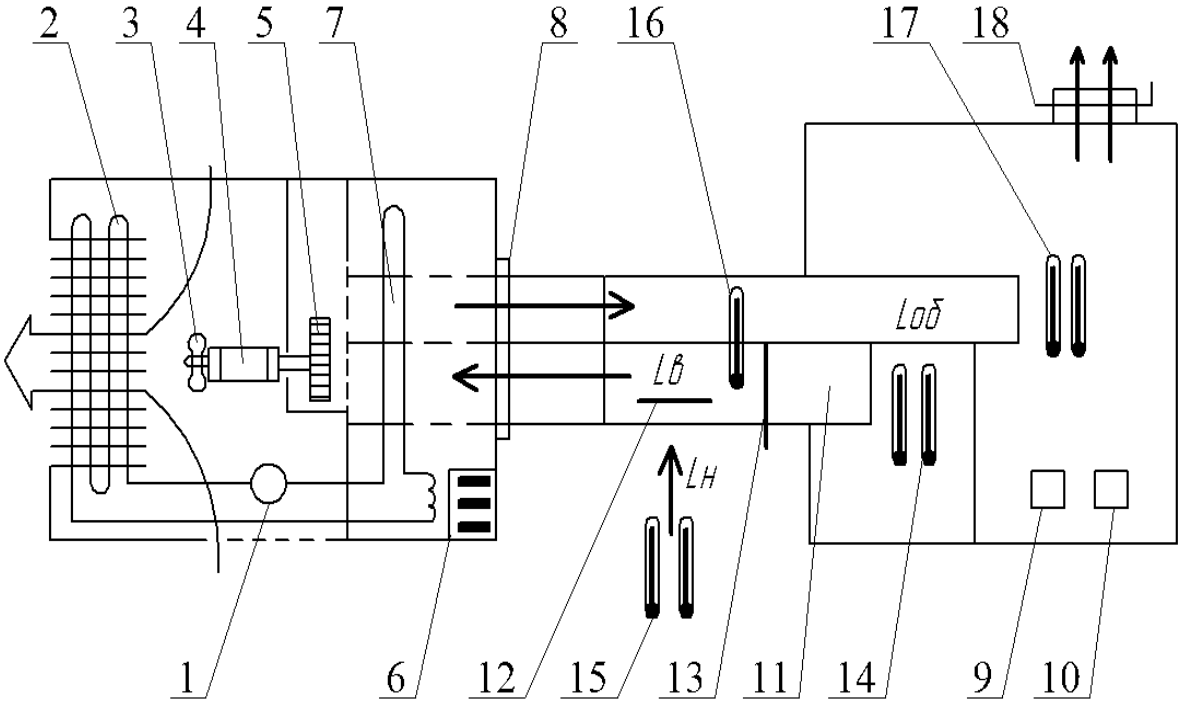


Рис. 11.1 – **Схема лабораторной установки**

Перед началом опыта по рекомендации преподавателя устанавливают на панели управления температуру обрабатываемого воздуха. Открывают заслонку 12, а заслонку 13 полностью закрывают. Такое положение заслонок соответствует первому режиму.

Включают электрическое питание установки (включение и выключение питания установки производится в присутствии преподавателя или лаборанта) и в зависимости от выбранного режима работы кондиционера устанавливается определенная величина тепло- и влаговыделения в камере.

После достижения стационарного режима, характеризующегося постоянством температуры и относительной влажности воздуха в камере,

производится измерение скорости воздуха, температуры и влажности на входе в камеру и на выходе из нее соответственно психрометрами 15 и 17.

Результаты измерений заносятся в таблицу 11.1.

Для проведения опытов во втором режиме открывают заслонку 13, а заслонку 12 полностью закрывают. Температуру и относительную влажность на выходе из камеры измеряют психрометром 14.

Третий режим работы устанавливают, частично перекрывая заслонку 13 и открывая заслонку 12. Температура на выходе из камеры дополнительно контролируется термометром 16.

Все остальные измерения проводят аналогично первому режиму.

Таблица 11.1 **– Протокол результатов измерений и их обработки**

№	Параметры воздуха																				Характеристики кондиционера				
	Окружающего					Рециркулярного					Смеси					Приточного									
п/п	$t_с$	$t_м$	φ	i	d	$t_с$	$t_м$	φ	i	d	$t_с$	$t_м$	φ	i	d	$t_с$	$t_м$	φ	i	d	$G_в$	Ф	m	$Ф_я$	ζ
1																									
2																									
3																									
Обозначения: tc и tм - температура по сухому и мокрому термометрам; φ - относительная влажность, i – энтальпия, d – влагосодержание.																									

Обработка результатов опытов

Для обработки опытных данных используются величины, усредненные по трем показаниям приборов для каждого режима.

1. Расход воздуха Gв (кг/с) вычисляется по уравнению:

$$G_в = \omega \cdot f \cdot \rho, \qquad (11.5)$$

где ω – скорость воздушного потока, м/с; ω = 0,8 м/с; f – площадь поперечного сечения воздуховода, м^2; ρ – плотность воздуха, кг/м^3.

2. По измеренным температурам сухого и мокрого термометров по *id*-диаграмме определяют относительную влажность окружающего, рециркулярного и приточного воздуха и строят процессы на *id*-диаграмме. В характерных точках процесса (рис.11.2, рис.11.3) находят энтальпию *i* и влагосодержание воздуха *d.*

Положение точки С на прямой РН (рис.11.3) может быть также найдено из соотношения:

$$\frac{HC}{PC} = \frac{Gp}{Gн}, \qquad (11.6)$$

где $G_р$, $G_н$ – расход рециркулярного и наружного воздуха, кг/с.

Если в опыте измеряется расход смеси $G_с$, то $G_р$ и $G_н$, находят по зависимостям:

$$Gн = G_с \frac{PC}{HP}, \tag{11.7}$$

$$Gр = G_с \frac{CH}{HP}, \tag{11.8}$$

Если в опыте (режим 3) измеряется расход наружного $G_н$ или рециркулярного воздуха $G_р$, то расход смеси определяют из зависимостей

$$G_с = G_н \frac{HP}{PC}, \tag{11.9}$$

$$G_с = G_р \frac{HP}{CH}, \tag{11.10}$$

где *HP*, *PC, CH* – длина отрезков на id-диаграмме между характерными точками процесса, мм, (рис.11.2, рис.11.3).

