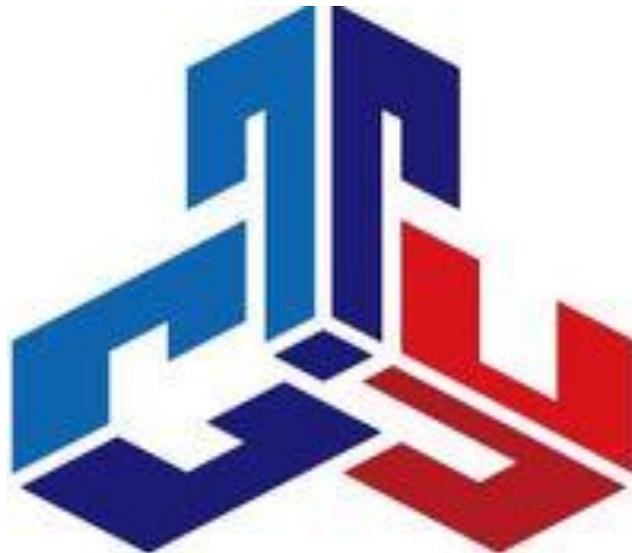


СОВРЕМЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



**ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ И
ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯХ**

Рязань 2018

УДК 537
ББК 32.85
Э45

Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях, -

Учебно-методическое пособие /сост. Коненков Н.В.,Лопатин Е.И.

Совр. техн. универ т. – Рязань, 2018. 36 с. – 50 экз.

Рецензент:

к.т.н.; профессор кафедры математических и естественнонаучных дисциплин
Рязанского высшего воздушно-десантного командного училища (военного института)
им. генерала армии В. Ф. Маргелова, Ю.В. Гармаш

Учебно-методическое пособие посвящено энергоиспользованию которое непосредственным образом связано с энергосбережением, которое предусматривает достижение наибольшей доли полезно используемой энергии за счет минимизации потерь, оптимизации теплотехнологических процессов, рекуперации части отработавшей теплоты и возвращение ее в тепловую схему энергетической или технологической установки.

Учебное пособие для студентов-бакалавров
Современного технического университета

*Печатается по решению Ученого Совета
Современного технического университета.*

УДК 537
ББК 32.85
Э45

© Н.В.Коненков ,Е.И. Лопатин
© Современный технический университет, 2018

Содержание:

Лабораторная работа №1 “Определение средней массовой изобарной теплоемкости воздуха”	4
Лабораторная работа №2 “Определение показателя адиабаты воздуха”	14
Лабораторная работа №3 “ Изучение работы поршневого компрессора ”	27
Лабораторная работа №4 “ Теплоотдача экспериментальной горизонтальной трубы при свободном движении воздуха ”	37
Лабораторная работа №5 “ Определение коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов методом трубы ”	49
Приложение 1 “Протоколы экспериментальных и расчётных данных ” ..	60
Приложение 2 “Физические свойства сухого воздуха ”	66

Лабораторная работа N 1.

Определение средней массовой изобарной теплоемкости воздуха

Цель работы.

Целью работы является экспериментальное определение средней массовой теплоемкости воздуха при постоянном давлении и сопоставление результатов со значениями, полученными на основании молекулярно-кинетической теории (МКТ).

Теоретическое положение.

Теплоемкость является теплофизической характеристикой любого вещества. При термодинамических процессах важно знать количественное соотношение между теплотой Q , переданной в процессе, и изменением температуры t рабочего тела. Это соотношение устанавливается теплоемкостью.

Под теплоемкостью понимают такое количество теплоты, которое необходимо подвести или отвести от единицы количества вещества, чтобы при этом его температура изменилась на один градус.

Теплоемкость тела, соответствующая бесконечно малому изменению температуры, называется истинной теплоемкостью:

$$C = dq/dt, \quad (1)$$

а теплоемкость тела, соответствующая изменению температуры на конечную величину от t_1 до t_2 , называется средней теплоемкостью:

$$C \left| \begin{array}{l} t_2 \\ t_1 \end{array} \right. = \frac{Q}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

Теплоемкость разделяют на:

-массовую C , кДж/(кг·К);

-объемную (при нормальных условиях $P=101.3$ кПа, $t = 0$ °С)

$C_{об}$, кДж/(м³·К);

-мольную C_{μ} , кДж/(кмоль К).

Связь между C , $C_{об}$, C_{μ} может быть установлена зависимостью:

$$C = C_{об} v = C_{\mu} / \mu, \quad (3)$$

где v -удельный объем, м³/кг,

μ -молекулярная масса газа, а. е. м.,

или

$$C_{об} = C_{\mu} / 22.4, \quad (4)$$

где 22.4 - объем 1 кмоль газа при нормальных условиях, м³/кмоль.

Теплоемкость является функцией процесса, зависящей от характера его протекания и может изменяться от $-\infty$ до $+\infty$. В частности, если процесс передачи тепла осуществляется при постоянном давлении ($P=\text{const}$), теплоемкость называется изобарной и обозначается C_p , а при осуществлении процесса при постоянном объеме ($V=\text{const}$) теплоемкость называется изохорной и обозначается C_v .

Связь между C_p и C_v для газов может быть выражена, через уравнение Майера:

$$C_p = C_v + R, \quad (5)$$

или через коэффициент Пуассона (показатель адиабаты):

$$k = \frac{c_p}{c_v}, \quad (6)$$

В случае изотермического процесса $dt=0$ и $C = \infty$. Когда отсутствует передача тепла $dq=0$ и $C=0$.

Согласно молекулярно-кинетической теории газов, мольные теплоемкости идеального одноатомного газа вычисляются по формулам, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Мольные теплоемкости идеального газа.

Атомность	Одноатомный	Двухатомный	Многоатомный
$C_{vм}$	$\frac{3}{2} R_{ун}$	$\frac{5}{2} R_{ун}$	$\frac{6}{2} R_{ун}$
$C_{pм}$	$\frac{5}{2} R_{ун}$	$\frac{7}{2} R_{ун}$	$\frac{8}{2} R_{ун}$

$R_{ун} = 8314$ - универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль К).

Таким образом, *теплоемкость идеального газа не зависит от температуры, в отличие от теплоемкости реального газа.* Поэтому при практических расчетах используют среднюю теплоемкость, определяемую для данного процесса в интервале температур от t_1 до t_2 (по (1.2)). Очевидно, что чем меньше разность температур, тем больше приближение значения средней теплоемкости к истинной.

Значения теплоемкости для различных веществ приводятся в специальных термодинамических таблицах. Средняя теплоемкость может быть определена по (1.2), или по формуле:

$$c_{p1}^t = \frac{c_{p2}^t - c_{p1}^t}{t_2 - t_1}, \quad (7)$$

где c_{p1}^t и c_{p2}^t - средние теплоемкости газа в диапазоне температур от 0 до t_1 и от 0 до t_2 соответственно.

Одной из задач лабораторной работы является сравнение полученного опытным путем значения теплоемкости воздуха C_p для различных интервалов температур со значениями теплоемкости, определенными по термодинамическим таблицам для этих же температурных диапазонов, или по МКТ.

Описание экспериментальной установки.

Определение теплоемкости воздуха производится методом проточного калориметрирования. Схема установки представлена на рис.1.1. Калориметр состоит из металлического корпуса 1, внутри которого размещен нагревательный элемент 3. Снаружи в зоне нагрева корпус покрыт тепловой изоляцией 2 для уменьшения тепловых потерь. Нагревательный элемент подключен через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) 11, при помощи которого осуществляется регулирование тепловой мощности калориметра, определяемой по показаниям вольтметра 13 и амперметра 12. Включение ЛАТРа и нагревателя в сеть производится выключателем 9. Для индикации работы нагревателя предусмотрена сигнальная лампа 10.

Постоянный расход воздуха через калориметр создается вентилятором 4 и определяется по показанию жидкостного тягонапоромера (ТНЖ) 7, для которого датчиком является пневмотрубка 6.

Вентилятор приводится в действие электродвигателем 5, подключаемого к сети общим выключателем 8.

Для определения разности температур воздушного потока на входе и на выходе из калориметра установлены термопары 14, которые подключены к измерителю температуры.

Включение всей лабораторной установки осуществляется общим выключателем 8.

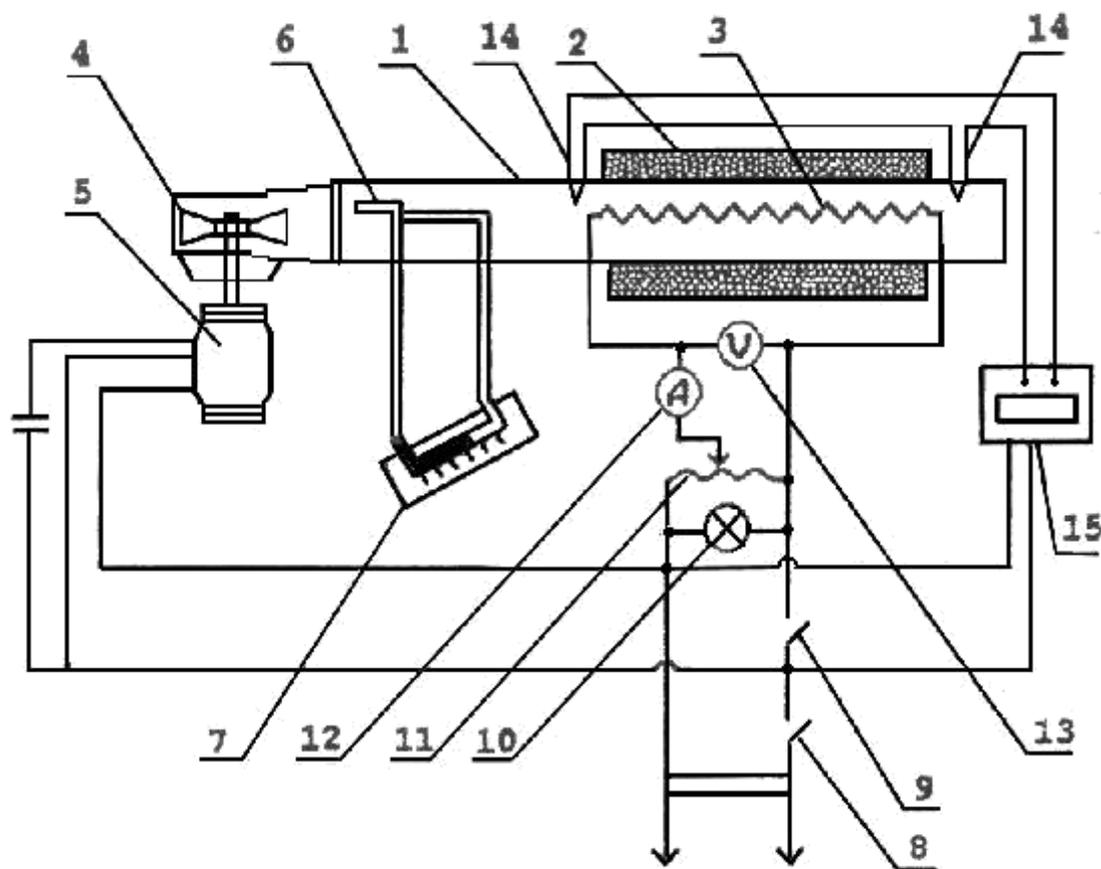


Рис. 1.1. Схема экспериментальной установки.

1 - металлический корпус; 2 - тепловая изоляция; 3 - электронагревательный элемент; 4 - вентилятор; 5 - электродвигатель; 6 - пневмотрубка-расходомер; 7 - жидкостный тягонапоромер; 8 – общий выключатель; 9- выключатель на нагревателя; 10 - сигнальная лампа работы нагревателя; 11 - лабораторный автотрансформатор; 12 - амперметр; 13 - вольтметр; 14 – медь-константановые термопары; 15 – измеритель температуры.

Порядок проведения опыта.

1. Проверить, что все выключатели находятся в выключенном состоянии, рукоятка ЛАТРа - в крайнем выключенном положении, уровень воды в ТНЖ - на "нуле".

Замерить барометрическое давление и температуру воздуха в помещении.

3. Включить установку в сеть общим выключателем 8, при этом начнет работать вентилятор.

4. Включить в сеть измеритель температуры.

5. Включить ЛАТР выключателем 9. При этом загорается сигнальная лампа 10.

6. Установить с помощью рукоятки ЛАТРа нагрузку нагревательного элемента, ориентируясь на показания амперметра. Величина тока задается преподавателем или принимается в начале 1,5 А, затем для трех других режимов – 2,0; 2,5; 3 А.

7. Через 5 минут после выставления нагрузки ЛАТРОм провести 2-3 измерения величины температуры. При этом ее величина не должна отличаться от предыдущего замера более чем на 1°C . В этом случае режим можно считать установившимся.

8. При установившемся режиме необходимо произвести замеры и запись показаний остальных приборов лабораторной установки: величину тока I , напряжение U , динамическое давление $R_{\text{дин}}$. (по ТНЖ).

9. Повторить изложенное в пп. 6-8 для трех следующих режимов.

