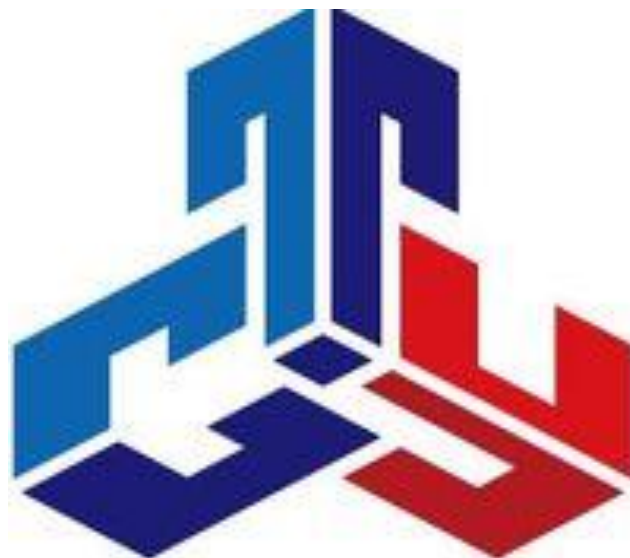


СОВРЕМЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



ТЕПЛОМАССОБМЕН

**Методические указания к выполнению
лабораторных работ**

Рязань 2018

УДК 658.264:697.34;621.183.3.004.1:061.5(075.32)

ББК 39.455

Т 34

Тепломассообмен: Методические указания к выполнению лабораторных работ. /Сост. Лопатин Е.И, Ромашова И.А., Ширяев А.Г.
Совр. техн. универ-т. – Рязань, 2018. – 24 с. – 50 экз.

*Печатается по решению Ученого Совета
Современного технического университета*

Рецензент: Суслов А. И., к.ф.-м.н., доцент, каф. ОиЭФ РГРТУ

Практикум предназначен для студентов - бакалавров специальности - «Тепловые электрические станции».

Лабораторный практикум по дисциплине «Тепломассообмен», знакомит студентов с методами экспериментальных исследований процессов теплообмена теплопроводности, конвективного теплообмена, излучения. Представлены методы и приборы для проведения теплофизических экспериментов, методика обработки и обобщения результатов измерений.

*Печатается по решению Ученого Совета
Современного технического университета*

УДК 658.264:697.34;621.183.3.004.1:061.5(075.32)

ББК 39.455

Т 34

© Е.И. Лопатин, И.А. Ромашова, А.Г. Ширяев
© Современный технический университет, 2018

Лабораторная работа 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ ТРУБЫ

I. Цель работы

Экспериментальное определение методом стационарного режима коэффициента теплопроводности керамического материала, сопоставление результатов опыта с литературными данными.

2. Основные теоретические положения

Теплопроводность - это молекулярный процесс переноса теплоты, когда температура неодинакова в разных точках тела. В чистом виде теплопроводность наблюдается в твердых телах.

Перенос теплоты в твердом теле в соответствии с законом Фурье определяется температурным градиентом и величиной коэффициента теплопроводности λ , который характеризует способность материалов проводить теплоту и зависит от структуры, плотности, влажности и температуры материала.

Значение коэффициента теплопроводности определяется из опыта. Одним из способов является метод цилиндра. Если исследуемому материалу придать форму цилиндрического слоя и поместить его на поверхность круглой трубы, которая изнутри равномерно обогревается, то при установившемся (стационарном) тепловом состоянии системы все количество теплоты Q , выделяемой внутри трубы, проходит через цилиндрический слой исследуемого материала и определяется уравнением

$$Q = \frac{2\pi\lambda l(t_2 - t_1)}{\ln(d_2/d_1)}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где λ - коэффициент теплопроводности исследуемого материала, Вт/(м·К); l - длина трубы, м; t_1 , t_2 - средние температуры внутренней и наружной поверхностей цилиндрического слоя материала, °С; d_1 , d_2 - внутренний и наружный диаметры цилиндрического слоя материала, м.

3. Методика выполнения работы

Опытная установка (рис. 1) состоит из стальной трубы 1 длиной $l = 1000$ мм. Цилиндрический слой огнеупорного материала 2 имеет внутренний диаметр $d_1 = 14$ мм и наружный $d_2 = 40$ мм. Исследуемый материал - огнеупорная керамика.

Внутри трубы заложен электрический нагреватель 3, обеспечивающий

равномерный нагрев. Сила тока нагревателя регулируется лабораторным автотрансформатором, расходуемая мощность измеряется ваттметром 7.

Температуры внутренней и наружной поверхностей исследуемого материала измеряются четырьмя хромель-копелевыми термопарами 4.