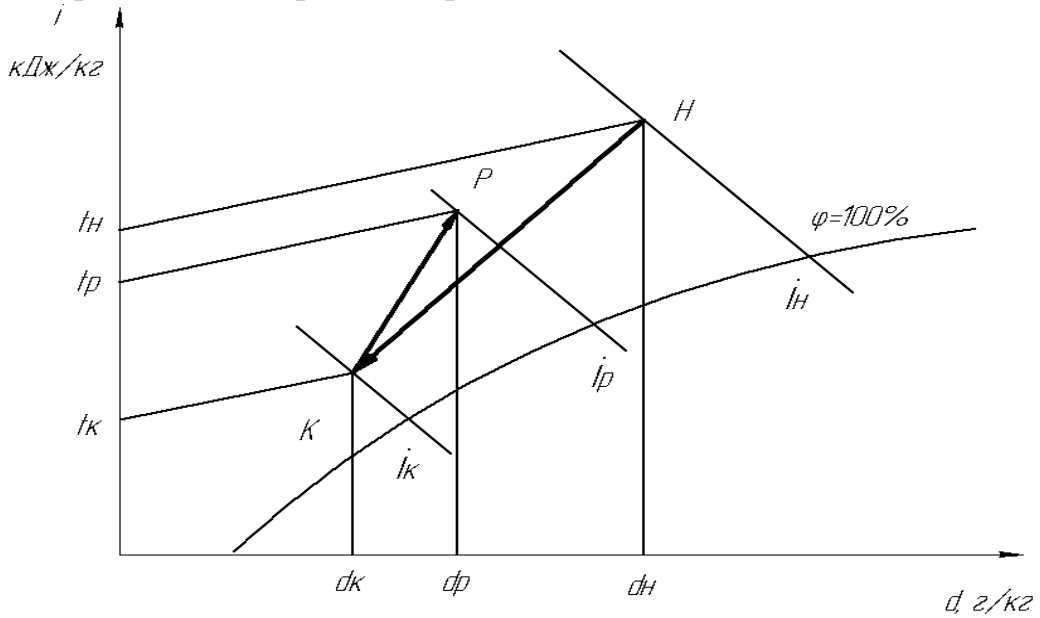


Рис.11.2 **–Процесс кондиционирования без рециркуляции**

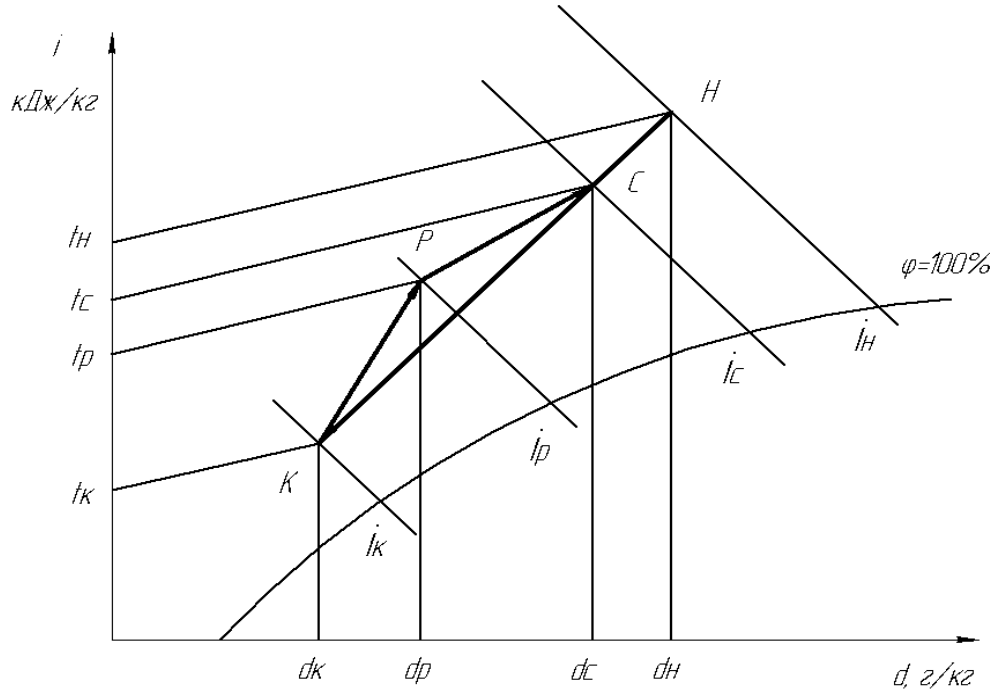


Рис 11.3 –**Процесс кондиционирования с рециркуляцией**

Холодопроизводительность кондиционера Ф, массу сконденсировавшихся из воздуха водяных паров *m,* коэффициент влаговыделения ς и количество явной теплоты находят по зависимостям (11.1), (11.2), (11.3), (11.4).

Величины $i_к$, $d_к$, и $t_к$, входящие в указанные выше зависимости, определяют для приточного (после кондиционера) воздуха (точка К, рис.11.2, рис.11.3).

Теплоемкость воздуха Ср (кДж/(кг К)), входящую в выражение (11.4), определяют по формуле:

$$C_p = C_c + \frac{C_n \cdot d}{1000}, \qquad (11.11)$$

где C_p – теплоемкость сухой части воздуха, $C_с$ = 1,0036 кДж/(кг К); $C_п$ – теплоемкость водяного пара, $C_п$ =1,8 кДж/(кг К); d – влагосодержание воздуха, г/кг.

Результаты расчетов заносят в таблицу 11.1.

Содержание отчета

1. Краткое описание работы.
2. Принципиальная схема установки.
3. Протокол записей показаний измерительных приборов.
4. Таблица результатов обработки экспериментальных данных.
5. Построенные процессы кондиционирования в диаграмме.

6. Расчет погрешностей (приложение Б).
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1*. Основные конструктивные элементы и принцип работы автономного кондиционера.
2*. Как по *id*-диаграмме определить характеристики воздуха при известной температуре сухого и мокрого термометров?
3*. Назначение летнего кондиционирования воздуха.
4. Опишите процесс адиабатического увлажнения и осушения воздуха.
5. Почему схемы с рециркуляцией в установках кондиционирования воздуха экономически более выгодны?
6. Запишите уравнения теплового баланса и баланса влаги для произвольного процесса изменения состояния воздуха.
7. Физический смысл коэффициента влагосодержания.
8. Определить с помощью *id*-диаграммы количество воздуха наружного и рециркулярного, поступающих в смесь при известном количестве смеси.
9. Как, зная массу сконденсированной влаги *m,* определить скрытую теплоту?

Литература

1. Драганов Б.Х. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве. / Б.Х. Драганов и др. – М.: Агропромиздат, 1990.
2. Захаров А.А. Практикум по применению теплоты в сельском хозяйстве.- М.: Агропромиздат, 1985.

Лабораторная работа № 12

Исследование соответствия потребных и установленных тепловых мощностей отопительных приборов

Цель работы: освоить методику расчета и проектирования отопления жилых помещений.

Задание для предварительной подготовки

1. Изучить настоящие методические указания и рекомендуемую литературу.
2. Подготовить ответы на контрольные вопросы 1..3.
3. Оформить заготовку письменного отчета по лабораторной работе.

Общие сведения

Расчет тепловых потерь помещения

Для определения тепловых потерь должны быть известны расчетные температуры внутреннего и наружного воздуха и конструкции строительных ограждений.

Расчетная внутренняя температура $t_{вн}$ воздуха для холодного периода года должна соответствовать требованиям, предъявляемым к данному помещению.

Например, для лаборатории (по СНиП) $t_{вн} = 16\ ^0C$.

Расчетная зимняя температура $t_н$ наружного воздуха зависит от климатических особенностей местности, в которой расположен населенный пункт. Для Ижевска $t_н = -31°C$.

Рассмотрим **два варианта расчета мощности системы отопления:**

1. по тепловым потерям помещения;
2. по удельным тепловым характеристикам здания

1 Вариант (расчет тепловых потерь)

Поток теплоты, теряемой помещением, складывается из теплопотерь через все его наружные ограждения (Фогр) и добавочных теплопотерь (Фдоб)

$$Ф = Фогр + Фдоб\,. \qquad (12.1)$$

Теплопотери через ограждения

$$Ф_{огр} = \sum_{i=1}^{n} K_i \cdot F_i \cdot (t_{вн} - t_н) \qquad (12.2)$$

где $К_i$ – коэффициент теплопередачи через *i* -ое ограждение (Вт/м^{20}С); Fi – площадь поверхности *i* -го ограждения, м^2.

Коэффициент теплопередачи определяется по формуле

$$K_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{k=1}^{n} \frac{\delta_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_2}}, \qquad (12.3)$$

где α_1,α_2 – коэффициенты теплоотдачи с внутренней поверхности стенки и наружной, обдуваемой ветром. α_1 = 7,5 Вт/(м^2 °С); α_2 = 20 Вт/(м^2 ^{0}С); $\delta_К$ – толщина стенки, м; $\lambda_К$ – коэффициент теплопроводности (Вт/(м^2 ^{0}С), берется из приложения А.

Для упрощения расчетов значение Кi можно принять по приложению А.

Добавочные теплопотери учитывают ориентацию здания по отношению к сторонам света, господствующее направление ветра.

$$Фдоб = (0,05..0,1) \cdot Фогр. \qquad (12.4)$$

2 Вариант (расчет по удельным тепловым потерям)

Для ориентировочного расчета количества тепла, необходимого на отопление здания, расчет потерь тепла можно выполнить приближенным методом по удельным тепловым характеристикам зданий.

Удельная тепловая характеристика здания есть поток теплоты, теряемой 1м^3 его объема (по наружному обмеру) в единицу времени при разности температур внутреннего и наружного воздуха 1 К.