10. Закончив измерения, отключить универсальный вольтметр, с помощью рукоятки ЛАТРа уменьшить мощность нагревателя до "нуля" (нулевое показание вольтметра и амперметра) и отключить нагреватель и ЛАТР выключателем 9.

11. Через 2-3 минуты отключить вентилятор выключателем 8. Результаты замеров заносятся в протокол (приложение 1.).

Обработка полученных данных и оформление отчета.

1. Определяется тепловая мощность нагревательного элемента:

$$Q = U I, \text{ Вт}, \quad (8)$$

где U - напряжение, В,

I - сила тока в цепи нагревателя, А.

2. По трем последним значения показаний измерителя определить среднее значение n , определить повышение температуры воздуха в калориметре: Δt

3. Из уравнения состояния идеального газа определить плотность воздуха на входе в калориметр:

$$\rho = \frac{P_{\text{бар}} \cdot \mu}{R_{\text{ун}} (t_{\text{в}} + 273)} \text{ , кг/м}^3 \quad (9)$$

где $P_{\text{бар}}$ - барометрическое давление воздуха, Па, определяется по лабораторному барометру;

$\mu = 28,9$ - молекулярная масса воздуха, а. е. м.,

$t_{\text{в}}$ - температура окружающего воздуха, °С, определяется по лабораторному термометру.

$$R_{\text{ун}} = 8314 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$$

4. По показанию ТНЖ определить среднюю скорость воздуха в калориметре:

$$V = 3,94 \sqrt{\frac{P_{\text{дин}}}{\rho}} \text{ , м/с} \quad (10)$$

где $P_{\text{дин}}$ - скоростной напор, измеренный по ТНЖ, дел.

5. Определить массовый секундный расход воздуха через калориметр:

$$G = \rho V \frac{\pi d^2}{4} \text{ , кг/с} \quad (11)$$

где $d = 0.05$ - внутренний диаметр калориметра, м.

6. Из условия теплового баланса (равенства мощности нагревателя и количества теплоты, воспринимаемой в секунду обтекающим его воздухом) определяется теплоемкость воздуха:

$$C_p^{t_2} = \frac{Q}{G \Delta t 1000}, \text{ кДж/(кг } ^\circ\text{C)} \quad (12)$$

где $t_1 = t_B$ - температура воздуха на входе в калориметр, $^\circ\text{C}$,

$t_2 = t_1 + \Delta t$ - температура воздуха на выходе из калориметра, $^\circ\text{C}$.

7. По определенным для трех режимов значениям средней теплоемкости построить график зависимости теплоемкости от средней температуры воздуха.

8. Вычислить по (7) среднюю изобарную теплоемкость воздуха C_p для каждого режима по табличным данным (приложение 2).

9. Определить экспериментальную погрешность измерений для каждого режима:

$$\sigma = \left| \frac{C_p - C_{\text{таб}}}{C_{\text{таб}}} \right| \cdot 100, \%, \quad (13)$$

где C_p - значение теплоемкости, полученное опытным путем (по(12)),

$C_{\text{таб}}$ - табличное значение теплоемкости, определенное по (7)

10. Рассчитать значение теплоемкостей C , используя выражение (3) и сравнить их с величиной, полученной по МКТ (табл. 1.).

Сделать вывод о величине расхождения изобарной теплоемкости, определенной в опыте, вычисленной по табличным данным и определенной по МКТ.

Отчет оформляется один на бригаду и должен содержать следующее: основные положения теории; краткое описание экспериментальной установки и схему; результаты замеров и расчетов в виде протокола (приложение 1.); графическую зависимость теплоемкости C_p от температуры. Расчеты прилагаются на отдельном листе.

Контрольные вопросы.

При допуске к лабораторной работе.

1. Что является целью работы?
2. Какой метод используется для определения теплоемкости?
3. С помощью каких датчиков определяются значения разности температур Δt ?
4. Каким образом изменяется мощность нагревательного элемента?
5. По показаниям каких приборов определяется величина мощности нагревателя?
6. С помощью какого устройства измеряется расход воздуха?
7. В какой последовательности включаются элементы установки?
8. Когда производится запись показаний измерителя температур после включения калориметра?
9. Когда режим считается установившимся?
10. По каким значениям устанавливается нагрузка нагревателя в каждом из четырех режимов?
11. Когда производится запись показаний амперметра, вольтметра и ТНЖ?
12. После каких действий можно отключить нагреватель?
13. Когда возможно отключение вентилятора?

При защите работы.

1. Дайте определение теплоемкости.
2. Что понимается под истинной и средней теплоемкостями?
3. Как различают теплоемкость по количеству вещества, к которому подводится теплота?
4. Как различают теплоемкость в зависимости от условий протекания процесса теплообмена?
5. Чему равна теплоемкость при адиабатном и изотермическом процессах?
6. Как зависит теплоемкость идеального и реального газов от температуры?
7. Какими зависимостями связаны между собой C_p и C_v ?
8. Как связаны между собой теплоемкости C , $C_{об}$, C_{μ} ?

9. Как определить теплоемкость в диапазоне температур от t_1 до t_2 по известным значениям теплоемкостей в диапазонах от 0 до t_1 и от 0 до t_2 ?

Лабораторная работа N 2.

"Определение показателя адиабаты воздуха"

Цель работы.

Целью работы является углубление знаний в теории исследования термодинамических процессов, ознакомление с методикой опытного определения показателя адиабаты реальных газов, получения навыков в проведении теплотехнического эксперимента и его статистической обработки.

При выполнении работы производится экспериментальное определение численного значения показателя адиабаты воздуха и ознакомление со статистическими методами обработки результатов эксперимента.

Теоретическое положение.

Для исследования термодинамических процессов, характеризующих изменение состояния рабочего тела (газа или пара), используется ряд основных положений технической термодинамики. Первый закон термодинамики гласит, что все тело, подведенное к рабочему телу, затрачивается на изменение его внутренней энергии и совершение работы расширения:

$$dQ=dU+dL \quad (1)$$

уравнение состояния рабочего тела:

$$P \cdot V=M \cdot R \cdot T \quad (2)$$

связывает основные параметры рабочего тела: P – давление, Па; V – объем, занимаемый рабочим телом, м³; T – абсолютную температуру, °К, (M – масса газа, кг; R – газовая постоянная, Дж/кг·К).

Путем совместного решения уравнения (1) и (2) получена зависимость, описывающая все реальные термодинамические процессы:

$$P \cdot V^n = \text{const} \quad (3)$$

Такое уравнение называется уравнением политропы или политропного процесса, а n – показатель политропы.

Показатель политропы может принимать различные значения (от +0 до $\pm\infty$) и его величина будет соответствовать известным термодинамическим процессам, характеристики которых приведены в табл.2

Таблица 2

Характеристики основных термодинамических процессов

Наименование процесса	Уравнение в P-V диаграмме	Показатель политропы	Уравнение 1 закона термодинамики	Значение теплоемкости, Дж/кг·К	Уравнение в T-S диаграмме
Политропный	$P \cdot V^n = \text{const}$	n	$dQ = dE + dL$	$C = C_n$	$\Delta S = C_v \cdot \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) + R \cdot \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$
Изохорный	$V = \text{const}$	$n = \pm\infty$	$dQ = dE$	$C = C_v$	$\Delta S = C_v \cdot \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)$
Изобарный	$P = \text{const}$	$n = 0$	$dQ = dE + dL$	$C = C_p$	$\Delta S = C_v \cdot \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)$
Изотермический	$T = \text{const}$	$n = 1$	$dQ = dL$	$C = \infty$	$\Delta S = R \cdot \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$ <small>$_{T = \text{const}}$</small>
Адиабатный (изоэнтропийный)	$P \cdot V^K = \text{const}$	$n = K$	$dQ = 0$	$C = 0$	$\Delta S = 0$

На рис.2. представлены изображения основных термодинамических процессов в P-V и T-S диаграммах, описываемых соответствующими уравнениями табл.2.

Так как работы расширения в термодинамическом процессе определяется по зависимости:

$$dL = P \cdot dV, \text{ Дж} \tag{4}$$

то величина совершенной рабочим телом работы может быть определена в P-V диаграмме как площадь под кривой термодинамического процесса 1-2, то есть:

$$L_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dV, \text{ Дж} \tag{5}$$

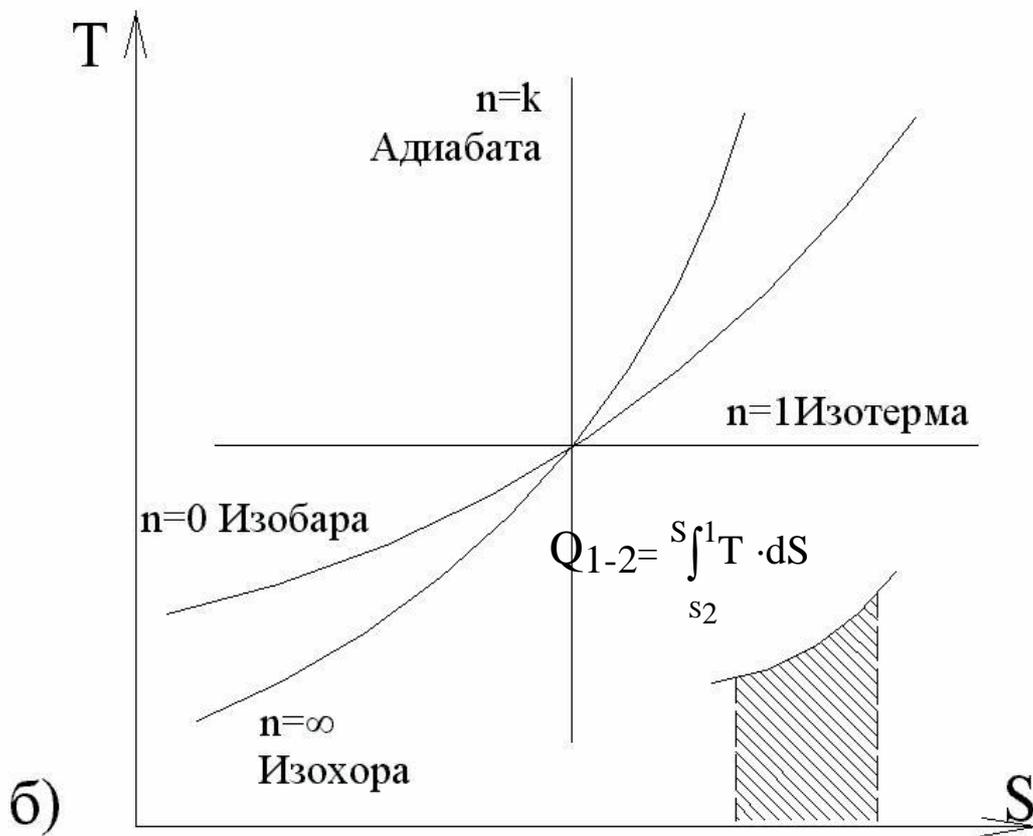
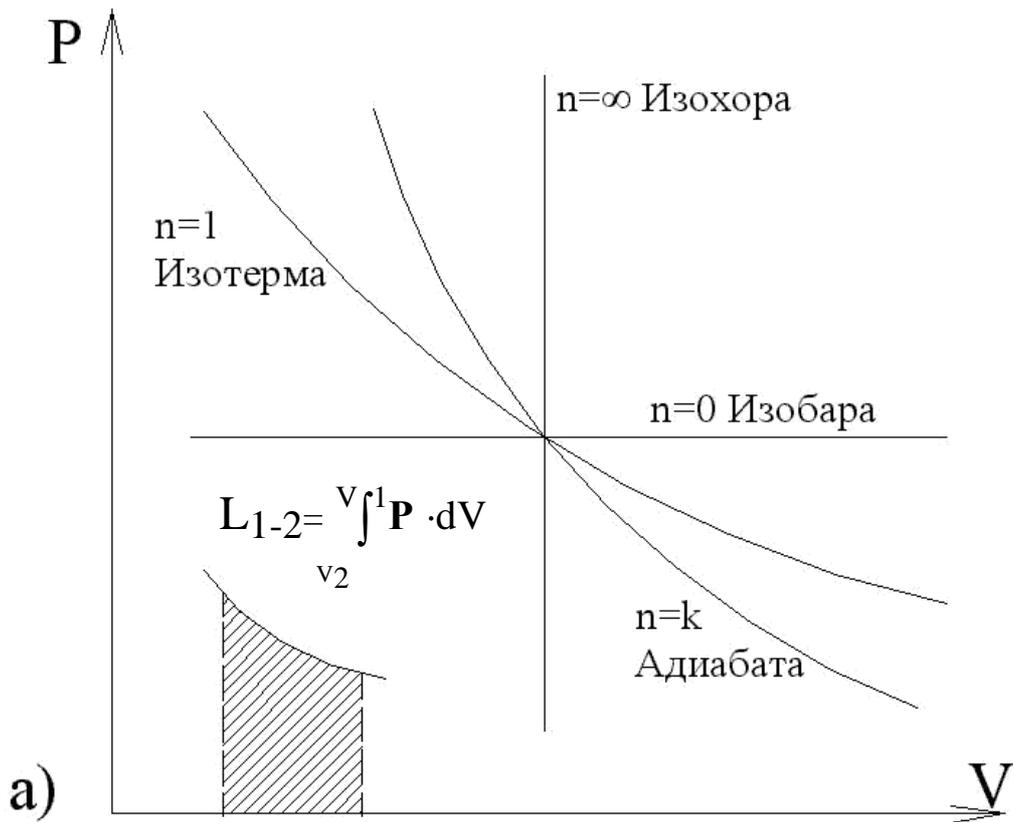


Рис. 2. Изображение термодинамических процессов в P-V (а) и T-S (б) диа-граммах.