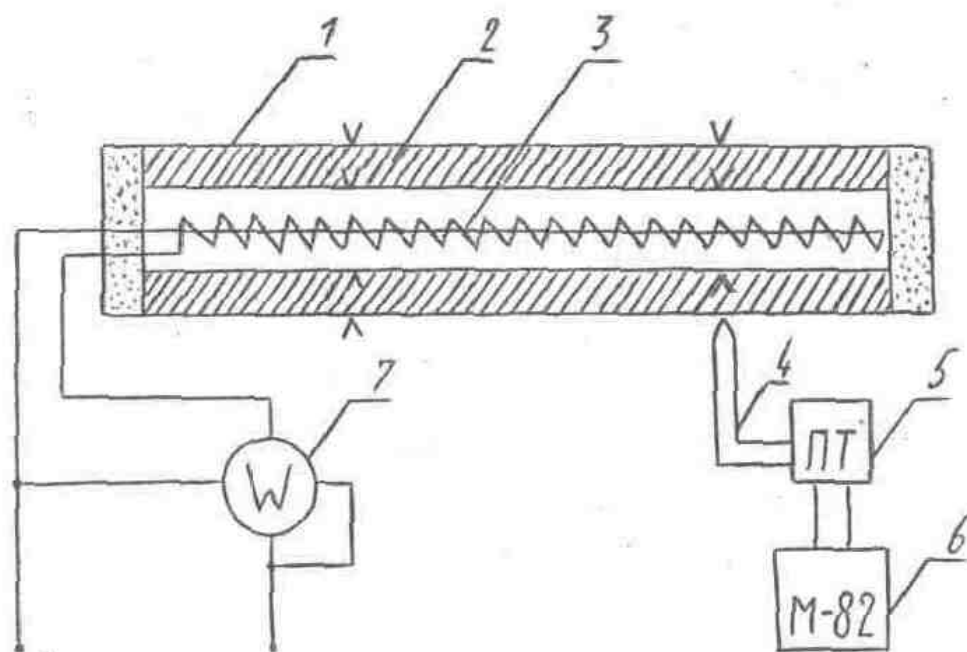


Рис. 1

Слой исследуемого материала плотно прилегает к поверхности трубы, поэтому спаи термопар, которыми измеряется температура внутренней поверхности слоя, заделываются на поверхности трубы. ЭДС термопар E , мВ, измеряется цифровым милливольтметром 6, который подключается к термопарам через пакетный переключатель 5 (термопары № 1, 3 зачеканены на внутренней поверхности трубы; № 2, 4 - на наружной).

Исходное расчетное уравнение (1) справедливо для одномерного теплового потока, когда теплота нагревателя передается только боковой стенке трубы. Выполнение этого условия обеспечивается в опытной установке тем, что длина трубы значительно больше, чем ее внешний диаметр (отношение их составляет 25). В торцах трубы установлены пробки из теплоизолятора.

Установленный в трубе электрический нагреватель рассчитан на мощность Q , которая позволяет довести температуру стенки трубы до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Порядок выполнения работы включает:

1. Через лабораторный трансформатор включить ток нагревателя. До установления стационарного теплового состояния системы через каждые 5-10 мин. производить запись показаний приборов. Опыт считать законченным после того, как показания прибора 6 на протяжении нескольких замеров остаются неизменными. Следующий опыт проводить при другом температурном режиме: для этого нужно автотрансформатором изменить мощность нагревателя 3. Рекомендуется проводить опыты при мощности нагревателя в пределах 100 - 250 Вт.
2. Для обработки используются данные, полученные при установившемся тепловом состоянии системы; обычно берут средние значения показаний приборов

из последних трех записей. Данные измерений и расчетов свести в таблицу по форме 1.

Форма 1

Геометрические параметры трубы: $d_1 = \dots$, мм; $d_2 = \dots$, мм; $l = \dots$, м.										
№ оп.	Q, Вт	E_1 ,	E_3 , мВ	$E_{1 \text{ ср}}$,	E_2 ,	E_4 , мВ	$E_{2 \text{ ср}}$,	t_1 , °С	t_2 , °С	λ , Вт/(м·К)

Обработка экспериментальных данных

По измеренным $E_{1 \text{ ср}}$ и $E_{2 \text{ ср}}$ (средние значения ЭДС термопар, закрепленных на внутренней и наружной поверхностях цилиндрического слоя исследуемого материала) из градуировочной табл. П.1 приложения найти температуры t_1 и t_2 . Вычислить коэффициент теплопроводности λ исследуемого материала:

$$\lambda = \frac{Q \ln(d_2 / d_1)}{2\pi l(t_1 - t_2)}, \text{ Вт/(м·К)}. \quad (2)$$

Полученное из уравнения (2) значение коэффициента теплопроводности следует отнести к средней температуре исследуемого материала.

Определив λ для трех разных режимов опыта, построить график зависимости коэффициента теплопроводности от средней температуры исследуемого материала.

4. Содержание отчета

Заполненная форма, расчеты и график.

Лабораторная работа 2

ТЕПЛОТДАЧА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБ ПРИ СВОБОДНОМ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА

1. Цель работы

Определение коэффициентов теплоотдачи горизонтальной и вертикальной труб при свободном движении воздуха, установление их зависимости от температурного напора; сравнение опытных данных с расчетными, полученными из уравнений подобия.

2. Основные теоретические положения

Процессы теплообмена, связанные с движением жидкостей, соприкасающихся с поверхностью твердых тел, получили название конвективного теплообмена. В этом случае перенос теплоты осуществляется одновременным действием теплопроводности и конвекции.

Различают два вида конвекции: свободную и вынужденную. Свободная конвекция, изучаемая в данной работе, возникает вследствие разности плотностей нагретых и холодных частиц жидкости или газа, когда температура поверхности тела отличается от температуры окружающей среды. Чем больше эта разность температур, тем интенсивнее процесс свободного конвективного теплообмена. Теплообмен зависит также от физических свойств среды, формы и положения тела и ряда других факторов.