Приближенно расход тепла на отопление здания:

$$Фот = q_o \cdot V_n (t_{вн} - t_н) \cdot \alpha, \qquad (12.5)$$

где q_0 – удельная отопительная характеристика здания, принимаемая по приложению А.5, Вт/(м^3 ^{0}С); Vп – объем здания по наружному обмеру, м^3; $t_{вн}$, $t_н$ - расчетные температуры внутреннего и наружного воздуха,^{0}С.

Поправочный коэффициент, учитывающий величину разности температур на величину q_0 определяется по формуле:

$$a = 0,54+(22/(t_{вн} - t_н)). \qquad (12.6)$$

Определив поток теплоты, теряемой отапливаемым помещением, необходимо рассчитать и выбрать нагревательные приборы.

Варианты расчета и выбора нагревательных приборов.
1 Вариант
Расчет поверхности нагрева в квадратных метрах

Теплоотдачу открытых трубопроводов (Вт) системы отопления можно определить по выражению

$$\Phi_{тр} = K_{тр} \cdot F_{тр}(t_{ср} - t_{вн}) \cdot \eta, \qquad (12.7)$$

где $K_{тр}$ – коэффициент теплопередачи трубопровода, Вт/(м^2 ^{0}С), принимается по приложению А; F – площадь поверхности трубопровода, м^2; $t_{ср}$ – средняя температура теплоносителя в трубе, ^{0}С, $t_{ср} = (t_{вх} + t_{вых})/2$; $t_{вн}$ – расчетная температура воздуха в помещении, °С. η – коэффициент, равный, для подающей линии, расположенной под потолком – 0,25; для вертикальных стояков – 0,5: для обратной линии, расположенной над полом – 0,75; для подающей и обратной подводок к нагревательным приборам – 1,0.

Относительный расход воды в нагревательном приборе на 1 м^2 эквивалентной площади по отношению к условному расходу 17,4 кг/(м^{2}ч) находят по формуле:

$$G_{отн} = \frac{6{,}75 \cdot \Delta t_{ср}}{\Delta t_{пр} \cdot 17{,}4}, \qquad (12.8)$$

где $\Delta t_{ср} = t_{ср} - t_{вн}$; $\Delta t_{пр} = t_{вх} - t_{вых}$.

Радиаторы должны иметь теплоотдачу ($\Phi - \Sigma\Phi_{тр}$), тогда суммарная поверхность нагрева приборов:

$$F'_{пр} = \frac{\Phi - \Sigma\Phi_{тр}}{K_{пр}(t_{ср} - t_{вн}) \cdot \beta_4} \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \qquad (12.9)$$

где $К_{пр}$ – коэффициент теплопередачи нагревательного прибора, Вт/(м^2 ^{0}С), (приложение А.6); β_1 – поправочный коэффициент на способ установки прибора (приложение А.7); β_2 – поправочный коэффициент, учитывающий остывание воды в трубопроводах (приложение А.8); β_3 – поправочный коэффициент на число секций в радиаторе для водяных систем отопления (приложение А.11); β_4 – поправочный коэффициент, учитывающий схему присоединения радиатора к стоякам системы отопления и расход воды через нагревательный прибор (приложение А.9).

По приложению А.10 для выбранного радиатора берется поверхность нагрева одной секции $f_с$ и подсчитывается необходимое количество секций:

$$n' = \frac{F'_{пр}}{f_c}. \quad (12.10)$$

Поскольку в комнате m окон, то в каждом радиаторе будет n'/m секций.

Зная число секций в одном радиаторе, определяют коэффициент β_3 (приложение А.11), учитывающий количество секций в радиаторе и окончательно уточняют поверхность нагрева нагревательных приборов:

$$F_{пр} = F'_{пр} \cdot \beta_{3,} \quad (12.11)$$

$$n = \frac{F_{пр}}{f_c}. \quad (12.12)$$

2 Вариант

Расчет поверхности нагревателя в эквивалентных квадратных метрах (ЭКМ)

Поверхность всех трубопроводов

$$F_{тр} = \sum_{i=1}^{n} fl\eta, \quad (12.13)$$

где l –длина трубопровода, м; f – площадь поверхности нагрева трубопровода, экм (приложение А.12).

Теплоотдача 1 экм:

$$q = K_{пр} \cdot \Delta t_{ср} = q_{экм} \cdot \beta_4 \cdot \Delta t_{ср}, \quad (12.14)$$

где $q_{экм}$ – коэффициент теплоотдачи 1 экм, Вт/(экм ºС) (приложение А.13).

Необходимая поверхность нагрева радиатора:

$$F_{пр} = \left(\frac{\Phi_{огр} \cdot \beta_2}{q} - F_{тр} \right) \cdot \beta_1 \cdot \beta_3. \quad (12.15)$$

По приложению А.10 для выбранного радиатора берется поверхность нагрева одной секции f_c и подсчитывается необходимое количество секций

$$n = F_{пр} / f_c. \quad (12.16)$$

Методика проведения исследований

1. Установите тип нагревательного прибора, их количество.
2. Определите систему отопления.
3. Измерьте длины и диаметры стояков ($l_{ст}$, $d_{ст}$) и подводок ($l_{под}$, $d_{под}$).
4. Измерьте размеры помещения (a, b, h).
5. Измерьте температуру в помещении $t_{вн}$.
6. Измерьте площади поверхности ограждений, через которые происходят потери тепла (стены, окна) и их толщину.
7. Результаты исследований запишите в таблицу 12.1.

Таблица 12.1 - **Протокол результатов измерений**

a	b	h	$l_{ст}$	$d_{ст}$	$l_{под}$	$d_{под}$	F_1	$\delta_к$	$\lambda_к$	K_1	Ф	$t_{вн}$	$t_н$	$t_{вх}$	$t_{вых}$
м	м	м	м	м	м	м	м	м	$\frac{Вт}{м^0 С}$	$\frac{Вт}{м^{2*0} С}$	Вт	^{0}C	^{0}C	^{0}C	^{0}C
														95	70

Обработка результатов исследований

1. Рассчитать тепловые потери помещения (вариант расчета задается преподавателем).
2. Рассчитать площадь теплоотдающей поверхности нагревательных приборов и определить количество секций для радиаторов отопления (вариант расчета задается преподавателем).
3. Результаты расчетов занести в таблицу 12.2.

Таблица 12.2 – **Протокол результатов обработки измерений**

Тип установленного нагревательного прибора	Количество секций	Площадь поверхн. нагрева	Тип рассчитан. нагревательного прибора	Количество секций	Поверхн. нагрева
	шт.	$м^2$		шт.	м

Содержание отчета

1. Краткое описание работы.
2. Таблицы с результатами исследований и расчетов.
3. Развернутая запись расчета по одному из вариантов.
4. Нарисовать план помещения с расположением нагревательных приборов.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1.* Что называется нагревательным прибором?
2.* Что называется поверхностью нагрева?
3.* Типы нагревательных приборов.
4. Какие вы знаете системы отопления?
5. Что называется удельной тепловой характеристикой здания?
6. Что называется эквивалентным квадратным метром (экм) поверхности нагрева?
7. Запишите тепловой баланс для животноводческого помещения.
8. Запишите тепловой баланс для культивационного сооружения.
9. Какие существуют способы снижения теплопотерь зданий?
10. От каких параметров зависят потери теплоты с вентиляционным воздухом?
11. Какими способами можно интенсифицировать теплоотдачу системы отопления?

Литература

1. Драганов Б.Х. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве. / Б.Х. Драганов и др. – М.: Агропромиздат, 1990.
2. Захаров А.А. Практикум по применению теплоты в сельском хозяйстве.- М.: Агропромиздат, 1985.

Лабораторная работа № 13

Определение эквивалентного коэффициента теплопроводности при теплоотдаче в ограниченном пространстве

Цель работы: определение эквивалентного коэффициента теплопроводности, установление его зависимости от температурного напора и сравнение опытных данных с расчетными.