Для определения количества тепла, подведенного к рабочему телу, используется параметр состояния – энтропия S , Дж/кг·К:

$$dS = \frac{dQ}{T}, \text{ Дж/кг·К} \quad (6)$$

Таким образом, применяя T-S диаграмму, можно определить количество тепла, переданное рабочему телу, как площадь под кривой термодинамического процесса 1-2:

$$Q_{1-2} = \int_{S_1}^{S_2} T \cdot dS, \text{ Дж} \quad (7)$$

Одним из наиболее часто встречающихся на практике термодинамических процессов является адиабатный процесс.

Адиабатным процессом называется термодинамический процесс изменения состояния рабочего тела, происходящий без обмена теплом с окружающей средой ($dQ = 0$).

В этом случае, работа расширения совершается за счет изменения внутренней энергии рабочего тела ($dU = -dL$).

Уравнение адиабатного процесса имеет вид:

$$P \cdot V^n = \text{const}, \quad (8)$$

где показатель адиабаты k , равный отношению изобарной теплоемкости C_p к изохорной C_v :

$$k = \frac{C_p}{C_v} > 1 \quad (9)$$

Численное значение показателя адиабаты для идеального газа можно получить исходя из молекулярно-кинетической теории газов:

для одноатомного газа

$$k = \frac{C_{\mu p}}{C_{\mu v}} = \frac{5/2 R_{\text{ун}}}{3/2 R_{\text{ун}}} = 1.66 \quad (10)$$

для двухатомного газа

$$k = \frac{C_{\mu p}}{C_{\mu v}} = \frac{7/2 R_{yH}}{5/2 R_{yH}} = 1.4 \quad (11)$$

для многоатомного газа

$$k = \frac{C_{\mu p}}{C_{\mu v}} = \frac{8/2 R_{yH}}{6/2 R_{yH}} = 1.33 \quad (12)$$

Отсюда видно, что для идеальных газов величина k является постоянной, не зависящей от параметров состояния газа.

Связь между изобарной и изохорной теплоемкостями устанавливает уравнение Майера:

$$C_p - C_v = R \quad (13)$$

Выразив из (5) C_p , формулу (2.1) можно привести к виду:

$$k = \frac{C_p}{C_v} = \frac{C + R}{C_v} = 1 + \frac{R}{C_v} \quad (14)$$

Поскольку для реальных газов теплоемкость C_v возрастает с увеличением температуры интенсивнее, чем C_p , то значение k с увеличением температуры уменьшается. Величина k для реальных газов одной атомности при прочих равных условиях имеет отличия. Так, например, для двухатомных газов: водород $k=1,41$; азот $k=1,404$; воздух $k=1,4$.

Основные характеристики адиабатного процесса можно определить, зная численное значение показателя адиабаты (табл.3.).

Допустим, что условия опыта с достаточной степенью точности удовлетворяют уравнению состояния идеального газа

$$P V = M \cdot R \cdot T \quad (15)$$

Представим сосуд, заполненный газом, имеющим параметры: давление P_1 и температуру T_1 , превышающие параметры окружающей среды.

Таблица 3.

№	Характеристика	Уравнение
1.	Связь между давлением и температурой.	$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{k}{k-1}}$
2.	Связь между давлением и объемом.	$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k$
3.	Связь между объемом и температурой.	$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}$
4.	Работа расширения	$L_{1-2} = \frac{R}{k-1} \cdot (T_2 - T_1)$
5.	Техническая работа	$L_{1-2}^* = k \cdot L_{1-2}$
6.	Теплоемкость	$C_{1-2} = 0$

За счет охлаждения стенок сосуда окружающей средой и отвода некоего количества теплоты q_1 , температура газа станет равной температуре окружающей среды – T_2 , а давление снизится до некоего значения P_2 (процесс 1-2 рис.2.). Затем быстро выпустим газ из резервуара, соблюдая тем самым условия адиабатного расширения - отсутствие теплообмена с окружающей средой. В конце этого процесса (2-3) давление в сосуде станет равным давлению окружающей среды P_3 , а температура понизится до T_3 , меньшей T_2 . Закроем сосуд и выждем некоторое время, в течении которого от окружающей среды к более холодному телу будет подведена теплота q_2 (процесс 3-4). В результате температура возрастет до температуры окружающей среды ($T_4 = T_2$), а давление повысится до некоего значения P_4 .

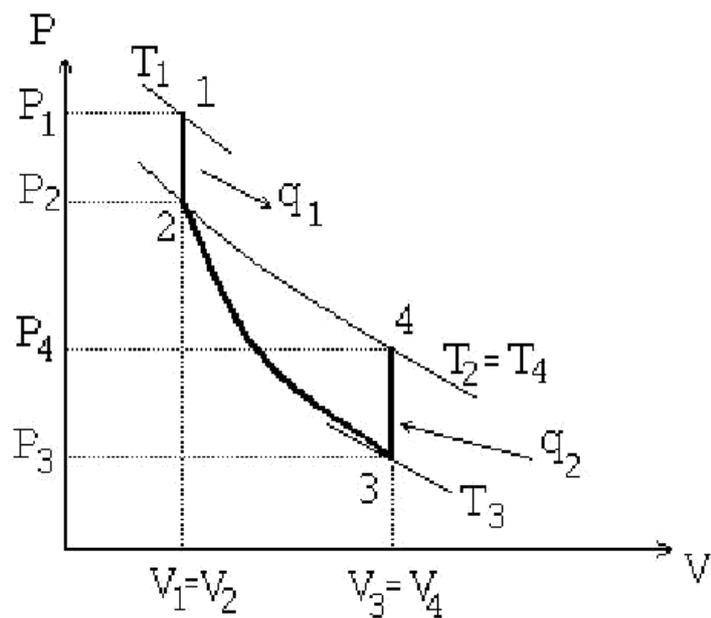


Рис. 3. К определению показателя адиабаты газа.

Рассмотрим условный изотермический процесс 2-4. Так как для изотермического процесса уравнение (15) имеет вид

$$P V = \text{const} \quad (16)$$

то

$$\frac{V_2}{V_4} = \frac{P_4}{P_2} \quad (17)$$

а так как $V_3 = V_4$, то

$$\frac{V_2}{V_3} = \frac{P_4}{P_2} \quad (18)$$

Используя уравнение адиабатного процесса:

$$P V^k = \text{const} \quad (19)$$

можно записать

$$\frac{P_3}{P_2} = \frac{V_2^k}{V_3^k} \quad (20)$$

так как $P_2 V_2^k = P_3 V_3^k$.

Окончательно, прологарифмировав выражение (2.20), получим

$$k = \frac{\ln \frac{P_3}{P_2}}{\ln \frac{V_2}{V_3}} = \frac{\ln \frac{P_3}{P_2}}{\ln \frac{V_2^2}{V_3^2}} \quad (21)$$

Эта формула будет в дальнейшем использоваться при обработке результатов.

Описание экспериментальной установки.

Экспериментальная установка (рис.4.) состоит из ресивера 9, в котором с помощью компрессора 6 создается избыточное давление, измеряемое боковым манометром 10. На линии нагнетания от компрессора к ресиверу расположен трехходовой кран 7. Выпуск сжатого воздуха из ресивера производится через кран 11. Привод компрессора осуществляется от электродвигателя 5, питающегося трехфазным током. Силовая сеть имеет индивидуальные выключатели фаз 1.

Для индикации напряжения каждой фазы предусмотрен вольтметр 4 и сигнальная лампа 3. Установка снабжена розеткой 220 В переменного тока 2. Трехходовой кран в работе занимает два положения. В одном из них производится нагнетание воздуха в ресивер, во втором - сжатый воздух из компрессора уходит в атмосферу, при этом ресивер отключается от нагнетательной линии (рис.5).

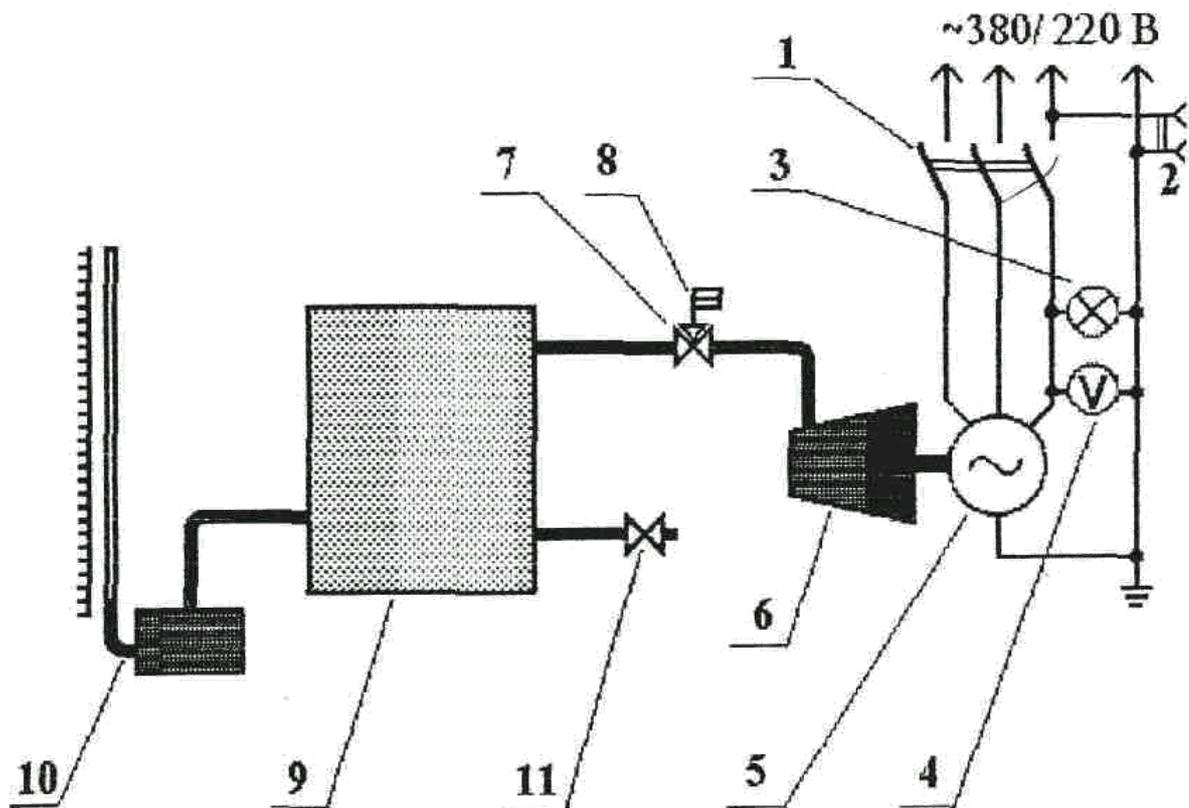
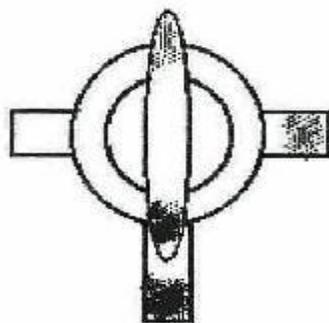
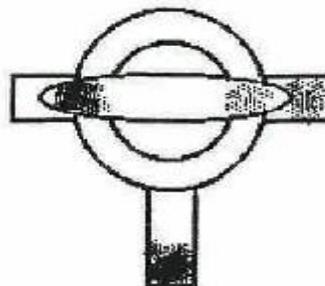


Рис. 4. Схема экспериментальной установки.

1- выключатели; 2- розетка 220 В; 3- сигнальная лампа; 4- вольтметр; 5- электродвигатель; 6- ротационный компрессор; 7- трехходовой кран; 8- выхлоп в атмосферу; 9- ресивер; 10- жидкостный бочковый манометр; 11- быстродействующий кран.



Кран в положении
"компрессор-атмосфера"



Кран в положении
"компрессор-ресивер"

Рис. 5. Положения трехходового крана.

Порядок проведения опыта.