В основе тепловых расчетов конвективного теплообмена лежит формула Ньютона-Рихмана:

$$Q_k = \alpha F(t_c - t_{ж}), \quad (3)$$

где Q_k - количество теплоты, отданное поверхностью нагрева жидкости, Вт; F - площадь поверхности нагрева, m^2 ; $t_c - t_{ж}$ - разность температур поверхности тела и жидкости, К; α - коэффициент теплоотдачи, $Вт/(m^2 \cdot K)$.

Коэффициент теплоотдачи α определяет интенсивность конвективного теплообмена и представляет собой количество теплоты, отданное среде поверхностью в $1 m^2$ в единицу времени при разности температур между поверхностью нагрева и средой в 1 градус.

В современном учении о конвективном теплообмене принято обрабатывать данные эксперимента в виде безразмерных комплексов, называемых числами подобия. Эта обработка позволяет распространять опытные данные исследуемого явления на группу ему подобных. Примером такой обработки служит уравнение подобия, предложенное М. А. Михеевым для случая теплоотдачи горизонтальной трубы при свободной конвекции воздуха:

$$\overline{Nu}_{d,ж} = 0,5(Gr_{d,ж} Pr_{ж})^{0,25}, \quad (4)$$

где $\overline{Nu}_{d,ж} = \overline{\alpha}d/\lambda_{ж}$ - число Нуссельта, позволяющее рассчитать теплообмен у стенки трубы; $Gr_{d,ж} = \beta g d^3(t_c - t_{ж})/\nu_{ж}^2$ - число Грасгофа, учитывающее действие подъемных (архимедовых) сил, возникающих при нагреве жидкости у стенки; $Pr_{ж}$ - число Прандтля, характеризующее физические свойства окружающей среды.

Здесь $\overline{\alpha}$ - коэффициент теплоотдачи, $Вт/(m^2 \cdot K)$; $\nu_{ж}$ - кинематический коэффициент вязкости, m^2/c ; $\lambda_{ж}$ - коэффициент теплопроводности жидкости,

Вт/(м·К); β - коэффициент объемного расширения, равный для газов $1/T_{ж}$, 1/К; g - ускорение свободного падения, м/с²; d - диаметр трубы, м.

Физические параметры ($\nu_{ж}$, $\lambda_{ж}$) при вычислении чисел подобия Грасгофа и Нуссельта и величину числа Прандтля выбирают из табл. П.2 приложения по температуре окружающего воздуха; в качестве определяющего размера принимается диаметр трубы.

Определив значение числа Нуссельта, можно вычислить среднее расчетное значение коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}$ для случая горизонтальной трубы.

При достаточной протяженности вертикальной поверхности, вдоль которой перемещается поток воздуха при свободной конвекции, в начале соприкосновения имеет место ламинарное течение в пристенном слое воздуха, которое затем разрушается, образуя переходный режим, а далее полностью преобразуется в турбулентное. Эти последовательные превращения режимов зависят от температурного напора $\Delta t = t_c - t_{ж}$, а также от протяженности омываемой поверхности.

Для теплообмена вертикальной трубы, омываемой свободным потоком воздуха, М. А. Михеевым рекомендованы следующие уравнения подобия:

при $10^3 < (Gr_{d,ж} Pr_{ж}) < 10^9$ (ламинарный режим)

$$Nu_{h,ж} = 0,76 (Gr_{h,ж} Pr_{ж})^{0,25}; \quad (5)$$

при $(Gr_{h,ж} Pr_{ж}) > 10^9$ (турбулентный режим)

$$Nu_{h,ж} = 0,15 (Gr_{h,ж} Pr_{ж})^{0,33}; \quad (6)$$

В качестве определяющего линейного размера при расчете числа Грасгофа принимают высоту трубы h . Для вычисления числа Нуссельта по последним формулам физические параметры воздуха ($\nu_{ж}$ и $\lambda_{ж}$), входящие в числа подобия, и величину числа Прандтля находят по температуре воздуха $t_{ж}$ из табл. П.2 приложения. Вычислив число Нуссельта, можно определить среднее расчетное значение коэффициента теплоотдачи α для случая теплообмена вертикальной трубы при свободной конвекции.

Индексы d , h , $ж$ в уравнениях подобия обозначают определяющий размер - диаметр d , высоту трубы h и определяющую температуру - температуру воздуха - $t_{ж}$.

3. Методика выполнения работы

Схема установки для определения коэффициента теплоотдачи при свободном движении воздуха в большом объеме представлена на рис. 2. Две дюралевые трубы 1 и 3 с наружным диаметром $d = 28$ мм и длиной $l = 820$ мм расположены одна горизонтально, а другая вертикально. Внутри труб вмонтированы электрические нагреватели 2 и 4, мощность которых измеряется ваттметрами 5 и 7. Регулировка мощности нагревателей производится лабораторными автотрансформаторами. Для

измерения температуры теплоотдающей поверхности в стенках труб зачеканены три хромель-копелевых термопары, которые присоединены к автоматическому потенциометру 6, измеряющему температуру поверхности трубы в градусах Цельсия. Температура воздуха измеряется ртутным термометром.