Задание для предварительной подготовки

1. Изучить настоящие методические указания и рекомендуемую литературу.
2. Подготовить ответы на контрольные вопросы 1...3.
3. Оформить заготовку письменного отчета по лабораторной работе.

Общие сведения

Теплообмен при естественной (свободной) конвекции во многом зависит от объема пространства, окружающего поверхность нагрева. В ограниченном пространстве он характеризуется взаимным влиянием нагрева и охлаждения жидкости (газа): взаимодействие восходящих и нисходящих потоков усложняет процесс теплообмена. В практических расчетах сложный процесс конвективного теплообмена принято рассматривать как элементарное явление теплопроводности. В этом случае вводят так называемый эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{экв}$, учитывающий теплопроводность среды и перенос теплоты за счет конвекции, т.е. $\lambda_{экв} = \lambda_{ср} + \lambda_{конв}$.

Конвективный тепловой поток $\Phi_к$ в цилиндрическом зазоре, образованном двумя вертикальными трубами (труба в трубе), определяется по формуле:

$$\Phi_к = \frac{2\pi l \lambda_{экв}(t_{c1} - t_{c2})}{\ln d_2 / d_1}, \qquad (13.1)$$

где t_{cl}, t_{c2} – температуры внешней поверхности внутренней трубы и внутренней поверхности наружной трубы, °С; d_1 – наружный диаметр внутренней трубы, мм; d_2 – внутренний диаметр наружной трубы, мм; l – длина трубы, м.

Эквивалентный коэффициент теплопроводности можно определить при помощи коэффициента конвекции $\varepsilon_к$:

$$\lambda_{экв} = \varepsilon_к \lambda_ж. \qquad (13.2)$$

Академиком М.А. Михеевым предложена зависимость для определения значения коэффициента конвекции при свободном движении в ограниченном объеме:

$$\varepsilon_к = 0.18(\mathrm{Gr} \cdot \mathrm{Pr})^{0,25}_{\delta,ж}, \qquad (13.3)$$

где $Gr_{\delta,ж} = \beta \frac{g\delta^3(t_c - t_ж)}{\nu^2_ж}$ – число Грасгофа, учитывающее действие подъемных (архимедовых) сил;

$\mathrm{Pr} = \frac{\nu}{a}$ – число Прандтля, характеризующее физические свойства среды;

β – коэффициент объемного расширения (для газов $\beta = 1/T_ж$);

$t_ж$ – температура газа, ^{0}C;

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

a – коэффициент температуропроводности, м^2/с;

$\nu_ж$ – коэффициент кинематической вязкости газа, м^2/с;

$\lambda_ж$ – коэффициент теплопроводности газа, Вт/м К;

δ – толщина цилиндрической воздушной прослойки, м.

Формула (13.3) справедлива при значениях $(Gr \cdot Pr)_{\delta,ж} > 10^3$.

При вычислении чисел подобия за определяющий размер принимается толщина цилиндрической прослойки $\delta = 0{,}5(d_2 - d_1)$, а за определяющую температуру - средняя температура газа $t_ж = 0{,}5(t_{c1} + t_{c2})$. При $(Gr \cdot Pr)_{\delta,ж} < 10^3$ $\varepsilon_к = 1$.

Описание лабораторной установки

Опытная установка (рис. 13.1) состоит из двух вертикальных труб *2* и *3* разного диаметра (труба в трубе). Внешний диаметр внутренней трубы *2* $d_1 = 26$ *мм*, а внутренний диаметр внешней трубы *3* $d_2 = 96$ *мм*; трубы имеют одинаковую длину $l = 490$ мм. Электрический нагреватель *4* расположен внутри трубы *2*. Мощность нагревателя регулируется лабораторным автотрансформатором 5 и измеряется вольтметром 6 и амперметром 7. Температуры поверхности труб измеряются термопарами 8, расположенными на соответствующих поверхностях нагрева (2 термопары на внутренней трубе и 4 термопары на внешней трубе). Термопары подключены к электронному измерителю температуры 1 (точки 1′, 2' – температуры поверхности внутренней трубы; точки 3', 4', 5', 6' – температуры наружной), показывающему температуру поверхности непосредственно в градусах.

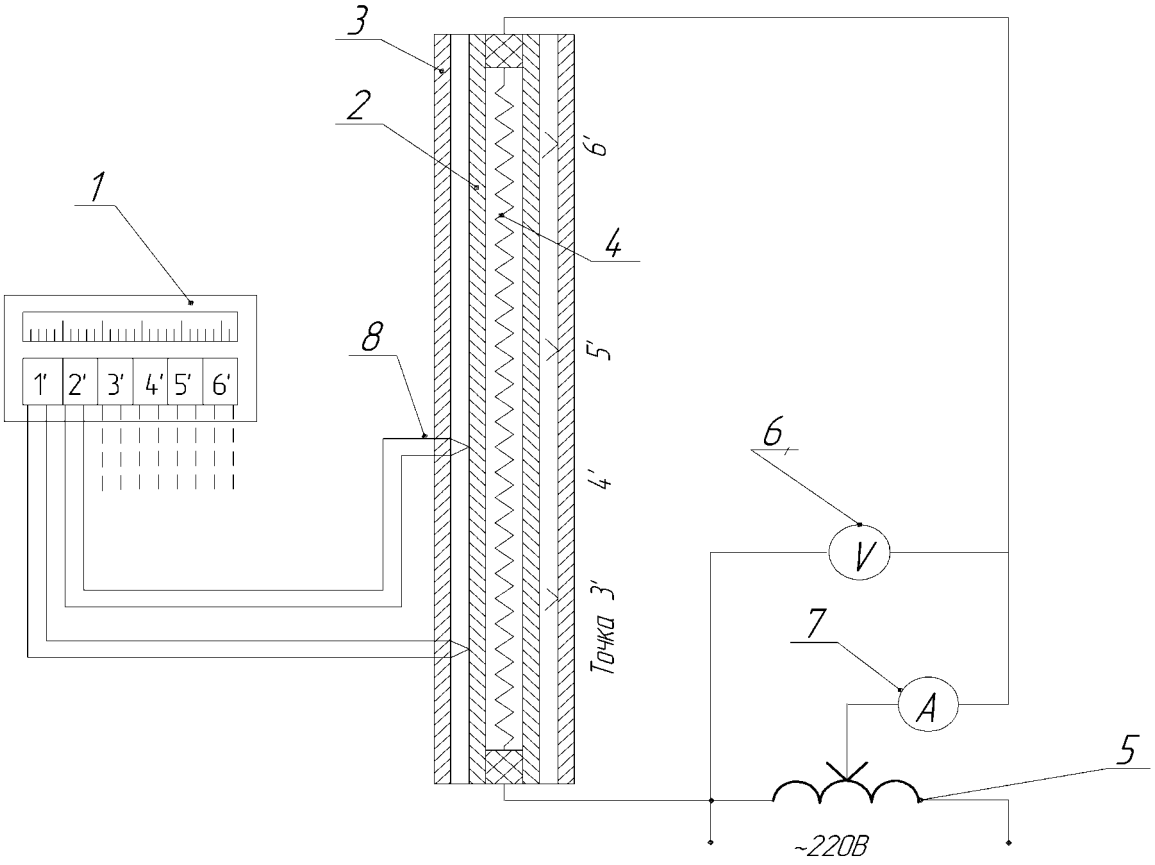


Рис.13.1 – **Схема лабораторной установки**

Порядок проведения опытов

1. Включить питание установки. Установить с помощью автотрансформатора мощность электронагревателя в пределах 50 - 100 Вт.

2. Сделать 3 записи показаний приборов при установившемся тепловом режиме (при постоянстве температур во времени).

3. Установить второй режим (в пределах мощности нагревателя 50-100 Вт). Сделать 3 записи показаний приборов при установившемся тепловом режиме.

4. Установить третий режим (в пределах мощности нагревателя 50-100 Вт). Сделать 3 записи показаний приборов при установившемся тепловом режиме.

5. Вывести рукоятку автотрансформатора в крайнее левое положение, отключить установку.