- 1. Поочередным включением каждого из выключателей по показанию вольтметра проверить напряжение каждой фазы. Опыт запрещается проводить, если отсутствует напряжение хотя бы одной фазы.**
- 2. Убедиться по показанию манометра, что в ресивере нет избыточного давления. В противном случае выпустить из ресивера воздух через кран 11.**
- 3. Перекрыть кран 11. Кран 7 поставить в положение, при котором сжатый воздух из компрессора будет поступать в ресивер.**
- 4. Включить одновременно тремя выключателями электродвигатель и, наблюдая за показанием бачкового манометра, закачать воздух в ресивер до давления, требуемого в опыте ($P_{\text{изб.1}}$).**
- 5. По достижении заданного давления поворотом крана 7 направить воздушный поток от компрессора в атмосферу. Отключить электродвигатель.**
- 6. Выждав 5-7 минут, необходимых для охлаждения сжатого воздуха до температуры окружающей среды (о наступлении этого момента будет свидетельствовать установившееся показание манометра), записать значение давления $P_{\text{изб.2}}$ в протокол.**
- 7. Открыть кран 11 на время не более 2 секунд и выпустить сжатый воздух из ресивера в атмосферу. При этом $P_{\text{изб.3}}$ станет равным нулю. Закрыть кран.**
- 8. После 5-7 минут, пока прогреется охладившийся при адиабатном расширении воздух до температуры окружающей среды, занести в протокол значение давления $P_{\text{изб.4}}$.**
- 9. Каждая серия опытов производится 4 раза для различных начальных давлений (согласно пп. 2-8), численные значения которых или задаются преподавателем, или принимаются равными 800, 700 и 600 мм вод.ст. (около 8, 7 и 6 кПа соответственно). Общее количество опытов равно 12.**

Обработка полученных данных и оформление отчета.

1. Определить абсолютное давление воздуха в начале изохорного процесса снижения давления с отводом теплоты (P_1), в начале адиабатного расширения (P_2), в начале и в конце изохорного повышения давления с подводом теплоты (P_3 и P_4) по следующей формуле:

$$P_i = P_{\text{изб } i} \cdot g + P_{\text{бар}}, \text{ Па} \quad (22)$$

где $P_{\text{бар}}$ - барометрическое давление, Па, измеренное по лабораторному барометру;

$g = 9,81$ - ускорение свободного падения, м/с^2 ;

$P_{\text{изб } i}$ - избыточное давление, мм вод. ст.

2. Вычислить значение показателя адиабаты k по (21). Причем, принимая $P_3 = P_{\text{бар}}$, и используя выражение (22), значение k можно определить по следующей формуле:

$$k = \frac{\ln \frac{P_{\text{бар}}}{P_2}}{\ln \frac{P_4}{P_2}} \quad (23)$$

3. Определить среднее значение показателя адиабаты воздуха для серии проводимых опытов:

$$k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i \quad (24)$$

где n - количество опытов

4. Определить отклонение каждого опыта:

$$\Delta k_i = |k_i - \bar{k}| \quad (25)$$

5. Рассчитать действительную ошибку эксперимента:

$$\sigma_{\text{д}} = \pm \left| \frac{k_0 - \bar{k}}{k_0} \right| \cdot 100, \% \quad (26)$$

где $k_0 = 1,4$ - известное общепринятое значение показателя адиабаты воздуха.

6. Рассчитать среднеквадратичную ошибку эксперимента при $m = 10$:

$$\sigma_k = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \Delta K}{m-1}} \quad (27)$$

Отчет оформляется один на бригаду и должен содержать следующее: основные положения теории; краткое описание экспериментальной установки и схему; результаты замеров и расчетов в виде протокола (приложение 1). Расчеты прилагаются на отдельном листе.

Контрольные вопросы.

При допуске к работе:

1. Что является целью лабораторной работы?
2. Объясните устройство лабораторного стенда и назначение каждого элемента установки.
3. Что необходимо проверить перед началом работы?
4. Расскажите порядок включения и выключения электродвигателя компрессора.
5. Когда и какие положения должен занимать трехходовой кран?
6. Для чего необходимо производить выдержку времени?
7. Каковы требования к скорости открытия выпускного крана?
8. Измерение каких параметров необходимо для определения показателя адиабаты k в опыте?
9. Как можно определить, что температура сжатого воздуха стала равной температуре окружающей среды?
10. Какие процессы имеют место в опыте?

При защите работы:

1. Чему равен показатель адиабаты?
2. Каковы численные значения k для газов различной атомности?
3. От каких параметров состояния идеального и реального газов зависит k ?
4. Как влияет температура на значение k идеального и реального газов?
5. Давление в каких точках необходимо знать, чтобы определить k ?
6. Какими зависимостями связаны между собой k , C_p , C_v .
7. Каким газом - реальным или идеальным полагается воздух в расчет-ных соотношениях?
8. Охарактеризуйте процессы, протекающие в опыте?

Лабораторная работа № 3

"Изучение работы поршневого компрессора".

Цель работы.

Целью работы является исследование характеристик одноступенчатого поршневого компрессора, анализ термодинамических процессов, происходящих при сжатии рабочего вещества (воздуха).

Теоретическое положение.

Компрессор - это теплотехническое устройство, предназначенное для повышения давления, сжатия и перемещения газов или паров.

Компрессоры можно классифицировать следующим образом:

а) компрессоры объемного статического сжатия, в которых повышение давления происходит за счет уменьшения объема рабочего вещества, нагнетаемого в специальный резервуар (ресивер);

б) компрессоры динамического сжатия, в которых рабочее вещество непрерывно перемещается через проточную часть компрессора, при этом кинетическая энергия потока преобразуется в потенциальную, обеспечивая соответствующее увеличение давления среды.

К наиболее распространенным компрессорам объемного сжатия относятся поршневые, винтовые, ротационные. В качестве компрессоров динамического сжатия применяют центробежные и осевые вентиляторы, турбокомпрессоры, эжекторы и вихревые машины.

На рис. 3.1 представлена теоретическая диаграмма работы простейшего одноступенчатого поршневого компрессора.

Основными элементами поршневого компрессора являются: цилиндр, поршень, впускной и нагнетательный клапаны.

Возвратно-поступательное движение поршня в сочетании с работой клапанной группы обеспечивает протекание следующих рабочих процессов (рис. 6.):

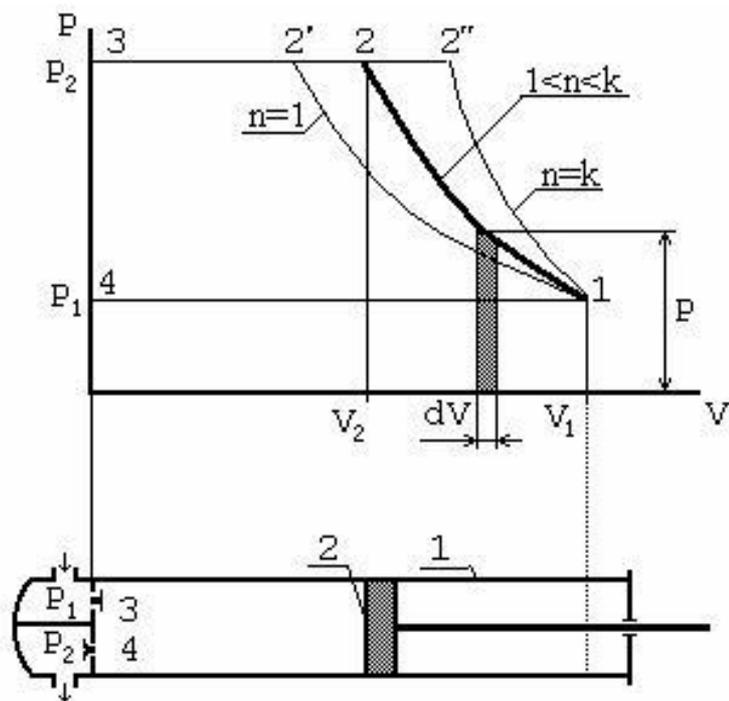


Рис. 6. Теоретическая диаграмма работы поршневого
одноступенчатого компрессора.

1 - цилиндр; 2 - поршень; 3 - впускной клапан; 4 - нагнетательный клапан.

а) процесс всасывания 4-1 при полностью открытом впускном клапане; б) процесс сжатия 1-2 при закрытых клапанах; в) процесс нагнетания 2-3 при открытом нагнетательном клапане; г) условный процесс расширения 3-4, замыкающий рабочий цикл ком-прессора.

Работа, затрачиваемая в компрессоре на получение 1 кг сжатого рабочего вещества, складывается из суммы всех работ перечисленных процессов:

$$L_k = L_{1-2} + L_{2-3} - L_{4-1}, \text{ Дж}, \quad (1)$$

где $L_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} PdV$ - работа изменения объема, определяется площадью под

кривой 1-2;

$L_{2-3} = P_2V_2$ - работа нагнетания, определяется площадью под линией 2-3;

$L_{4-1} = P_1V_1$ - работа всасывания, определяется площадью под линией 4-1

(вычитается из произведенных затрат, так как совершается внешней средой).

Площадь рабочего цикла компрессора замыкается по точкам 4-1-2-3, в этом случае:

$$L_{\kappa} = \int_{V_2}^{V_1} VdP \quad (2)$$

Анализ теоретической диаграммы P-V компрессора (рис. 3.1) показывает, что в качестве процессов сжатия можно использовать политропный процесс, описываемый выражением:

$$PV^n = \text{const}, \quad (3)$$

при этом показатель политропы должен иметь значение $k \geq n \geq 1$.

Величина работы компрессора определяется процессом сжатия. Теоретический процесс сжатия в зависимости от теплообмена между рабочим телом и стенками цилиндра может происходить по изотерме 1-2' ($n=1$), при этом:

$$L_{\kappa} = R \cdot T \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (4)$$

или по адиабате 1-2" ($n=k$):

$$L = \frac{k \cdot R}{k-1} \cdot (T_1 - T_2) \quad (5)$$

Изотермический процесс сжатия 1-2' характеризуется минимально затрачиваемой работой, которая превращается в тепло и отводится от сжимаемого рабочего тела. Такой процесс принято считать идеальным. Реально же на практике его невозможно осуществить.

Адиабатный процесс сжатия 1-2 происходит без теплообмена с окружающей средой, поэтому затраты работы на его осуществление максимальны, а температура рабочего вещества существенно возрастает.

Уменьшить работу, затрачиваемую на привод компрессора возможно, если использовать систему принудительного охлаждения цилиндра компрессора. В этом случае будет происходить политропный процесс сжатия 1-2 (рис. 6.).

Реальные процессы сжатия отличаются от теоретических в результате действия следующих факторов:

1. Наличия мертвого пространства, которое составляет объем среды V_c , не поддающийся вытеснению поршнем и расширяющийся при обратном движении поршня (линия 3 - 4, рис. 7).

2. Наличия потерь давления ΔP в нагнетательном и впускном трактах, пульсаций давления (линии 3 - 4, рис. 7).

3. Перетечки рабочего вещества через различные конструктивные зазоры и уплотнения.

4. Затрат части энергии на преодоление трения в механических парах машины.

Влияние большей части перечисленных факторов учитывается при построении действительной индикаторной диаграммы работы компрессора (рис. 7.).

К основным техническим характеристикам компрессора относятся следующие показатели.

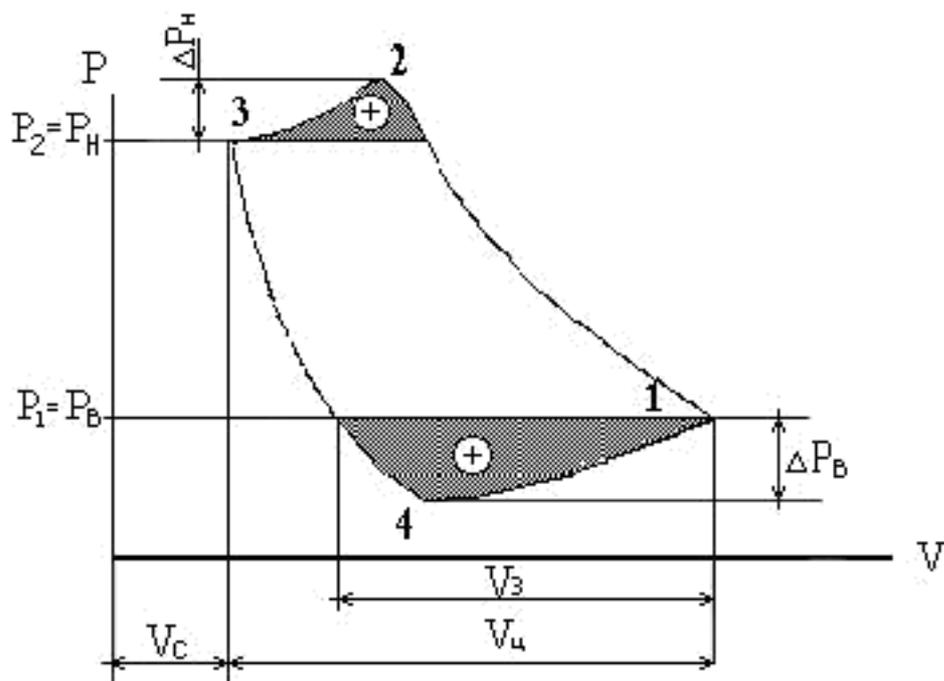


Рис. 7. Действительная индикаторная диаграмма работы компрессора. P_B – давление всасывания; P_H – давление нагнетания.; ΔP_B , ΔP_H – потери давления в клапанах; V_3 – полезный объем; $V_{ц}$ – объем цилиндра; V_c – вредный объем.