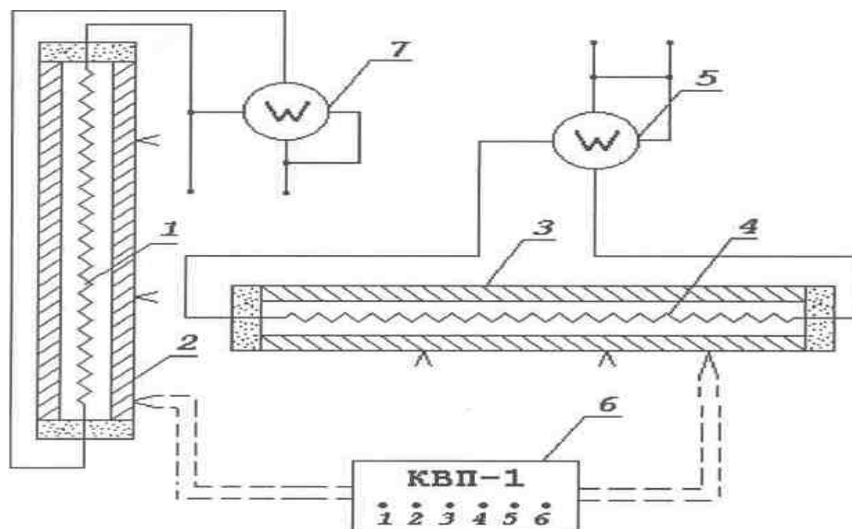


Рис. 2

Порядок выполнения работ включает:

1. Опыт ставится при стационарном (установившемся) тепловом режиме. Стационарный режим наступает приблизительно через 30 - 50 мин. после включения нагревателя.
2. Установить одинаковую мощность Q нагревателей горизонтальной и вертикальной труб, записать показания ваттметров. При установившемся тепловом режиме записать показания потенциометра, измеряющего температуру в трех точках горизонтальной трубы и трех точках вертикальной. Вычислить среднюю температуру поверхности труб.
3. Перейти на новый температурный режим, для чего изменить лабораторным автотрансформатором мощность нагревателей труб и добиться стационарного режима; повторить опыты при трех различных температурных режимах. Мощность нагревателей Q не должна превышать 100 Вт.
4. Данные наблюдений и расчетов свести в таблицу по форме 2а для горизонтальной трубы и по форме 2б - для вертикальной.

Форма 2а

Геометрические параметры труб: $d = \dots$, м; $l = \dots$, м; $F = \dots$, м².

Температура воздуха $t_{ж} = \dots$, °С; $T_{ж} = \dots$, К; $\varepsilon = \dots$

Горизонтальная труба

№ оп.	Q , Вт	t_1, t_2, t_3, t_{cp} , °С	Δt_{cp} , К	$Q_{л}$, Вт	$Q_{к}$, Вт	$\alpha_{оп}$, Вт/(м ² ·К)	$\alpha_{расч}$, Вт/(м ² ·К)
-------	----------	------------------------------	---------------------	--------------	--------------	--	--

Вертикальная труба										
№ оп.	Q, Вт	t ₁ ,	t ₂ ,	t ₃ ,	t _{ср} ,	Δt _{ср} , К	Q _л , Вт	Q _к , Вт	α _{оп} , Вт/(м ² К)	α _{расч} , Вт/(м ² К)
		°С								

Обработка экспериментальных данных. Коэффициент теплоотдачи вычислить по уравнению

$$\alpha_{\text{оп}} = Q_{\text{к}} / F \Delta t_{\text{ср}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где $Q_{\text{к}}$ - конвективный тепловой поток, F - площадь поверхности трубы, $\Delta t_{\text{ср}} = t - t_{\text{ж}}$ - средняя разность между температурой поверхности трубы и окружающего воздуха.

Количество теплоты $Q_{\text{к}}$, переданное конвекцией, определяется из равенства

$$Q_{\text{к}} = Q - Q_{\text{л}},$$

где Q - полное количество теплоты, которое выделяется внутри трубы и передается во внешнюю среду путем конвекции и лучеиспускания (мощность, потребляемая электронагревателем трубы); $Q_{\text{л}}$ - лучистый тепловой поток.

Количество теплоты, передаваемое тепловым излучением, определяется из уравнения

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon C_0 F [(T_{\text{ст}} / 100)^4 - (T_{\text{ж}} / 100)^4], \text{ Вт},$$

где $C_0 = 5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ - коэффициент излучения абсолютно черного тела; ε - степень черноты материала трубы; для дюралевой слабополированной поверхности принимается $\varepsilon = 0,35$; $F = \pi d l$ - площадь поверхности опытной трубы, м²; $T_{\text{ст}}$ и $T_{\text{ж}}$ - абсолютные температуры поверхности трубы и окружающей среды, К.

По опытным данным строят графики зависимости $\alpha_{\text{оп}} = f(\Delta t_{\text{ср}})$ для горизонтальной и вертикальной труб.

Расчет коэффициентов теплоотдачи горизонтальной и вертикальной труб по уравнениям подобия производится для одного режима.