6. Данные измерений и расчетов свести в таблицу 13.1.

Таблица 13.1 – **Протокол результатов измерений и их обработки**

Режим	№ замера	Мощность нагревателя, N, Вт	t_1, ^{0}C	t_2, ^{0}C	t_3, ^{0}C	t_{c1} ^{0}C	t_4, ^{0}C	t_5, ^{0}C	t_6 ^{0}C	t_{c2} ^{0}C	$\Delta t_{ср}$, ^{0}C	$\Phi_л$, Вт	$\Phi_к$, Вт	$\acute{\varepsilon}_{пр}$	$\lambda_{экв}$, Вт/мК
1	1														
	2														
	3														
	ср														
2	1														
	2														
	3														
	ср														
3	1														
	2														
	3														
	ср														

Обработка результатов опытов

Для установившегося теплового режима опытный коэффициент теплопроводности λ вычисляется по уравнению:

$$\lambda = \frac{\Phi_к \ln d_2 / d_1}{2\pi l \Delta t_{ср}}, \qquad (13.4)$$

где $\Delta t_{ср}=t_{c1}-t_{c2}$ – разность средних температур поверхностей труб, °С; d_1 – наружный диаметр внутренней трубы, мм; d_2 – внутренний диаметр наружной трубы, мм; l - длина труб, м; $\Phi_к$ – конвективный тепловой поток, Вт.

Конвективный тепловой поток через цилиндрический зазор

$$\Phi_к = \Phi - \Phi_л, \qquad (13.5)$$

где Ф – полный тепловой поток равный мощности нагревателя N, Вт;

$\Phi_л$ – тепловой поток за счет излучения, Вт, вычисляется по формуле:

$$\Phi_л = \varepsilon_{пр} C_0 F_1 \left[\left(T_{c1}/100 \right)^4 - \left(T_{c2}/100 \right)^4 \right], \qquad (13.6)$$

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}, \qquad (13.7)$$

где $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты; C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м^2 К^4), C_0 =5,67; F_1 – площадь поверхности нагрева внутренней трубы, м^2; F_2 – площадь поверхности нагрева наружной трубы, м^2; T_{c1}, T_{c2} – средние абсолютные температуры внутренней и наружной поверхностей труб, К; ε_1, ε_2 – степень черноты поверхностей внутренней и наружной труб; $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_{пр}$. Опытные трубы выполнены из слабо полированного дюраля, для которого степень черноты ε можно принять равной 0,35.

Расчетное значение эквивалентного коэффициента теплопроводности определяется следующим образом:

1. Вычисляют число Грасгофа:

$$Gr_{\delta,ж} = \beta \frac{g\delta^3 (t_{c1} - t_{c2})}{\nu_{ж}^2}\ , \qquad (13.8)$$

2. Вычисляют значение комплекса $(Gr\,\mathrm{Pr})_{\delta,ж}^{0,25}$.

3. По формуле (13.3) вычисляют коэффициент конвекции $\varepsilon_к$.

4. Вычисляют расчетное значение эквивалентного коэффициента теплопроводности $\lambda_{экв}$ по формуле (13.2).

Значение коэффициентов $\nu_ж$, $\lambda_ж$ и число Прандтля Pr выбирают из таблицы приложения А по $t_ж = 0{,}5(t_{cl} + t_{c2})$.

Содержание отчета

1. Краткое описание работы.
2. Принципиальная схема установки.
3. Протокол записи показаний измерительных приборов и обработки результатов измерений.
4. Пример расчета искомой величины.
5. Графики зависимостей эквивалентного коэффициента теплопроводности от температурного напора $\lambda_{экв} = f(\Delta t_{ср})$.
6. Результаты сравнения опытных данных с расчетными.
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. * Что учитывает коэффициент конвекции $\varepsilon_к$?
2. * Запишите выражение для определения коэффициента конвекции.
3. * Для чего при теплоотдаче в ограниченном пространстве вводится величина эквивалентный коэффициент теплопроводности?
4. Опишите механизм теплоотдачи в ограниченном пространстве.

5. Какие факторы влияют на процесс теплоотдачи в ограниченном пространстве?
6. Что такое определяющий размер? Что принимается в качестве определяющего размера при теплоотдаче в ограниченном пространстве?
7. Что такое определяющая температура? Какая температура принимается в качестве определяющей при теплоотдаче в ограниченном пространстве?
8. Каков характер процесса переноса теплоты в ограниченном пространстве при малых значениях коэффициента конвекции?
9. Что такое тепловой пограничный слой? Как определяется толщина теплового пограничного слоя?
10. Что такое гидродинамический пограничный слой? Как определяется толщина гидродинамического пограничного слоя?

Литература

1. Драганов Б.Х. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве. / Б.Х. Драганов и др. – М.: Агропромиздат, 1990.
2. Теплотехника./ В.Н. Луканин [и др.];/ Под редакцией В.Н. Луканина.- 2-е изд. – М.: Высшая школа, 2000.
3. Кудинов В.А. Техническая термодинамика./Кудинов В.А., Карташов Э.М. – М.: Высшая школа, 2005.
4. Карминский В.Д. Техническая термодинамика. – М.: Высшая школа, 2005.

Лабораторная работа №14

Определение степени черноты полного излучения серого тела методом сравнения с эталонным телом

Цель работы: определить экспериментальным путем степень черноты полного излучения стальной поверхности методом сравнения.

Задание для предварительной подготовки

1. Изучить настоящие методические указания и рекомендуемую литературу.
2. Подготовить ответы на контрольные вопросы 1...3.
3. Оформить заготовку письменного отчета по лабораторной работе.

Общие сведения

Тепловое излучение представляет собой процесс рассеивания внутренней энергии нагретого тела при помощи электромагнитных волн определенной длины (тепловых лучей) и фототоков и поэтому характеризуется тремя основными параметрами: частотой излучения ν, длиной волн λ и скоростью распространения волны или фототока (скоростью света). Излучение нагретых тел и сред можно рассматривать как во всем спектре длин волн от 0 до ∞, так и в узком диапазоне длин от 0 до λ. В первом случае излучение называется полным (или интегральным), во втором – монохроматическим. В дальнейшем речь пойдет только о полном излучении.

В качестве одной из характеристик излучаемых свойств тел и сред выступает полная излучательная способность *E.* Она представляет собой количество энергии, излучаемой при данной температуре во всем интервале длин волн с единицы поверхности в единицу времени, Вт/м^2:

$$E = \frac{Q_t}{F\tau}\ , \qquad (14.1)$$

Основным законом теплового излучения является закон Стефана-Больцмана, устанавливающий зависимость полной излучательной способности абсолютно черного тела E_0 от температуры *T,* Вт/м^2:

$$E_0 = C_0\left(\frac{T}{100}\right)^4, \qquad (14.2)$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютного черного тела, Вт/м^{2}К^4, равен 5,67.

В природе абсолютное большинство тел и сред являются нечерными (серыми). Для серых тел закон Стефана-Больцмана имеет вид:

$$E = C_0 \varepsilon \left(\frac{T}{100} \right)^4, \qquad (14.3)$$

где E – полная излучательная способность серого тела; $\varepsilon = E / E_0$ – степень черноты полного излучения серого тела.

Величина степени черноты ε колеблется в пределах от 0 до 1 и является сложной функцией природы излучающего тела, его температуры, состояния поверхности. Поэтому зачастую степень черноты тела сама является объектом исследований.

Лучистый теплообмен между двумя серыми телами возможен в следующих случаях:

1. Между двумя твердыми телами, если пространство между ними заполнено прозрачной (для тепловых лучей) средой.

2. Между твердым телом (или жидкостью) и газом, если этот газ поглощает лучистую энергию.

Результирующий поток излучения $E_{1\text{-}2}$, идущий с тела 1 (более нагретого) на тело 2 для стационарных тепловых условий (когда температуры тел, участвующих в теплообмене, постоянны), определяется по уравнению, Вт:

$$\Phi_{изл} = E_{1-2} = C_0 \varepsilon_{пр} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_{1-2}, \qquad (14.4)$$

где $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты системы тел, зависящая от степени черноты каждого тела, а также от геометрической формы и взаимного расположения тел.