Производительность компрессора (объемная, или массовая) – это количество рабочего вещества, проходящего через компрессор в единицу времени:

$$M_K = \rho_1 \cdot V_{ц} \cdot \lambda_K \cdot n, \text{ кг/с}, \quad (6)$$

где ρ – плотность сжимаемого вещества,

кг/м³; $V_{ц}$ – объем цилиндра компрессора, м³;

$\lambda^K = \frac{V_3}{V_4}$ – коэффициент подачи, учитывающий уменьшение действитель-

ной производительности компрессора по сравнению с теоретической.

Теоретическая мощность, затрачиваемая на привод компрессора:

$$N_K = M_K \cdot L_K, \text{ Вт}. \quad (7)$$

Степень повышения давления сжимаемой среды:

$$\beta = \frac{P_2}{P_1} . \quad (8)$$

Для оценки энергетического совершенства компрессора используется **эффективный КПД:**

$$\eta_e = \frac{N_{ад}}{N_e} , \quad (9)$$

где $N_{ад}$ - теоретическая мощность компрессора при адиабатном сжатии; N_e - действительная мощность привода компрессора.

Описание экспериментальной установки.

Для проведения опытов используется вертикальный одноцилиндровый поршневой компрессор. Схема экспериментальной установки представлена на (рис. 8.). Сжатие воздуха происходит в цилиндре 8 при возвратно-поступательном движении поршня 7, которое обеспечивается механической передачей, включающей кривошипно-шатунный механизм 6, связанный приводом с электродвигателем 5. Всасывание и нагнетание воздуха производится через впускной и нагнетательный клапаны соответственно 9 и 10, расположенные на крышке цилиндра.

Сжатый в компрессоре воздух подается в резервуар 11. Давление воздуха контролируется манометром 12, а его температура определяется по величине термоЭДС термопары 16, измерителем температуры 17. Производительность компрессора определяется по показанию ротаметра 13 - градуированной трубки, внутри которой находится поплавков 14. Сжатый воздух из резервуара выпускается через регулирующий вентиль 15 и ротаметр 13. Для определения мощности, потребляемой электродвигателем 5, приводящим в действие компрессор, в цепь питания включены амперметр 3 и вольтметр 2. Сетевой выключатель 1 и пусковая кнопка 4 предназначены для запуска ком-

прессора в работу. Включение измерителя в сеть производится через отдельный источник питания.

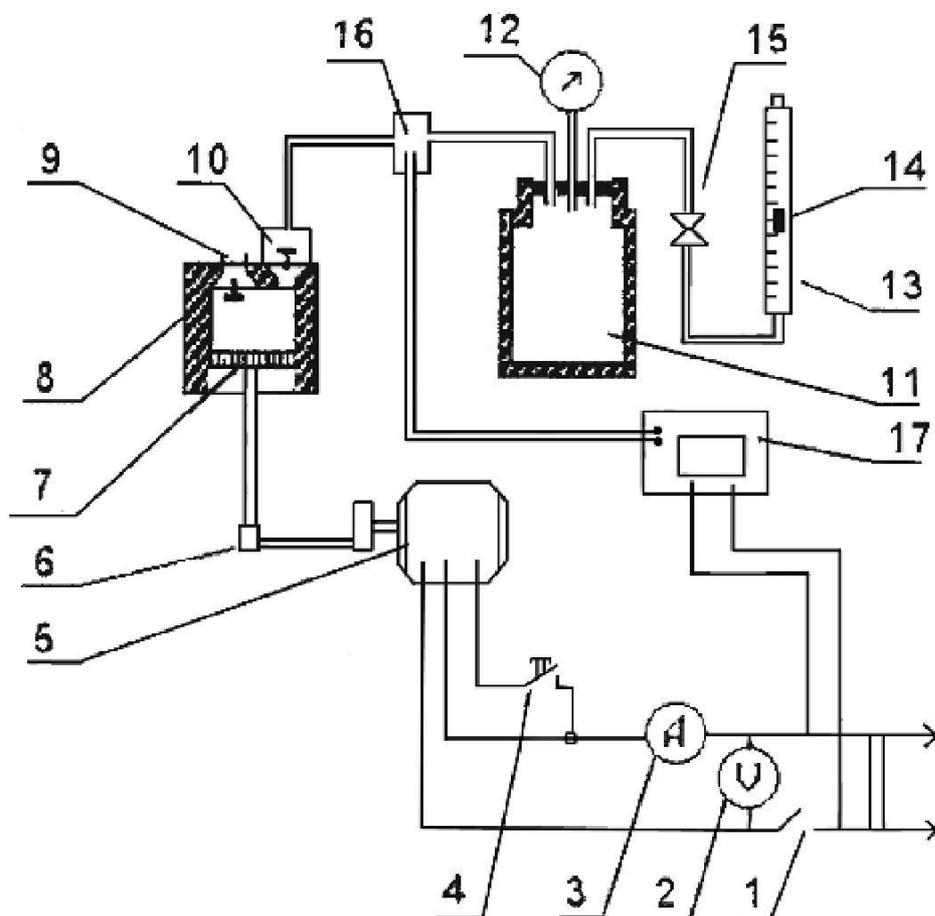


Рис. 8. Схема лабораторной установки.

1 - сетевой выключатель; 2 - вольтметр; 3 - амперметр; 4 - пусковая кнопка; 5 - электродвигатель; 6 - кривошипно-шатунный механизм; 7 - поршень; 8 - цилиндр компрессора; 9 - впускной клапан; 10 - нагнетательный клапан; 11 - резервуар; 12 - манометр; 13 - ротаметр; 14 - поплавок ротаметра; 15 - регулирующий вентиль; 16 - термопара; 17 - измеритель температуры.

Порядок проведения опыта.

Перед началом опыта необходимо снять показания по лабораторным приборам: температуру окружающей среды, атмосферное давление воздуха.

1. Открыть полностью вентиль 15 на 1-2 минуты для выпуска возможно оставшегося в резервуаре сжатого воздуха, закрыть вентиль.

2. Запустить компрессор в работу, включив сетевой выключатель 1 и нажав пусковую кнопку 4.

3. Обеспечить повышение избыточного давления воздуха в резервуаре до 60 - 80 кПа (0,6 - 0,8 кгс/см²).

4. Постепенным открытием вентиля 15 установить расход сжатого воздуха, ориентируясь на положение поплавка в пределах 20-30 делений шкалы ротаметра.

5. Включить измеритель температуры.

6. По истечении 20-25 минут работы компрессора определить температуру сжатого воздуха, используя значения измерителя температуры 17, измерить потребляемый электродвигателем ток, напряжение в сети и избыточное давление в резервуаре.

7. После проведения эксперимента отключить электродвигатель выключателем 1 и открыть вентиль 15 для выпуска сжатого воздуха в атмосферу.

8. С интервалом 10-15 минут провести два опыта в последовательности по пп. 2-7 при большей производительности компрессора, определяемые расходом воздуха в диапазоне 50-60 и 70-80 делений шкалы ротаметра.

Обработка полученных данных и оформление отчета.

1. Мощность, потребляемая электродвигателем компрессора:

$$N_э = U \cdot I, \text{ Вт.} \quad (10)$$

2. Давление на выходе из компрессора определяется по формуле:

$$P_2 = 9,81 \cdot 10^4 \cdot \frac{P_{\text{м}}}{P_{\text{max}}} + P_1, \text{ Па,} \quad (11)$$

где $P_{\text{м}}$ - показание манометра, кг/см², P_{max} - максимум шкалы манометра, в делениях.

P_1 - барометрическое давление, Па, измеряемое по лабораторному барометру.

3. Степень повышения давления:

$$\beta = P_2/P_1. \quad (2)$$

4. Определяется повышение температуры воздуха при сжатии:

$$\Delta t = 8E, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (13)$$

где E - э.д.с. термопары, мВ.

5. Теоретическая работа компрессора при адиабатном сжатии 1 кг воздуха:

$$L_k = c_p \Delta t, \text{ Дж/кг}, \quad (14)$$

где $c_p = 1004$ - изобарная теплоемкость воздуха, Дж/(кг $^\circ\text{C}$)

6. Производительность компрессора определяется по формуле:

$$M_k = 2,4 \cdot 10^{-5} \cdot N_p, \text{ кг/с}, \quad (15)$$

где N_p - величина подъёма поплавка ротаметра, дел.

7. Теоретическую мощность адиабатного компрессора можно определить как

$$N_k = L_k M_k, \text{ Вт}. \quad (16)$$

8. Эффективный КПД компрессора:

$$\eta_e = \frac{N_k}{N_{\text{э.м.э}}} \cdot 100, \% \quad (17)$$

где $\eta_m = 0,82$ - механический КПД компрессора,

$\eta_{\text{э}} = 0,84$ - КПД электродвигателя компрессора.

9. Через степень повышения давления β определить теоретическую работу компрессора:

$$L_k = \frac{R(t_1 + 273)}{k-1} \left(\beta^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right), \text{ Дж/кг}, \quad (18)$$

где t_1 - температура воздуха на входе в компрессор, $^\circ\text{C}$ (для воздуха показатель адиабаты $K = 1,4$, газовая постоянная $R = 286$ кДж/кг \cdot К).

10. Экспериментальная ошибка определения работы, затрачиваемой на привод компрессора, рассчитывается по зависимости:

$$\sigma = \frac{L_k - L_k''}{L_k''} 100, \% \quad (19)$$

Отчет оформляется один на бригаду и должен содержать следующее: - основные положения теории; - краткое описание экспериментальной установки и схему; - результаты замеров и расчетов в виде протокола (приложение 1). Расчеты прилагаются на отдельном листе.

Контрольные вопросы.

При допуске к работе:

1. Что является целью лабораторной работы ?
2. Назовите основные назначения компрессоров и их модификации.
3. Какие допущения применяются при анализе работы идеализированного компрессора?
4. В каком процессе сжатия затрачивается минимальная работа компрессора?
5. Почему адиабатный процесс сжатия наиболее просто осуществим на практике?
6. Какие параметры характеризуют эффективность работы компрессора?
7. Объясните назначение основных элементов экспериментальной установки.
8. Расскажите последовательность проведения опыта.
9. Приведите примеры практического применения компрессоров.

При защите работы:

1. Запишите выражение, определяющие работу компрессора в политропном процессе сжатия.
2. Запишите выражение, определяющие работу компрессора в изотермическом процессе сжатия.
3. Покажите ход основных процессов сжатия в теоретической диаграмме компрессора.

4. Объясните цикл компрессора в действительной P-V диаграмме.
5. К чему приведет наличие большого мертвого объема в компрессоре с высокой степенью сжатия?

Лабораторная работа № 4

“Теплоотдача экспериментальной горизонтальной трубы при свободном движении воздуха”

Цель работы.

Целью работы является углубление знаний по теории конвективного теплообмена при свободном движении среды, ознакомление с методикой опытного исследования процесса теплоотдачи, получение навыков в проведении эксперимента.

В процессе работы необходимо ознакомиться с теоретическими основами методики экспериментального исследования процесса теплоотдачи, определить значение коэффициента теплоотдачи при свободном движении воздуха около горизонтально расположенной нагретой трубы, провести анализ уравнения подобия, применяемого для описания процесса свободной конвекции, используя данные эксперимента.

Теория работы.

Конвективным теплообменом, или теплоотдачей, называется процесс переноса тепловой энергии между поверхностью твердого тела и средой (жидкостью или газом). При этом процесс переноса тепловой энергии неразрывно связан с перемещением среды, взаимодействующей с твердым телом.

По природе возникновения различают свободное и вынужденное движение среды. Свободным движением теплоносителя называют движение, происходящее вследствие разности плотностей нагретых и холодных элемен-

тарных объемов жидкости или газа в гравитационном поле (в этом случае действует так называемая подъемная сила). Вынужденным называют движение среды, возникающее под действием посторонних сил (насоса, вентилятора и т.д.).

Интенсивность теплоотдачи при свободном движении зависит от разности температур между телом и средой, физических свойств среды и геометрических факторов (формы, размеров, положения тела в пространстве), а также ряда других факторов.

Количество переданного тепла (тепловой поток Q) при конвективном теплообмене определяется по закону Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha \cdot F \cdot \Delta t \text{ или } q = \alpha \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где $q = Q/F$ - плотность теплового потока, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$;

Δt - температурный напор (разность температур тела, t_T , и окружающей среды, t_C), К

$$\Delta t = t_T - t_C, \text{ К};$$

$\text{Вт} \cdot \alpha$

- коэффициент теплоотдачи, $\text{м}^2 \cdot \text{К}$.

Коэффициент теплоотдачи характеризует интенсивность теплообмена между телом и окружающей средой и представляет собой количество тепла, передаваемое от твердой стенки газу или жидкости через единицу площади за единицу времени при разности температур между стенкой и жидкостью в 1 К.

В экспериментах среднее значение коэффициента теплоотдачи при свободном движении может быть определено из уравнения (1):

$$\alpha = \frac{q}{t_T - t_C}, \quad (2)$$

где

t_T - температура поверхности тела, °С;

t_C - температура среды (в данном случае воздуха), °С.