Для теплообмена горизонтальной трубы при свободной конвекции воздуха рассчитать число Грасгофа, из табл. П.2 приложения определить величину числа Прандтля, по уравнению подобия (4) найти значение числа Нуссельта и определить расчетное значение коэффициента теплоотдачи.

$$\alpha_{\Gamma \text{ расч}} = (\text{Nu} \lambda_{\text{ж}}) / d, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Для теплообмена вертикальной трубы при свободной конвекции рассчитать число Грасгофа

$$\text{Gr}_{\text{h,ж}} = \beta g h^3 \Delta t / \nu_{\text{ж}}^2.$$

Из табл. П.2 приложения найти величину числа Прандтля, вычислить произведение ($\text{Gr}_{\text{h,ж}} \text{Pr}_{\text{ж}}$). По этой величине определить режим потока воздуха (ламинарный или турбулентный), омывающего трубу; выбрав соответствующую формулу (5) или (6), вычислить значение числа Нуссельта и найти $\alpha_{\text{в расч}}$:

$$\alpha_{\text{в расч}} = (\text{Nu} \lambda_{\text{ж}}) / h, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Полученные расчетные данные $\alpha_{\Gamma \text{ расч}}$, $\alpha_{\text{в расч}}$ сравнить с соответствующими опытными данными коэффициента теплоотдачи для выбранного режима.

4. Содержание отчета

Заполненная форма с результатами измерений и расчетов, график зависимости коэффициента теплоотдачи от температурного напора.

Лабораторная работа 3

ТЕПЛООТДАЧА В ОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЕМЕ ПРИ СВОБОДНОМ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА

1. Цель работы

Определение эквивалентного коэффициента теплопроводности, установление его зависимости от температурного напора и сравнение опытных данных с расчетными.

2. Основные теоретические положения

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 $\lambda_{\text{ЭКВ}}$, учитывающий теплопроводность среды и перенос теплоты за счет конвекции, т.е. $\lambda_{\text{ЭКВ}} = \lambda_{\text{ЭКВ}} + \Delta\lambda_{\text{КОНВ}}$.

Конвективный тепловой поток Q_k в цилиндрическом зазоре, образованном двумя вертикальными трубами (труба в трубе), определяется по формуле

$$Q_k = \frac{2\pi l \lambda_{\text{ЭКВ}} (t_{c1} - t_{c2})}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad (7)$$

где t_{c1} , 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 - высота цилиндрического зазора, м.

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

$$\varepsilon_k = 0,18(\text{Gr} \cdot \text{Pr})_{\delta,ж}^{0,25}, \quad (8)$$

где $\varepsilon_k = \frac{\lambda_{\text{ЭКВ}}}{\lambda_{ж}}$ - коэффициент конвекции;

$\text{Gr}_{\delta,ж} = \beta \frac{g\delta^3 (t_{c1} - t_{c2})}{v_{ж}^2}$ - число Грасгофа, учитывающее действие подъемных

(архимедовых) сил;

$\text{Pr}_{ж}$ - число Прандтля, характеризующее физические свойства среды;

β - коэффициент объемного расширения (для газов $\beta = \frac{1}{T_{ж}}$);

$T_{ж}$ - температура газа, К;

g - ускорение свободного падения, м²/с;

δ - толщина цилиндрической прослойки, м.

Формула (8) справедлива при значениях $(\text{Gr} \cdot \text{Pr})_{\delta,ж} > 10^3$.

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

3. Методика выполнения работы

Опытная установка (рис. 3) состоит из двух вертикальных труб 2 и 3 разного диаметра (труба в трубе). Внешний диаметр внутренней трубы 2 $d_1=28$ мм, а внутренний диаметр внешней трубы 3 $d_2=43$ мм; трубы имеют одинаковую длину $l=820$ мм. Электрический нагреватель 4 расположен внутри трубы 2. Мощность нагревателя регулируется лабораторным автотрансформатором и измеряется ваттметром 5. Температуры поверхности труб измеряются хромель-копелевыми термопарами, расположенными на соответствующих поверхностях нагрева (по три термопары на каждой трубе). Термопары подключены к автоматическому потенциометру 1 (точки 1', 2', 3' - температуры поверхности внутренней трубы; точки 4', 5', 6' - температуры - наружной), показывающему температуру поверхности непосредственно в градусах.

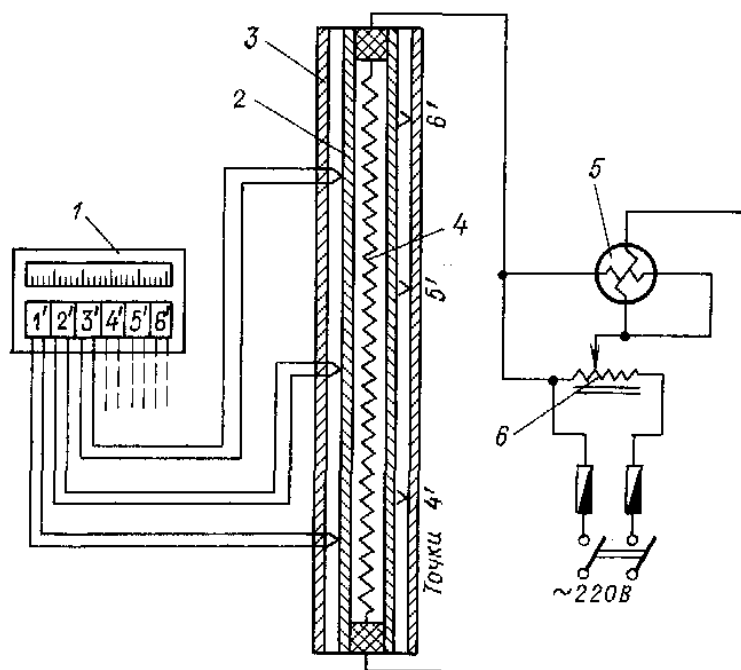


Рис. 3

Порядок выполнения работы включает:

1. Включить питание установки. Установить мощность электронагревателя в пределах 50 - 100 Вт.
2. Сделать 2 - 3 записи показаний приборов при установившемся тепловом режиме (при постоянстве температур во времени) и произвести расчет режима.
3. Провести опыты при различных режимах (в пределах мощности нагревателя 50-100 Вт).
4. Данные измерений и расчетов свести в таблицу по форме 3.