В самом общем случае приведенная степень черноты системы из двух серых тел определяется по выражению:

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) \varphi_{1-2} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \varphi_{2-1}}, \qquad (14.5)$$

где ε_1 и ε_2 – степени черноты тела 1 и 2 соответственно; $\varphi_{1\text{-}2}$ и $\varphi_{2\text{-}1}$ – средние по поверхности угловые коэффициенты излучения тела 1 на тело 2 и тела 2 на тело 1, зависящие от формы и взаимного расположения тел, $F_{1\text{-}2}$ – взаимная излучающая поверхность, м^2 – зависящая от размеров излучающих тел, их формы и взаимного расположения.

Так как нагретое тело отдает свое тепло не только излучением, но и конвекцией, то при исследовании излучательных свойств данного тела очень важно выделить, или оценить конвективную составляющую общего теплового потока, идущего от тела.

Описание лабораторной установки

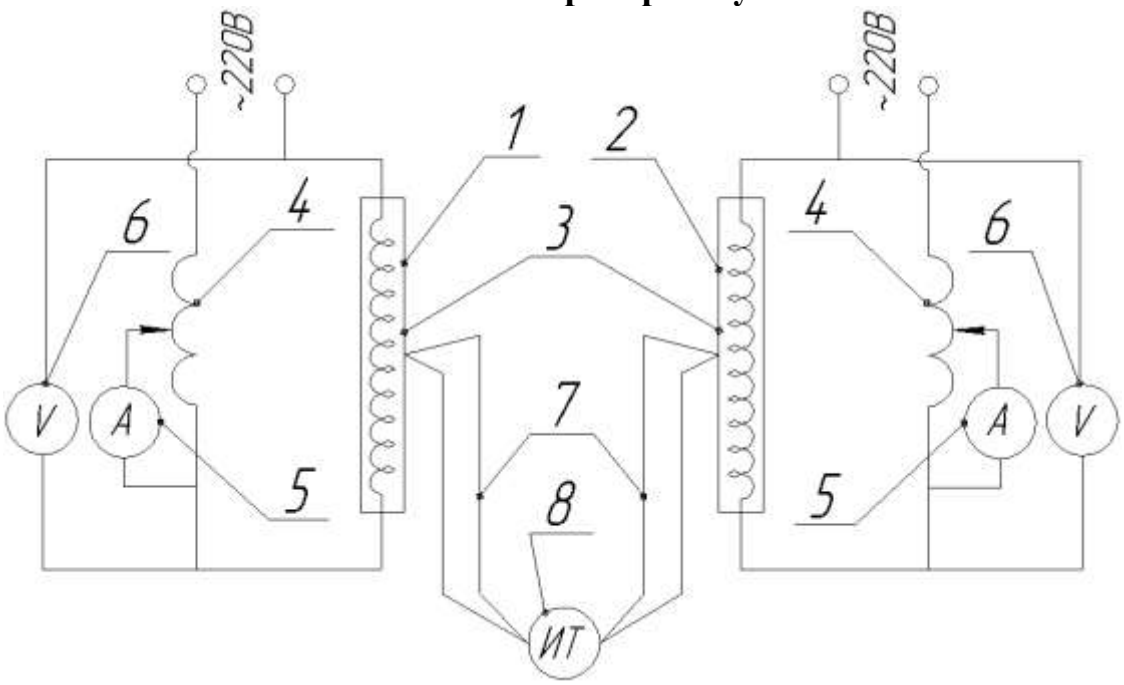


Рис. 14.1 – **Схема лабораторной установки**

Экспериментальная установка (рис.14.1) состоит из двух вертикально расположенных цилиндров, один из которых (рабочий) выполнен из стали –1, а второй (эталонный) – из алюминия 2. Оба цилиндра имеют размеры $d_{ал}$ = 30 мм, $d_{ст}$= 26 мм, длина l =480 мм. Внутри цилиндров расположены электрические спирали 3. Для измерения мощности, подаваемой на спирали, в их цепях установлены амперметр 5 и вольтметр 6. Определение температуры поверхности производится с помощью термопар 7, зачеканенных в каждый цилиндр. Значение температур определяется с помощью электронного измерителя температуры 8. Изменение режимов работы производится с помощью лабораторных автотрансформаторов 4.

Порядок проведения опытов

1. Включить установку в сеть и установить первоначальное значение мощности (по указанию преподавателя) нагревателей.

2. Через каждые 7-10 минут снимать показания всех приборов.

3. По достижении установившегося теплового режима, о чем будет свидетельствовать постоянство во времени температур обоих цилиндров, изменить (увеличить) мощность нагревателя в стальном цилиндре на 2-7 Вт. Повторить замеры.

4. Если по достижении установившегося режима температуры обоих цилиндров окажутся одинаковыми, закончить опыт и выключить установку. В случае отсутствия равенства температур вновь изменить мощность нагревателя стального цилиндра на 2-7 Вт и повторить замеры.

5. Вывести рукоятки автотрансформаторов в крайнее левое положение, отключить установку.

6. Результаты измерений занести в таблицу 14.1.

Таблица 14.1 – **Протокол результатов измерений и их обработки**

№ п/п	Алюминевый цилиндр		Стальной цилиндр		Температура воздуха, $t_в$, ^0C
	Тепловой поток, $Ф_{ал}$, Вт	Температура $t_{ал}$, ^0C	Тепловой поток, $Ф_{ст}$, Вт	Температура $t_{ст}$, ^0C	

Обработка результатов опытов

Определение степени черноты стальной поверхности производится методом сравнения теплоотдачи при стационарных тепловых условиях от двух геометрически одинаковых цилиндров при условии равенства температур поверхности этих цилиндров:

$$t_{ст} = t_{ал} = t_{min}. \quad (14.6)$$

В качестве эталонного служит цилиндр из алюминия с известной степенью черноты $\varepsilon_{ал} = 0{,}11$.

Тепловые балансы каждого цилиндра включают в себя как излучательную $Ф_{изл}$, так и конвективную $Ф_К$ составляющую общего теплового потока Ф, Вт.

Для стального цилиндра:

$$Ф_{ст} = Ф_{к\,ст} + Ф_{изл\,ст}, \quad (14.7)$$

Для алюминиевого цилиндра:

$$Ф_а = Ф_{к.ал} + Ф_{изл.ал}. \quad (14.7а)$$

Общий тепловой поток каждого цилиндра определяется по выражениям:

$$Ф_{ст} = N_{ст} = U \cdot I_{ст} \quad (14.8)$$

$$Ф_{ал} = N_{ал} = U \cdot I_{ал} \quad (14.8а)$$

где $N_{ст}$ и $N_{ал}$, – мощности спиралей внутри стального и алюминиевого цилиндров, Вт.

Тепловой поток, идущий от каждого цилиндра в результате конвективной теплоотдачи $\Phi_к$ в стационарных тепловых условиях, определяется по уравнениям, Вт:

$$\Phi_{к\,ст} = \alpha_{к\,ст}(t_{ст} - t_в)F_{ст}; \quad (14.9)$$

$$\Phi_{к\,ал} = \alpha_{к\,ал}(t_{ал} - t_в)F_{ал}, \quad (14.9а)$$

где $\alpha_{к\,ст}$ и $\alpha_{к\,ал}$, – коэффициенты конвективной теплоотдачи с поверхности стального и алюминиевого цилиндров, Вт/м^2 ^{0}С.

$$F_{ст} = F_{ал} = F_{изл}\,, \quad (14.10)$$

где $F_{ст}$ и $F_{ал}$ – площади боковой поверхности стального и алюминиевого цилиндров; $t_в$ – температура воздуха в помещении.