Процесс теплоотдачи является сложным процессом, а коэффициент теплоотдачи зависит от различных параметров, характеризующих этот процесс (в том числе включающих форму тела и основные характерные размеры, температуру, скорость движения среды, физические свойства теплоносителя и т.д.).

Применяя методы теории подобия к математическому описанию процесса конвективного теплообмена при свободном движении воздуха в большом объеме, можно получить следующую зависимость между безразмерными числами подобия (критериями подобия):

$$Nu = f(Gr \cdot Pr), \quad (3)$$

На основании обобщения обширного экспериментального материала М.А.Михеевым получено следующее численное уравнение подобия:

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n, \quad (4)$$

где Nu - число Нуссельта, характеризующее интенсивность конвективного теплообмена

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda};$$

Gr - число Грасгофа, характеризующее эффективность подъемной силы, вызывающей движение среды

$$Gr = \frac{g \cdot L^3 \cdot \beta \cdot t}{\nu^2} ;$$

Pr - число Прандтля, характеризующее физические свойства среды (воздуха)

$$Pr = \frac{\nu}{a} ;$$

В выражении чисел подобия входят параметры:

β - коэффициент объемного расширения, $\frac{1}{K}$:

$$\beta = \frac{1}{t_{ж} + 273} ;$$

ν - коэффициент кинематической вязкости, $\frac{m^2}{c}$;

a - коэффициент температуропроводности, $\frac{m^2}{c}$;

λ - коэффициент теплопроводности, $\frac{Вт}{m \cdot K}$;

L - характерный размер опытной трубы, м;

Δt - разность между средней температурой поверхности расчетного участка и температурой окружающей среды, К;

α - коэффициент теплоотдачи, $\frac{Вт}{m^2 \cdot K}$;

g - ускорение свободного падения, $\frac{m}{c^2}$;

C и n - численные коэффициенты уравнения подобия.

В реальных условиях теплообмена коэффициенты C и n зависят от режима движения среды, находящейся в соприкосновении с нагретой поверхностью тела.

Таблица 4. может быть использована для сравнения полученных в опыте результатов с известными данными и определения режима движения воздуха.

Таблица 4.

Горизонтальные трубы

№ п/п	Режим движения воздуха	$Gr \cdot Pr$	C	n
1	Ламинарный	$5 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^8$	0,5	0,25
2	Турбулентный	$5 \cdot 10^8 - 5 \cdot 10^9$	0,15	0,33

Уравнение (4) справедливо для подобных явлений теплообмена лишь в интервале экспериментально полученных значений произведения $Gr \cdot Pr$. Значение коэффициента пропорциональности C и показателя степени n определяются на основании обработки экспериментальных данных и косвенно характеризуют режим обтекания жидкостью нагретого при свободной конвекции. Пользуясь уравнением (4) при конкретных числовых значениях C и n , зная основные параметры стенки и окружающей среды, можно определить коэффициент теплоотдачи от стенки к жидкости или наоборот - от жидкости к стенке.

Описание экспериментальной установки.

Сущность экспериментального метода, используемого в лабораторной работе, заключается в определении количества тепла, отдаваемого опытной трубой в окружающую среду, и нахождении температур трубы и среды на установившемся тепловом режиме. Схема экспериментальной установки приведена на (рис. 9.).

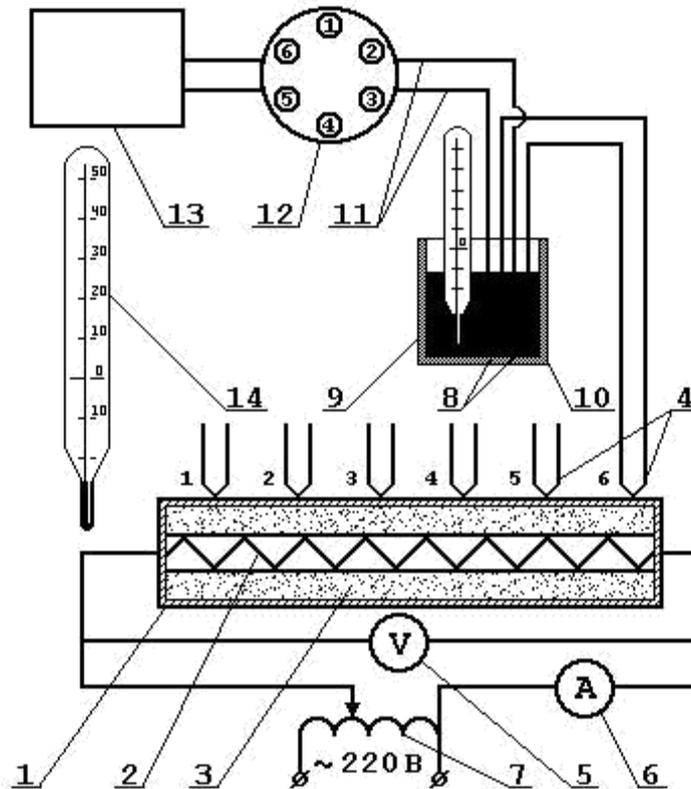


Рис. 9. Схема экспериментальной установки:

1 - горизонтальная труба; 2 - нагревательный элемент; 3 - наполнитель - песок; 4 - горячие спаи термопар (№ 1÷6); 5 - вольтметр; 6 - амперметр; 7 - ЛАТР; 8 - холодные спаи термопар; 9 - термометр для замера температуры холодных спаев; 10 - сосуд Дьюара; 11 - компенсационные провода; 12 - переключатель термопар; 13 – измеритель температуры; 14 - термометр для за-мера температуры окружающей среды.

Объектом исследования является экспериментальная медная труба 1, внутри которой расположен нагревательный элемент 2. Торцы опытной тру-бы защищены тепловой изоляцией, а пространство между трубой и нагрыва-телем заполнено песком.

Наружный диаметр трубы $d_H = 46$ мм, длина трубы $L = 940$ мм. Нагрева-тельный элемент запитан через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) 7

от сети переменного тока напряжением 220 В. Определение мощности, потребляемой нагревательным элементом, производится по показаниям ампер-метра 6 и вольтметра 5. Количество выделяемого и передаваемого в окружающую среду тепла определяется по потребляемой электрической мощности.

Для измерения температуры теплоотдающей поверхности в стенке трубы заложены шесть равноотстоящих друг от друга термопар 4. Номера термопар на схеме соответствуют номерам точек на переключателе 12. На схеме спаи термопар условно показаны вдоль одной образующей трубы. В действительности, для учета изменения температуры по поверхности трубы, термопары расположены относительно друг друга под углом 60° .

В экспериментальной установке использованы хромель-копелевые термопары, горячие спаи которых зачеканены на поверхности трубы. Э.д.с. термопар измеряется измерителем температуры 13. Все холодные спаи термопар помещены в сосуд 10, где находится масло при постоянной температуре t_{xc} . При этом температура поверхности трубы определяется по формуле: $t_c = t_{mv} + t_{xc}$,

где t_c - температура стенки трубы в данной точке, $^\circ\text{C}$;

t_{mv} - показания потенциометра, переведенные в $^\circ\text{C}$;

t_{xc} - температура холодного спаи термопары, $^\circ\text{C}$.

Это обуславливается тем, что при помощи термопар измеряется только разность температур между холодным и горячим спаем и если $t_{xc} \neq 0^\circ\text{C}$, то температура в точке замера определяется как сумма t_{mv} и t_{xc} . Температура окружающего воздуха $t_{ж}$ измеряется вдали от опытной трубы ртутным термометром 14.

Описание методики проведения эксперимента.

После ознакомления с описанием экспериментальной установки необходимо заготовить форму протокола (см. приложение 1) для записи наблюдений и приступить к выполнению работы.

Все измерения на стенде производятся при строго установившемся тепловом режиме. Наступление установившегося теплового режима определяется по неизменной температуре поверхности трубы и характеризуется тем, что тепловой поток, выделяемый с поверхности опытной трубы, остается постоянным. Время наступления установившегося теплового режима составляет примерно 30-40 минут.

По указанию преподавателя или лаборанта после включения установки в сеть ЛАТРОм поднимается напряжение до рекомендуемого режима работы установки ($U = 80-120 \text{ В}$).

Любой тепловой режим может быть подготовлен предварительным включением установки за 30-40 минут до начала проведения лабораторной работы.

Данные измерений каждого проводимого опыта заносятся в протокол (Приложение 1), в том числе напряжение U , сила тока J , показания измерителя температуры, последовательно подключаемого к шести термопарам, а также температуру воздуха t_c и время начала проведения опыта

Обработка экспериментальных данных.

Для каждого установившегося теплового режима необходимо:

1. Вычислить количество тепла, выделенное на расчетном участке опытной трубой:

$$Q = W = J \cdot U, \text{ Вт} \quad (5)$$

где J - ток, А;

U - величина напряжения, В.

Выделенное тепло отдается окружающей среде конвективным теплообменом и излучением:

$$Q = Q_K + Q_L, \text{ Вт} \quad (6)$$

где Q_K - тепло, переданное воздуху только путем конвективного теплообмена, Вт;

Q_L - тепло, переданное окружающей среде путем излучения, Вт.

2. Вычислить среднюю температуру поверхности трубы

$$t_T = \frac{\sum_{i=1}^6 t_{Ti}}{6}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7)$$

где t_{Ti} – показания термопар по милливольтметру с учетом температуры холодных слоев.

3. Вычислить лучистую составляющую выделенного тепла

$$Q_L = C_{\text{пр}} \cdot \left[\left(\frac{T_T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] \cdot F, \text{ Вт} \quad (8)$$

где

T_T - средняя температура стенки трубы, ($T_T = t_c + 273$) К; принимается как средняя арифметическая из показаний шести термопар при установившемся режиме;

T_c - температура окружающего воздуха, ($T_c = t_c + 273$) К;

$C_{\text{пр}}$ - приведенный коэффициент излучения, $C_{\text{пр}} = 2,09$

Вт/(м²·К): F - поверхность опытной трубы, $F = \pi d L$, м².

4. Вычислить количество тепла, переданное воздуху путем конвективно-го теплообмена

$$Q_K = Q - Q_L, \text{ Вт} \quad (9)$$

5. Вычисляем плотность теплового потока

$$q_K = Q_K/F, \text{ Вт/м}^2 \quad (10)$$

6. Определить средний коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{Q_K}{\pi \cdot d_H \cdot L \cdot \Delta t}, \text{ м}^2 \cdot \text{К} \quad (11)$$

Зависимость (11) строго справедлива лишь для данной опытной трубы.

Для распространения полученных результатов на другие подобные процессы необходимо опытные данные сравнить со значениями, получаемыми из обобщенного уравнения подобия (4).

7. Вычислить числа подобия:

$$\text{Нуссельта } Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}, \quad (12)$$

$$\text{Грасгофа } Gr = \frac{G}{v^2} = g \cdot \beta \cdot d_H^3 \cdot \frac{t_T - t_C}{v^2}, \quad (13)$$

$$\text{Прандтля } Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (14)$$

Физические параметры воздуха (ν , a , λ) берутся из таблицы (приложение 2) при средней температуре воздуха.

$$t_{cp} = 0,5 \cdot (t_T + t_C)$$

Коэффициент β рассчитывается по зависимости:

$$\beta = \frac{1}{273,15 + t_{cp}}, \text{ 1/}^\circ\text{К}$$

8. Согласно полученному значению произведения $G_r \cdot Pr$ выбрать значения показателей (C^* и n^*), входящих в уравнение подобия по таблице 4. и рассчитать величину критерия Нуссельта по формуле:

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

9. Определить погрешность формулы Михеева для условий опыта:

$$\sigma = \left| \frac{Nu^* - Nu}{Nu} \right| \cdot 100, \% \quad (15)$$

10. Определить приборную погрешность расчёта коэффициента тепло-отдачи:

$$\gamma_\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \left(\frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta J}{J} + \frac{2 \cdot \Delta t_T}{t_T} \right) \cdot 100, \frac{0}{0} \quad (16)$$

где максимальное отклонение контрольного параметра определяется по классу точности K_i прибора. Например для вольтметра:

$$\Delta U_i = 0,01 \cdot U_{\max} \cdot K_u ,$$

где U_{\max} – максимум шкалы вольтметра;

K_u - класс точности вольтметра по шкале прибора;

Δt_T - ошибка ртутного термометра (обычно $0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$).

Контрольные вопросы.

При допуске к выполнению работы:

1. Что экспериментально определяется в работе?
2. Что называется установившимся режимом?
3. Что необходимо знать для распространения полученных данных на другие явления конвективного теплообмена?
4. Какой физической картине соответствует установившийся режим?
5. Что является конечной целью работы?
6. Как задаются режимы экспериментального исследования?

7. Как производится запись замеряемых параметров?
8. Для чего замер температур поверхности трубы сделан в шести точках?
9. Чем определяется количество замеров на одном режиме?

При защите отчета.