Геометрические параметры труб: $d_1=...$, м; $d_2=...$, м; $F_1=\pi d_1 l...$, м²; $F_2=\pi d_2 l=...$, м²; $l=...$, м.

Степень черноты труб: $\varepsilon_1=\varepsilon_2=0,35$; $\varepsilon_{пр}=...$

№ оп.	Q, Вт	t ₁ , °C	t ₂ , °C	t ₃	t _{c1}	t ₄	t ₅ , °C	t ₆	t _{c2}	Δt _{ср} , К	Q _л , Вт	Q _к , Вт	λ _{экв} , Вт/(м·К)
-------	-------	---------------------	---------------------	----------------	-----------------	----------------	---------------------	----------------	-----------------	----------------------	---------------------	---------------------	-----------------------------

Обработка экспериментальных данных. Для установившегося теплового режима эквивалентный коэффициент теплопроводности λ_{экв} вычисляется по уравнению

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{Q_k \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi l \Delta t_{\text{ср}}}, \quad (9)$$

где Δt_{ср}=t_{c1}-t_{c2} - разность средних температур поверхностей труб, °C;

d₁ - наружный диаметр внутренней трубы, мм;

d₂ - внутренний диаметр наружной трубы мм;

l - длина труб, м;

Q_к - конвективный тепловой поток, Вт.

Конвективный тепловой поток через цилиндрический зазор Q_к=Q-Q_л, где Q - мощность нагревателя, Вт; Q_л - тепловой поток за счет излучения, вычисляется по формуле

$$Q_l = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 F_1 \left[\left(\frac{T_{c1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{c2}}{100} \right)^4 \right], \quad (10)$$

где ε_{пр} - приведенная степень черноты

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)};$$

C₀=5,67 Вт/(м²·К⁴) - коэффициент излучения абсолютно черного тела,

F₁ - площадь поверхности нагрева внутренней трубы, м²;

F₂ - площадь поверхности нагрева наружной трубы, м²;

T_{c1}, T_{c2} - средние абсолютные температуры внутренней и наружной поверхностей труб, К;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - степень черноты поверхностей внутренней и наружной труб; $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$.

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. Вычисляют число Грасгофа:

$$Gr = \beta \frac{g \delta^3}{\nu_{ж}^2} (t_{c1} - t_{c2}), \quad (11)$$

а затем значение комплекса $(Gr \cdot Pr)_{\delta, ж}^{0,25}$. По формуле (8) вычисляют коэффициент конвекции ε_k , расчетное значение $\lambda_{эКВ} = \lambda_{ж} \varepsilon_k$. Значение коэффициентов $\nu_{ж}$, $\lambda_{ж}$ и число Прандтля Pr выбирают из табл. П.2 приложения по $t_{ж} = 0,5(t_{c1} + t_{c2})$.

Достаточно определить расчетное значение $\lambda_{эКВ}$ для одного опыта и затем сравнить его с опытным значением для выбранного режима.

4. Содержание отчета

Заполненная форма с результатами измерений и расчетов.

Лабораторная работа 4

ТЕПЛОТДАЧА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА В ТРУБЕ

1. Цель работы

Определение коэффициента теплоотдачи при турбулентном режиме движения воздуха, сравнение опытных данных с расчетными.

2. Основные теоретические положения

Вынужденное движение жидкости возникает в результате действия внешних возбудителей (насоса, вентилятора и др.).

Различают два основных режима движения: ламинарный и турбулентный. Характер режима определяется соотношением сил инерции и вязкости в потоке, которое характеризуется числом Рейнольдса ($Re < 2 \cdot 10^3$ - ламинарный режим; $Re \geq 1 \cdot 10^4$ - турбулентный).

Конвективный теплообмен при вынужденном движении осуществляется одновременным действием теплопроводности и конвекции. При турбулентном режиме течения перенос теплоты конвекцией внутри жидкости (газа) происходит

путем ее интенсивного перемещения, так что по сечению ядра потока температура жидкости практически постоянна. Резкое изменение температуры наблюдается лишь внутри тонкого пристеночного (пограничного) слоя.

Величина теплового потока Q (Вт) при конвективном теплообмене определяется по формуле Ньютона

$$Q = \alpha F(t_c - t_{ж}), \quad (12)$$

где α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

$t_c, t_{ж}$ - температуры поверхности нагрева и жидкости, °С;

F - поверхность нагрева, м².

Опытом установлено, что процесс теплоотдачи при вынужденном движении неразрывно связан со скоростью движения жидкости w . Поэтому результаты опытных данных в этом случае представляют зависимость $\alpha = f(w)$. Чтобы распространить результаты отдельных опытов на группу подобных явлений, следует обрабатывать их в виде чисел подобия (безразмерных комплексов).