Так как $a_к$ не зависит от материала поверхности, то в случае (14.6), и из равенства температурных напоров, следует:

$$\alpha_{к\,ст} = \alpha_{к\,ал} \quad (14.11)$$

$$\text{и } \Phi_{к\,ст} = \Phi_{к\,ал}. \quad (14.12)$$

Лучистую составляющую общего теплового потока $\Phi_{изл}$ определяют по уравнению (14.4). При этом в связи с тем, что определение искомой в работе величины $\varepsilon_{ст}$ происходит в момент равенства температур поверхностей цилиндров и результирующий тепловой поток между ними будет равен 0, то тепловой поток излучения с каждого цилиндра идет на другие тела (стены помещения, стенды, приборы), имеющие комнатную температуру $t_в$. В этих условиях (когда излучающее тело находится внутри другого, поверхность которого значительно больше излучающего тела)

$$\varphi_{1-2} = 1, \varphi_{2-1} = 0, \quad (14.13)$$

$$F_{1\text{-}2} = F_{цил}. \quad (14.14)$$

Тогда уравнение (14.5) для данного случая примет вид:

$$\varepsilon_{пр} = \varepsilon_1 = \varepsilon_{ст} \quad (14.15)$$

$$\varepsilon_{пр} = \varepsilon_2 = \varepsilon_{ал}.$$

А уравнение (14.4) запишется с учетом (14.15) и (14.14) в виде:

$$\Phi_{изл.ст} = E_{ст} = C_0\varepsilon_{ст}\left[\left(\frac{T_{ст}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_в}{100}\right)^4\right]\cdot F_{цил} \quad (14.16)$$

$$\Phi_{изл.ал} = E_{ал} = C_0 \varepsilon_{ал} \left[\left(\frac{T_{ал}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_в}{100} \right)^4 \right] \cdot F_{цил} \qquad (14.16а)$$

Если теперь в уравнения тепловых балансов (14.7) и (14.7а) подставить выражения (14.8), (14.8а) и (14.12), то при вычитании (14.7) из (14.7а) с учетом (14.6) получим:

$$N_{ст} - N_{ал} = C_0 (\varepsilon_{ст} - \varepsilon_{ал}) \left[\left(\frac{T_{пов.тр}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_в}{100} \right)^4 \right] \cdot F_{цил} \qquad (14.17)$$

Из уравнения (14.17) следует, что при равенстве температур поверхностей цилиндров получающееся различие электрических мощностей, подаваемых на нагреватели, объясняется лишь различием степени черноты данных цилиндров. Из выражения (14.17) можно определить неизвестную степень черноты стального цилиндра:

$$\varepsilon_{ст} = \varepsilon_{ал} + \frac{\Phi_{изл.ст} - \Phi_{изл.ал}}{C_0 F_{цил} \left[\left(\frac{T_{тр}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_в}{100} \right)^4 \right]} \qquad (14.18)$$

Построить график зависимости степени черноты стального цилиндра от температуры поверхности цилиндра $\varepsilon_{ст}=f(t_{тр})$.

Содержание отчета

1. Краткое описание работы.
2. Принципиальная схема установки.
3. Протокол записи показаний измерительных приборов.
4. Пример обработки результатов измерений и расчета искомой величины.
5. График зависимости $\varepsilon_{ст}=f(t_{тр})$.
6. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. *****Физическая суть передачи тепла излучением.
2. *Закон Стефана-Больцмана для теплоотдачи излучением между двумя серыми телами.
3. *Что такое абсолютное черное и серое тело для передачи тепла излучением?
4. Формула для приведенного коэффициента излучения системы параллельно расположенных поверхностей.

5. Что такое степень черноты серого тела, какова его связь с коэффициентом поглощения? Дайте определение закона Кирхгофа.
6. Записать уравнение теплового баланса для одного из цилиндров лабораторной установки и дать пояснения.
7. С какой целью в работе необходимо выравнивать температуру поверхностей обоих цилиндров?
8. Что называют поверхностной плотностью потока излучения, спектральной плотностью потока излучения?
9. Какой спектр излучения у твердых, жидких и газообразных тел?
10. Сформулируйте законы Планка и Вина.

Литература

1. Драганов Б.Х. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве. / Б.Х. Драганов и др. – М.: Агропромиздат, 1990.
2. Теплотехника./ В.Н. Луканин [и др.];/ Под редакцией В.Н. Луканина.- 2-е изд. – М.: Высшая школа, 2000.
3. Кудинов В.А. Техническая термодинамика./Кудинов В.А., Карташов Э.М. – М.: Высшая школа, 2005.
4. Карминский В.Д. Техническая термодинамика. – М.: Высшая школа, 2005.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 – **Значения констант подобия С и n в зависимости от Gr·Pr**

Константы	Режим движения и Gr ·Pr			
	Пленочный $< 10^{-3}$	Переходный $10^{-3}…5\cdot10^{-2}$	Ламинарный $5\cdot10^{-2}…2\cdot10^{7}$	Турбулентный $2\cdot10^{7}…10^{13}$
C	0,5	1,18	0,54	0,135
n	0	0,125	0,25	0,38

Таблица А.2 – **Физические параметры сухого воздуха (при барометрическом давлении 101,3 кПа)**

Температура воздуха, $t\ ^0C$	Теплопроводность, $\lambda\cdot10^{-2}$ Вт/ (м·К)	Температуропроводность, $a\cdot10^{-6}$ $м^2/с$	Кинематическая вязкость, $\nu\cdot10^{-6}$ $м^2/с$	Термический критерий Прандтля, Pr
0	2,44	18,8	13,28	0,707
10	2,51	20,0	14,16	0,705
20	2,59	21,4	15,06	0,703
30	2,67	22,9	16,00	0,701
40	2,76	24,3	16,96	0,699
50	2,83	25,7	17,95	0,698
60	2,90	27,2	18,97	0,696
70	2,93	28,6	20,02	0,694
80	3,05	30,2	21,09	0,692
90	3,13	31,9	22,10	0,690
100	3,21	33,6	23,13	0,688

Таблица А.3 – **Коэффициенты теплопроводности строительных материалов**

Материал	$\lambda\cdot10^{-2}$, Вт/ (м·К)
Бетон на кирпичном щебне	1,05
Кирпичная кладка из обыкновенного глиняного кирпича	0,81
Штукатурка из цементно-песчаного раствора	0,93
Штукатурка из известково-песчаного раствора	0,81
Штукатурка из известково-песчаного раствора на драни	0,64

Таблица А.4 – **Коэффициенты теплопередачи строительных материалов**

Материал	K , $Вт/(м^2\ ^\circ C)$
Окно одинарное	5,8
Окно двойное	2,72
Стена кирпичная толщиной :	
в 1,5 кирпича	1,55
в 2 кирпича	1,24
в 3 кирпича	0,65

Таблица А.5 – **Удельная тепловая характеристика при строительном объеме зданий**

0,5…1,0 тыс.м	0,7…0,52 Вт/(м^3 °С)
1,0…2,0 тыс.м	0,52…0,47 Вт/(м^3 °С)

Таблица А.6 – **Коэффициенты теплопередачи нагревательных приборов при открытой их установке**

Нагревательные приборы	Коэффициенты теплопередачи Ктр, Вт/(м^2 °С), при Δtср.		
	50-60	60-70	70-80
Чугунные радиаторы:			
М-140; НМ-150;	9,2	9,5	9,9
М-140 АО	8,8	9,3	9,5
Стальная труба, диаметр в мм			
< 32	13,3	14,0	14,6
32…108	11,8	12,2	12,8

Таблица А.7 – **Значение коэффициента β_1**

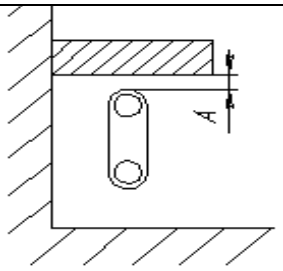
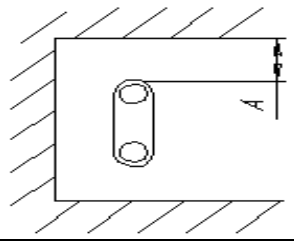
Способ установки	Эскиз	А, мм	β_1
Прибор установлен у ниши и перекрыт доской в виде полки		440 80 100	1,05 1,03 1,02
Прибор установлен в стенной нише глубиной более 130 мм		40 80 100	1,11 1,07 1,06