1. Физическая сущность передачи тепла конвекцией, излучением и теплопроводностью.
2. Что называется конвективным теплообменом?
3. Почему в чистом виде конвекция отсутствует?
4. В каких средах и почему может наблюдаться конвективный теплообмен?
5. Что называется теплоотдачей?
6. Запишите закон Ньютона-Рихмана?
7. Что характеризует и каков физический смысл коэффициента теплоотдачи?
8. От каких факторов зависит коэффициент теплоотдачи?
9. Какой конвективный теплообмен называется свободным?
10. Какой конвективный теплообмен называется вынужденным?
11. Каков физический смысл чисел Нуссельта, Грасгофа и Прандтля?
12. В чем различия между определяемыми и определяющими числами подобия?
13. Что называется уравнением подобия?
14. В каком диапазоне параметров справедливо полученное уравнение подобия?
15. Как пользоваться уравнением подобия?
16. Назовите область применения полученного вами уравнения подобия?
17. Как проверить, можно ли полученным уравнением пользоваться при других геометрических параметрах трубы и другой температуре?

Лабораторная работа № 5

“Определение коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов методом трубы”

Цель работы.

Целью работы является углубление знаний в области теории теплопроводности, изучение методики экспериментального определения коэффициента теплопроводности изоляционных материалов, исследование эффективности тепловой изоляции и получение навыков в проведении экспериментальных работ.

В процессе подготовки и при проведении лабораторной работы, студенту необходимо ознакомиться с теоретическими положениями, являющимися основой метода трубы; ознакомиться с составом оборудования и принципом действия экспериментальной установки; определить значение коэффициента теплопроводности исследуемого материала; определить эффективность применения изоляционных материалов для снижения тепловых потерь при изоляции труб.

Теоретические положения.

Явление теплопроводности представляет собой процесс распространения тепловой энергии при непосредственном соприкосновении отдельных тел или внутри данного тела при наличии разности температур.

Теплопроводность обусловлена движением атомов и молекул вещества.

Основным законом теплопроводности является закон Фурье.

$$Q = - F \cdot \lambda \cdot g \operatorname{grad}(t) = - F \cdot \lambda \frac{dt}{dx}, \text{ Вт} \quad (1)$$

Согласно закону Фурье интенсивность переноса тепла в твердом теле, оцениваемая величиной теплового потока Q , определяется температурным градиентом $\text{grad}(t)$ и значением коэффициента теплопроводности данного вещества λ (Вт/м·К). Градиент температуры $\text{grad}(t)$ зависит от параметров температурного поля в рассматриваемом теле.

Коэффициент теплопроводности λ является теплофизическим параметром вещества, он характеризует способность материала проводить тепловую энергию. Для различных материалов коэффициент теплопроводности зависит от структуры, плотности, теплоемкости, температуры, давления имея определенные значения в данных условиях. Обычно для нижеперечисленных расчётов коэффициент теплопроводности находится по таблицам, в которых приводятся теплофизические свойства вещества.

Значение коэффициента теплопроводности определяется опытным путем на специальных лабораторных установках. Одним из применяемых в теплотехнике методов определения λ является метод трубы или цилиндра.

Для определения теплопроводности материала цилиндрической стенки (рис.5.1.) при постоянном значении коэффициента λ (в случае установившегося теплового состояния системы, когда температура во всех точках тела не меняется), можно использовать уравнение Фурье приведённое к виду:

$$q_l = \frac{\pi \cdot \Delta t}{\frac{1}{2\lambda} \ln \left| \frac{d_2}{d_1} \right|}, \text{ Вт/м} \quad (5.2)$$

где $\Delta t = t_1 - t_2$ - разность температур между внутренней и внешней поверхностью трубы $^{\circ}\text{К}$:

$$q_l = \frac{Q}{L} - \text{плотность теплового потока по длине трубы } L, \text{ Вт/м.}$$

В случае многослойной стенки, состоящей из слоев разных материалов, уравнение теплопроводности имеет вид:

$$q_l = \frac{\pi \cdot (t_1 - t_2)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}, \text{ Вт/м} \quad (3)$$

Всякое покрытие горячей поверхности, которое способствует снижению потерь тепловой энергии в окружающую среду, называется тепловой изоляцией. Для тепловой изоляции могут быть использованы любые материалы с низким коэффициентом теплопроводности (газы, пористые материалы, асбест, пробка, стекловата, опилки и другие). Часто на практике изолируются трубопроводы, по которым движутся горячие среды. На (рис.10.) изображена наиболее простая схема однослойной изоляции трубопровода.

В общем случае уравнение, описывающее передачу тепла через отрезок изолированного трубопровода длиной L, будет иметь вид:

$$Q = \frac{\pi \cdot L \cdot (t_{ж1} - t_{ж2})}{R_{из}}, \text{ Вт} \quad (4)$$

$R_{из}$ называется термическим сопротивлением трубы с изоляцией. Величина $R_{из}$ складывается из термических сопротивлений процессов теплоотдачи и теплопроводности.

$$\text{Без изоляции: } R = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + 2 \cdot \lambda \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}, \quad (5)$$

$$\text{С изоляцией: } R_{из} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + 2 \cdot \lambda \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + 2 \cdot \lambda_{из} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_3}, \quad (6)$$

В выражениях (5) и (6) входят коэффициенты теплопроводности материала трубы и изоляции λ , $\lambda_{из}$, а также коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 , характеризующие процессы передачи тепла к стенке трубы от горячего тепло-носителя с температурой $t_{ж1}$ и от изоляции со стороны окружающей среды $t_{ж2}$.

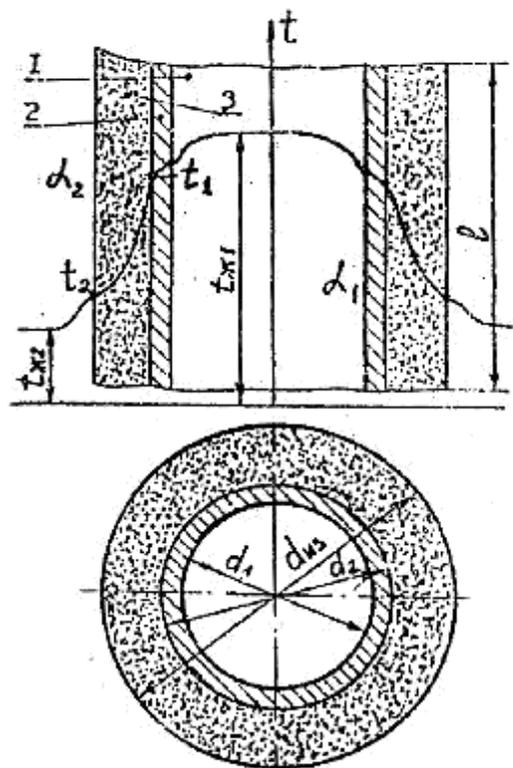
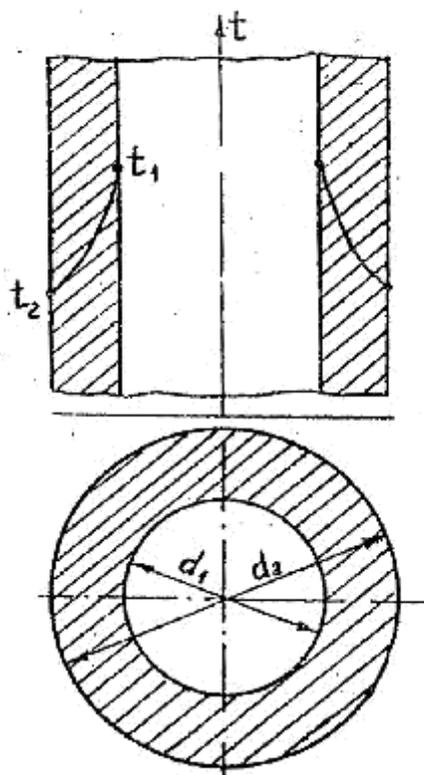


Рис. 10. Однородная цилиндрическая стенка

Рис.11. Схема однослойной тепловой изоляции

- 1-горячая среда;
- 2-стенка трубопровода;
- 3-тепловая изоляция.

Для снижения тепловых потерь нужно, чтобы термическое сопротивление изолированного трубопровода было выше, чем у оголенной трубы:

$$\Delta R = R_{\text{из}} - R > 0.$$

Решая это неравенство с учётом 5.5 и 5.6 относительно величины $\lambda_{\text{из}}$, получим условие эффективности применения изоляции:

$$\lambda_{\text{из}}^* < 0,5 \cdot \alpha_2 \cdot d_2, \quad (7)$$

Если условие (7) не выполнимо, то надо выбрать другой материал, для которого $\lambda_{из} < \lambda_{из}^*$, иначе при его нанесении на трубопровод тепловые потери будут возрастать.

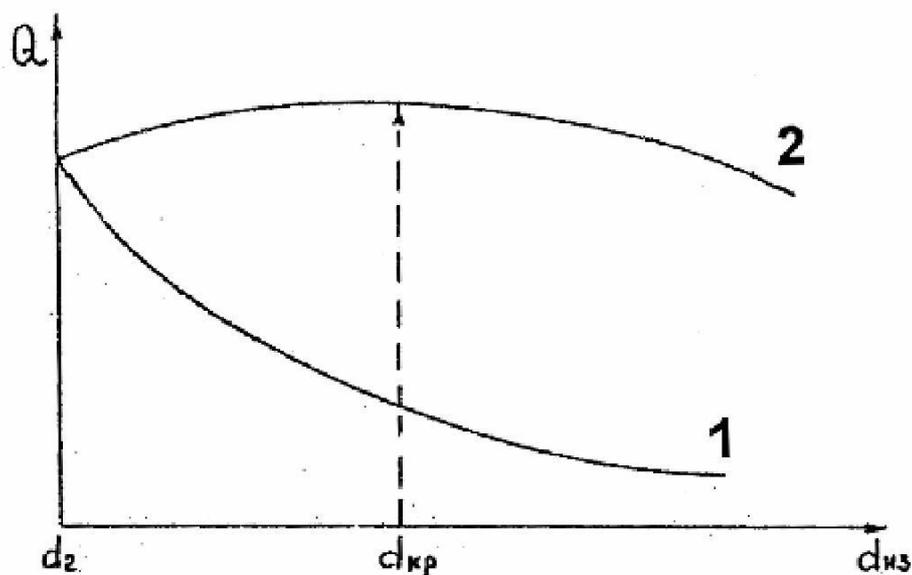


Рис.12. Зависимость тепловых потерь с поверхности трубопровода от диаметра изоляции:
1- правильный выбор материала; 2-неправильный выбор материала.

Наибольшие тепловые потери при неправильном выборе материала изоляции соответствуют критическому диаметру изоляции, определяемому по

зависимости:

$$d_{кр} = 2 \cdot \frac{\lambda}{\alpha} \quad (8)$$

Если рассчитанное значение критического диаметра меньше диаметра изолируемой трубы, то изоляция будет эффективной.

Описание экспериментальной установки.

Схема установки представлена на рис.(12.) Экспериментальная установка состоит из металлической трубы 1, покрытой слоем исследуемого изоляционного материала 2, которым является асбест.

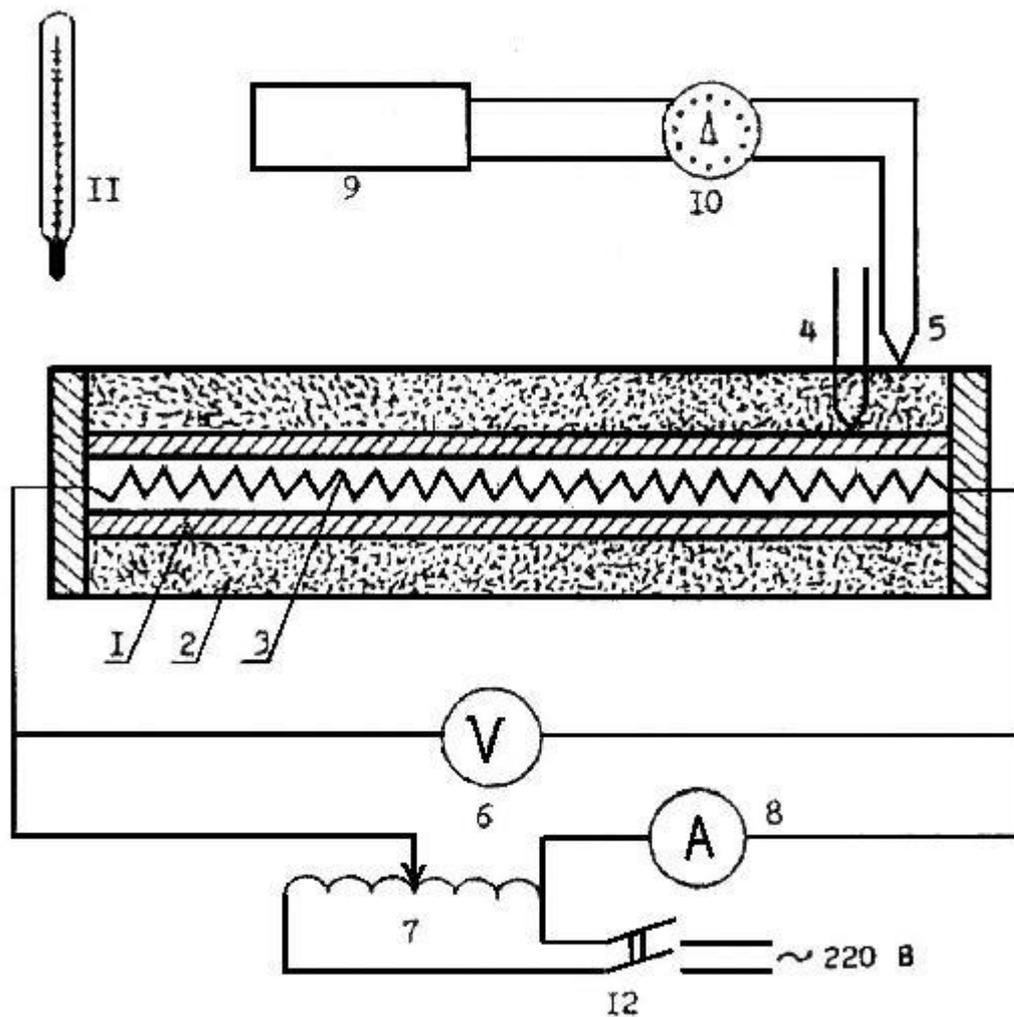


Рис. 12. Схема экспериментальной установки: 1- металлическая труба; 2-слой изоляции; 3-нагревательный элемент; 4- термопары на внутренней поверхности изоляции; 5- термопары на наружной поверхности изоляции; 6-вольтметр; 7-автотрансформатор (ЛАТР); 8-амперметр; 9-измеритель температуры; 10-переключатель термопар; 11-ртутный термометр; 12-выключатель сети.