На основании опытных данных академиком М.А. Михеевым получено уравнение подобия, описывающее теплообмен при турбулентном течении воздуха в круглой трубе (при $l/d > 50$):

$$Nu_{d,ж} = 0,018 Re_{d,ж}^{0,8}, \quad (13)$$

где $Nu = \frac{\alpha d}{\lambda_{ж}}$ - число Нуссельта, характеризующее теплообмен на границе стенка-

жидкость;

$Re = \frac{wd}{\nu_{ж}}$ - число Рейнольдса, характеризующее соотношение сил инерции и

вязкости;

α - средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

$\nu_{ж}$ - коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

$\lambda_{ж}$ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

За определяющую температуру принята средняя температура жидкости $t_{ж}$, за определяющий размер - внутренний диаметр трубы d .

3. Методика выполнения работы

Опытная установка (рис. 4) состоит из горизонтальной трубы 3 с внутренним диаметром $d = 10$ мм и длиной $l = 1200$ мм. Электрический нагреватель 4 равномерно намотан на внешнюю поверхность трубы. Мощность нагревателя измеряется ваттметром 8, регулировка мощности производится лабораторным автотрансформатором.

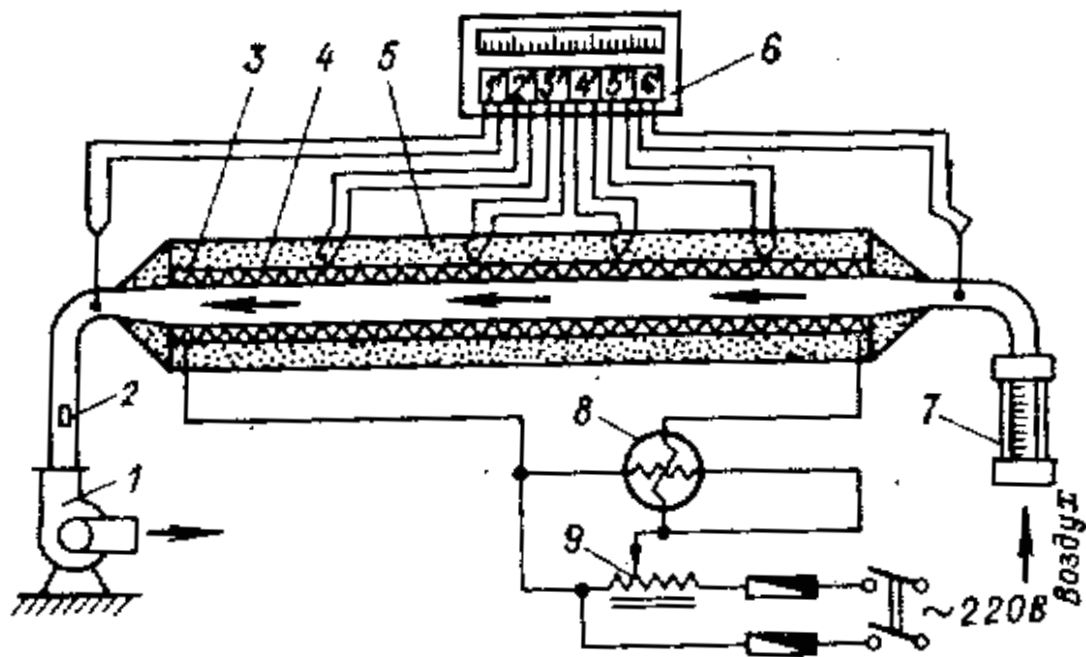


Рис. 4

Температура поверхности трубы измеряется четырьмя хромель-копелевыми термопарами, присоединенными непосредственно к автоматическому потенциометру 6 (точки на потенциометре 2', 3', 4', 5', показывающему температуру поверхности в градусах).

Температура воздуха на входе и выходе измеряется хромель-копелевыми термопарами, размещенными на входном и выходном патрубках (точки 1' и 6'). Для уменьшения тепловых потерь в окружающую среду опытная труба заключена в цилиндрический кожух 5. Движение воздуха осуществляется при помощи вакуум-насоса 1; расход регулируется задвижкой 2 и измеряется ротаметром 7.

Порядок выполнения работы включает:

1. Ознакомиться с расположением приборов на стенде.
2. Включить питание установки от электросети.
3. Установить мощность электронагревателя в пределах 50 - 100 Вт.
4. Включить вакуум-насос и установить нужный расход воздуха на шкале ротаметра.
5. Сделать записи показаний приборов при установившемся тепловом режиме (при постоянстве температур во времени) и произвести расчет режима.
6. Провести опыты при различных режимах в пределах показаний ротаметра 40-60 делений и мощности нагревателя 50 - 100 Вт.
7. Данные измерений и расчетов свести в таблицу по форме 4.

Геометрические параметры трубы: $d=...$, м; $l=...$, м; $F=\pi dl=...$, м²; $f = \frac{\pi d^2}{4} = ..., м^2$.

№ оп.	Q, Вт	t _{2'} , °С	t _{3'} , °С	t _{4'} , °С	t _{5'} , °С	t _с , °С	t _{1'} , °С	t _{6'} , °С	t _в , °С	h, мм	V, м ³ /с	w, м/с	α _{оп} , Вт/(м ² ·К)
-------	-------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	---------------------	----------------------	----------------------	---------------------	-------	----------------------	--------	--

Обработка экспериментальных данных. Для обработки берут данные для установившихся режимов. Средний коэффициент теплоотдачи вычисляется по формуле

$$\alpha = \frac{Q}{(t_c - t_v)F}, \quad (14)$$

где t_c, t_v - средние температуры поверхности трубы и воздуха, °С;

F - площадь поверхности трубы, м²;

Q - конвективный тепловой поток, Вт.