Таблица А.8 – **Значение коэффициента β_2, учитывающего остывание воды в трубопроводах при скрытой их прокладке (насосная циркуляция)**

Число этажей в здании	Значение коэффициента β_2 для рассчитываемого этажа			
	1	2	3	4
Однотрубная система				
2	1,04	-	-	-
3	1,05	-	-	-
4	1,05	1,04	-	-
Двухтрубная система с верхней разводкой				
2	1,05	-	-	-
3	1,05	1,05	-	-
4	1,05	1,05	1,03	-

Окончание таблицы А.8

Число этажей в здании	Значение коэффициента β_2 для рассчитываемого этажа			
	1	2	3	4
Двухтрубная система с нижней разводкой				
2	-	1,03	-	-
3	-	-	1,03	-
4	-	-	1,03	1,05

Таблица А.9 – **Значение коэффициента β_4, учитывающий способ установки нагревательного прибора**

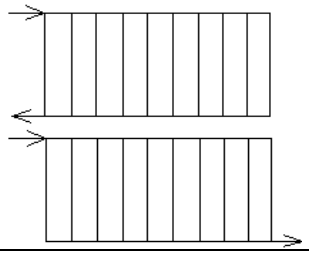
Относительный расход воды в нагревательном приборе на 1 экм по отношению к условному расходу 17,4 кг/экм ч.		
0,6	0,94	0,97
0,7	0,96	0,98
0,8	0,97	0,99
1,0	0,99	1,00
2,0	1,01	1,03
3,0	1,02	1,09
4,0	1,03	1,12
5,0	1,05	1,13

Таблица А.10

Тип прибора	Поверхность нагрева секции	
	$м^2$	экм
Чугунные радиаторы:		
М-140	0,254	0,310
М-140 АО	0,299	0,350
НМ-150	0,254	0,310
РД-90	0,203	0,275
РД-26	0,205	0,275
В-85 А	0,176	0,240

Таблица А.11

Коэффициент пересчета в $см^2$ на экм	Размеры секции, мм		
	Полная высота	Глубина	Ширина
1,22	582	140	96
1,17	582	140	96
1,22	582	150	96
1,35	582	90	96
1,34	582	90	100
1,36	593	87	88

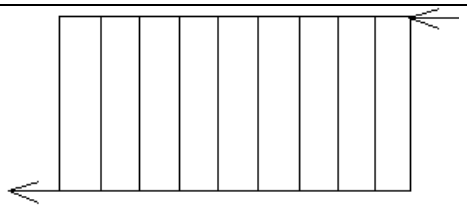
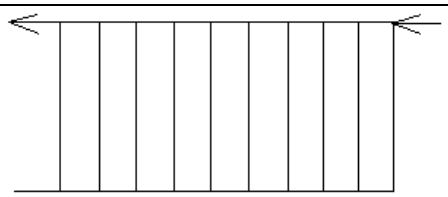
Таблица А.12 – **Значение коэффициента β3 в зависимости от количества секций в радиаторе**

До 5	6…10	11…20	более 20
0,95	1,00	1,05	1,10

Таблица А.13

Трубы	мм	15	20	25	32	40	50
	экм	0,12	0,15	0,18	0,21	0,24	0,30

Таблица А.14 – **Значение коэффициента $q_{экм}$, Вт/(экм °С) в зависимости от схемы присоединения нагревательного прибора к стоякам системы отопления**

Δtcp		
50	7,28	5,7
55	7,50	5,95
60	7,72	6,01
65	7,92	6,10
70	8,10	6,17
75	8,29	6,22
80	8,42	6,28
85	8,52	6,35
90	8,79	6,40

Приложение Б

Элементы теории ошибок

Все измерения можно производить только с определенной степенью точности. Точность измерения определяется той наименьшей частью единицы меры, до которой с уверенностью можно произвести измерение. Для исключения случайных ошибок, возможных при каждом измерении, измерения следует производить несколько раз и брать среднее арифметическое всех результатов.

Если величина *A* измерялась *n* раз и A_1, A_2, …A_n – результаты соответствующих измерений, то среднее значение

$$A_{cp} = \frac{A_1 + A_2 + ... + A_n}{n}, \qquad (Б.1)$$

Отклонение $\Delta A_i = |Acp - A_i|$ называется абсолютной ошибкой отдельного измерения. Величина

$$\Delta A = \frac{\Delta A_1 + \Delta A_2 + ... + \Delta A_n}{n} \qquad (Б.2)$$

называется средней абсолютной ошибкой измерения.

Обычно считают, что $A_{ср}-\Delta A<A<A_{ср}+\Delta A$.

Отношение $\Delta A/A_{ср}$ называется средней относительной ошибкой измерения. Часто ее выражают в процентах.

Результат, интересующий экспериментатора, редко может быть получен измерением только одной величины. Обычно приходится измерять несколько величин и результат вычислять по соответствующей формуле

$$U = f(X_1, X_2, \ldots X_n). \qquad (Б.3)$$

Среднюю относительную ошибку измерения определяют по выражению

$$\Delta U \le \sum_{i=1}^{n}\left(\left|\frac{\partial}{\partial x_i} f(X_1, X_2, \ldots X_n)\right| \bullet |\Delta X_i|\right). \qquad (Б.4)$$

Средняя относительная ошибка измерения $\Delta U/U$ будет равна

$$\delta \le \sum_{i=1}^{n}\left(\left|\frac{\partial}{\partial x_i} \ln f(X_1, X_2, \ldots X_n)\right| \bullet |\Delta X_i|\right). \qquad (Б.5)$$

В таблице Б.1 приведены выражения для абсолютных и относительных ошибок результатов, вычисленных по некоторым часто встречающимся формулам.

Таблица Б.1

Формула	Абсолютная ошибка	Относительная ошибка	Формула	Абсолютная ошибка	Относительная ошибка
A+B	$\Delta A+\Delta B$	$\frac{\Delta A+\Delta B}{\lvert A+B\rvert}$	$\frac{A}{B}$	$\frac{B\cdot\Delta A+A\cdot\Delta B}{B}$	$\frac{\Delta A}{\lvert A\rvert}+\frac{\Delta B}{\lvert B\rvert}$
A-B	$\Delta A+\Delta B$	$\frac{\Delta A+\Delta B}{\lvert A-B\rvert}$	A^n	$nA^{n-1}\Delta A$	$n\frac{\Delta A}{\lvert A\rvert}$
A·B	$A\Delta B+B\Delta A$	$\frac{\Delta A}{\lvert A\rvert}+\frac{\Delta B}{\lvert B\rvert}$	$\frac{n}{\sqrt{A}}$	$\frac{1}{n}A^{\frac{1-n}{n}}\cdot\Delta A$	$\frac{1}{n}\cdot\frac{\Delta A}{\lvert A\rvert}$

Пример. Для определения плотности твердого тела необходимо измерить объем тела и его массу. Пусть измерение объема тела проводилось с точностью до 1,5 %, а масса тела – с точностью до 1 %. Тогда относительная ошибка измерения плотности тела составит 2,5 %. Таким образом, можно предположить, что

$$\left[\frac{m}{V}\right]_{ср}(1-0{,}025) < \frac{m}{V} < \left[\frac{m}{V}\right]_{ср}(1+0{,}025).$$

Учебное издание

ТЕПЛОТЕХНИКА

Учебно-методическое пособие
к лабораторным работам

Составители:

Савушкин Андрей Владиславович
Лекомцев Петр Леонидович
Новокрещенов Юрий Васильевич
Артамонова Людмила Петровна
Дресвянникова Елена Владимировна

Редактор М.Н. Перевощикова
Технический редактор М.Ю. Соловьева

Подписано в печать_____2009 г.
Формат 60х84/16.Бумага офсетная. Гарнитура Times New Romans.
Усл.-п.л.5,75. Уч.-изд. 4,95. Тираж 150 экз. Заказ №_____
ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА
426069, г.Ижевск, ул.Студенческая, 11.