Нагрев трубы осуществляется нагревательным элементом 3, при этом для регулирования напряжения применяется лабораторный трансформатор (ЛАТР) 7. Для определения мощности, потребляемой нагревательным элементом, в цепь питания включен вольтметр 8.

Количество выделяемого в окружающую среду тепла через поверхность трубы определяется по расходу электрической энергии. Для снижения тепловых потерь торцы трубы закрыты тепловой изоляцией.

Температура испытываемого материала измеряется десятью хромель-капельными термопарами. Пять термопар (4) замеряют температуру на внутренней поверхности изоляции, а остальные пять термопар (5) – на наружной поверхности.

Вторичным прибором для измерения температуры является милли-вольтметр 9. Для последовательного подключения термопар к измерителю температур служит переключатель 10. Для определения температуры изоляции используется тот же измеритель.

Измерение температуры окружающего воздуха проводится с помощью ртутного лабораторного термометра 11.

Методика проведения эксперимента.

Включение установки в сеть выключателем 12 (рис.12.) осуществляется под наблюдением преподавателя или лаборанта. По рекомендации преподавателя устанавливается тепловой режим (задается значение напряжения, которое регулируется при помощи ЛАТРа 7).

Все изменения проводятся при строго установившемся тепловом режиме. Фиксация установившегося режима происходит при неизменной средней температуре наружной t_2 и внутренней t_1 поверхности изоляции. При этом вся тепловая энергия, выделяемая нагревательным элементом в трубе, отдается в окружающую среду. Установившееся тепловое состояние наступает через 30 – 40 минут после включения установки.

Показания термопар определяют, последовательно подключая их к мил-ливольтметру 9 переключателем 10, повторяя замеры 2- 3 раза через 5 – 10 минут. При этом режим можно считать установившемся, если измеряемые температуры поверхности изоляции двух последовательных опытов отличаются не более, чем на 5°C .

Параметры, снимаемые на установке, заносят в протокол (приложение 1).

Обработка экспериментальных данных.

1. Вычисляется тепловой поток, выделяемый нагревательным элементом:

$$Q=U \cdot J, \text{ Вт} \quad (9)$$

2. Вычисляется средняя температура внутренней поверхности изоляционного слоя:

$$\bar{t}_1 = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5}, ^{\circ}\text{C} \quad (10)$$

3. Определяется средняя температура наружной поверхности изоляционного слоя:

$$\bar{t}_2 = \frac{t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10}}{5}, ^{\circ}\text{C} \quad (11)$$

4. Вычисляется коэффициент теплопроводности для изоляционного материала:

$$\lambda_{\text{из}} = \frac{Q \cdot \ln \frac{d_2}{d_3}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (t_1 - t_2)}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \quad (12)$$

Где геометрические размеры изоляции $d_2 = 0,04 \text{ м}$, $d_3 = 0,05 \text{ м}$, длина трубы $L = 0,9 \text{ м}$.

5. Определяется коэффициент теплоотдачи от изоляции в окружающую среду:

$$\lambda_{\text{из}} = \frac{Q}{\pi \cdot d_3 \cdot L \cdot (t_2 - t_0)}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}, \quad (13)$$

где t_0 температура воздуха по показаниям лабораторного термометра.

6. Устанавливается эффективность изоляции из соотношения:

$$\lambda_{\text{из}}^* < 0,5 \cdot \alpha_2 \cdot d_2. \quad (14)$$

7. Определяется критический диаметр изоляции:

$$d_{\text{кр}} = 2 \cdot \frac{\lambda_{\text{из}}}{\alpha_2}, \text{ м} \quad (15)$$

8. Вычисляется погрешность определения коэффициента теплопроводности.

Теоретическая (приборная):

$$\gamma = \left(\frac{\Delta U_n}{U} + \frac{\Delta J_n}{J} + \frac{2 \cdot \Delta t_n}{t_1 + t_2} \right) \cdot 100, \% \quad (16)$$

где максимальное отклонение контрольного параметра определяется по классу точности K_i прибора. Например для вольтметра:

$$\Delta U_i = U_{\text{max}} \cdot K_u / 100.$$

В этом случае U_{max} – максимум шкалы вольтметра, K_u – класс точности вольтметра по шкале прибора. Ошибка ртутного термометра Δt_n обычно составляет $0,5^\circ\text{C}$.

Экспериментальная:

$$\sigma = \frac{\lambda_{\text{из}} - \lambda_0}{\lambda_0} \cdot 100, \% \quad (17)$$

где $\lambda_0 = 0,201$, Вт/м К – справочное значение коэффициента.

Оформление отчета.

Отчет должен быть оформлен индивидуально каждым студентом и содержать:

а) основные положения теории; б)

схему экспериментальной установки;

в) протокол экспериментальных и расчетных данных в виде таблицы (приложение 1).

Контрольные вопросы.

- 1. Как осуществляется передача тепловой энергии в твердых телах?**
- 2. Чем определяется интенсивность переноса тепловой энергии в твердых телах?**
- 3. Объясните действие основного закона теплопроводности.**
- 4. Дайте определение коэффициента теплопроводности.**
- 5. От чего зависит величина коэффициента теплопроводности?**
- 6. Что такое тепловая изоляция?**
- 7. В каких случаях обычно применяют тепловую изоляцию?**
- 8. Приведите пример теплового изолятора.**
- 9. Что такое термическое сопротивление?**
- 10. Определите условие эффективности применения изоляции на трубо-проводе.**
- 11. Объясните изменение тепловых потерь на рис.5.3.**
- 12. Что такое критический диаметр изоляции?**
- 13. Почему, как правило, трубопроводы малых диаметров не изолируют?**
- 14. Объясните назначение основных элементов экспериментальной установки (рис.5.4).**
- 15. Какие устройства применяются для измерения температуры в данной лабораторной работе?**
- 16. Как определить класс точности прибора экспериментальной установки?**

Литература.

1. Исаченко В.П. и др. Теплопередача, Изд. 4-е. – М.: Энергоиздат, 1981.
2. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача, Изд. 3-е. – М.: Высшая школа, 1980.
3. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е. – М.: Энергия, 1977.
4. Баскаков А.П. и др. Теплотехника. – М.: Энергоиздат, 1982.
5. Кирилин В.А. и др. Техническая термодинамика, Изд. 3-е. – М.: Наука, 1979.

Протокол экспериментальных и расчётных данных.

К лабораторной работе №1

п/п	Параметры	Обозначение	Величина, N режима		
1	Сила тока, А	I			
2	Напряжение, В	U			
3	Тепловая мощность, Вт	Q			
4	Барометрическое давление, Па	P _{бар}			
5	Температура воздуха на входе в калориметр, °С	t ₁			
6	Среднее значение ЭДС, мВ	\bar{E}			
7	Среднее значение разности температур, °С	Δt			
8	Температура воздуха на выходе из калориметра, °С	t ₂			
9	Массовый расход воздуха, кг/с	G			
10	Теплоёмкость полученная экспериментально, кДж/(кг·°С)	C _p			
11	Теплоёмкость по табличным данным, кДж/(кг·°С)	$C_{p }^{t_2} = C_{таб}^{t_1}$			
12	Теплоёмкость по МКТ, кДж/(кг·°С)	$C_p = \frac{7}{2} \cdot R$			
13	Экспериментальная погрешность, %	σ			

К лабораторной работе № 2.

№ опы та	Избыточное давление в ресивере						Показа- тель адиабаты K_i	Откло- нение ΔK_i
	по показаниям маномет- ра, мм вод. ст.			абсолютное, Па				
	$P_{изб1}$	$P_{изб2}$	$P_{изб5}$	P_2	P_4	$P_{бар}$		
1								
2								
...								
12								
Среднее значение показателя адиабаты							\bar{K}	
Действительная ошибка эксперимента							σ_d	
Среднеквадратичная ошибка эксперимента							σ_k	

К лабораторной работе №3

№ п/п	Параметры	Обо- значе- ние	Размер- ность	Величина		
				1 опыт	2 опыт	3 опыт
1.	Температура окру- жающего воздуха	t_1	°С			
2.	Барометрическое дав- ление воздуха	P_1	Па			
3.	Давление сжатого воз- духа	P_2	Па			
4.	Степень повышения давления	β	--			
5.	Показания ротаметра	N_p	дел.			
6.	Производительность	M_k	кг/с			
7.	Сила тока	I	А			
8.	Напряжение в сети	U	В			
9.	Мощность привода	N	Вт			
10.	ЭДС термопары	E	мВ			
11.	Повышение температу- ры воздуха при сжатии	Δt	°С			
12.	Теоретическая работа компрессора	l_k	Дж/кг			
13.	Теоретическая мощ- ность компрессора	N_k	Вт			
14.	Эффективный КПД ком- прессора	η_e	%			
15.	Экспериментальная ошибка	σ	%			

К лабораторной работе №4

п/п	Наименование	Обозначение	Номер опыта		
			1	2	3
1	Время начала опыта, час. мин.	τ			
2	Напряжение питания, В	U			
3	Сила тока, А	I			
4	Показания милливольтметра, $^{\circ}\text{C}$	t _{ci}	1		
			2		
			3		
			4		
			5		
			6		
5	Средняя температура поверхности трубы, $^{\circ}\text{C}$	t _c			
6	Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$	t _ж			
7	Тепловая мощность нагревателя, Вт	Q			
8	Поправка на теплообмен излучением, Вт	Q _л			
9	Мощность конвективного теплообмена, Вт	Q _к			
10	Плотность теплового потока, Вт/м ²	q _к			
11	Средний коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² · $^{\circ}\text{C}$)	α			
12	Критерий Нуссельта	Nu			
13	Критерий Грасгофа	Gr			
14	Критерий Прандтля	Pr			
15	Погрешность формулы Михеева, %	σ			
16	Погрешность определения коэффициента	ν			

	теплоотдачи по приборам, %				
--	----------------------------	--	--	--	--

К лабораторной работе №5

№	Наименование параметра	Обозначение	РазмерВели- - ность чина		Пози- ция термо- пары	t:	t:	t:
						°C	°C	°C
1	Напряжение питания	U	В	термопар и	1			
2	Сила тока нагревателя	J	А		2			
3	Тепловой поток	Q	Вт		3			
4	Температура воздуха	t ₀	°C		4			
5	Средняя температура внутренней поверхности изоляции	t ₁	°C		5			
6	Средняя температура внешней поверхности изоляции	t ₂	°C		6			
7	Коэффициент теплоотдачи изоляции	α ₂	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$		7			
8	Коэффициент теплопроводности изоляции	λ _{из}	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$		8			
9	Критический диаметр изоляции	d _{кр}	м		9			
10	Погрешность приборная	γ	‰		10			
11	Погрешность экспериментальная	σ ₀	‰	τ	с			
				Время замера				

Приложение 2

Физические свойства сухого воздуха (В=760 мм.рт.ст.)

t	ρ	C_p	$\lambda \cdot 10^2$	$\alpha \cdot 10^6$	$\mu \cdot 10^6$	$\nu \cdot 10^6$	Pr
°C	кг/м ³	кДж/кг·К	Вт/м·К	м ² /с	н·с/м ²	м ² /с	-
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,6	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687

Подписано в печать 15.03.18. Формат 84x108/32

Гарнитура Таймс. Печать офсетная.

Бумага мелованная. Усл. Печ. л. – 7,14

Тираж 50 экз.

Издательство Современного технического университета

390048, г. Рязань, ул. Новоселов, 35А.

(4912) 300630, 30 08 30