Температура поверхности трубы определяется как среднеарифметическое значение температур в точках 2', 3', 4' и 5', для воздуха - в точках 1' и 6'.

Скорость воздуха w вычисляется по формуле

$$w=V/f, \quad (15)$$

где V - объемный секундный расход воздуха, м³/с;

f - внутренняя площадь поперечного сечения трубы, м².

Объемный расход воздуха V определяется по тарировочному графику ротаметра (табл. П.3 приложения).

По результатам обработки опытных данных строится график $\alpha=f(w)$.

Расчетное значение коэффициента теплоотдачи $\alpha_{расч}$ определяется из уравнения (13) следующим образом. По скорости движения воздуха рассчитывается число Re , затем по уравнению (13) число Nu и по его величине находят $\alpha_{расч}$:

$$\alpha_{расч} = \frac{Nu \cdot \lambda_{ж}}{d}.$$

Значение коэффициентов $\nu_{ж}$ и $\lambda_{ж}$ выбирают по таблице П.2 приложения по средней температуре воздуха.

Достаточно определить $\alpha_{расч}$ для одного опыта. Полученное значение необходимо сравнить с опытным значением для выбранного режима.

4. Содержание отчета

Заполненная форма с результатами измерений, расчеты.

Лабораторная работа 5

ТЕПЛООТДАЧА ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ ЦИЛИНДРА ВОЗДУХОМ

1. Цель работы

Определение среднего коэффициента теплоотдачи при поперечном обтекании цилиндра потоком воздуха, установление его зависимости от температурного напора; сравнение опытных данных с расчетными.

2. Основные теоретические положения

Процесс теплообмена при поперечном обтекании труб имеет ряд особенностей, связанных с гидродинамической картиной движения жидкости вблизи поверхности труб. Главное безотрывное обтекание цилиндра имеет место при малых числах Рейнольдса ($Re < 5$). Для практики характерны значительно большие числа Re , при этом обтекание трубы сопровождается образованием в кормовой части вихревой зоны. Характер и условия омывания передней (фронтальной) и задней (кормовой) половин цилиндра различны.

В лобовой точке набегающий поток разделяется на две части и плавно обтекает переднюю часть периметра трубы. На поверхности трубы образуется пограничный слой с наименьшей толщиной в лобовой точке. Далее он нарастает в размерах. Возрастание давления вдоль потока и подтормаживание жидкости стенкой трубы приводит к появлению возвратного течения, оттесняющего пограничный слой от поверхности трубы, отсюда происходит отрыв потока и образование вихрей.

Отрыв потока и образование вихрей являются основной особенностью поперечного обтекания трубы.

Положение точки отрыва пограничного слоя зависит от величины числа Re и степени турбулентности набегающего потока. При малой степени турбулентности внешнего потока и относительно небольших числах Re течение в пограничном слое вплоть до точки отрыва носит ламинарный характер; точка отрыва характеризуется углом $\varphi = 80-85^\circ$ по периметру. При числах $Re = (1-4)10^5$ течение в пограничном слое на значительной части периметра трубы становится турбулентным. Оно более устойчиво, и зона отрыва смещается в область углов $\varphi = 120-140^\circ$.

Своеобразный характер омывания цилиндра отражается и на теплоотдаче. Интенсивность теплоотдачи по периметру трубы неодинакова. Максимальное

значение коэффициента теплоотдачи наблюдается на лобовой образующей цилиндра ($\varphi=0$), где толщина пограничного слоя наименьшая. По поверхности цилиндра в направлении движения жидкости интенсивность теплообмена резко падает и при $\varphi=90-100^\circ$ достигает минимума. Это изменение связано с нарастанием толщины пограничного слоя, который как бы изолирует поверхность трубы от основного потока. В кормовой части трубы коэффициент теплоотдачи снова возрастает за счет улучшения отвода теплоты вследствие вихревого движения и перемешивания жидкости. При малых значениях Re интенсивность теплообмена в вихревой зоне ниже, чем в лобовой точке.

По мере увеличения числа Re за счет роста интенсивности вихревого движения в области отрыва коэффициент теплоотдачи увеличивается.

Теоретический расчет распределения теплоотдачи по всей окружности трубы отсутствует. Основным методом изучения является опыт.

Средний коэффициент теплоотдачи α определяется из формулы Ньютона

$$Q_k = \alpha F(t_c - t_{ж}), \quad (16)$$

где Q_k - тепловой поток, отдаваемый с поверхности трубы омываемому потоку жидкости, Вт;

$t_c, t_{ж}$ - средняя температура поверхности цилиндра и жидкости, $^\circ\text{C}$;

F - площадь поверхности цилиндра, м^2 .

В результате анализа и обобщения опытных данных для расчета среднего по периметру труб коэффициента теплоотдачи рекомендуют ряд уравнений подобия.

Например, для воздуха при $Re_{d,ж} > 10^3$:

$$Nu_{d,ж} = 0,245 Re_{d,ж}^{0,6}, \quad (17)$$

где $Nu_{d,ж} = \frac{\alpha d}{\lambda_{ж}}$ - число Нуссельта; $Re_{d,ж} = \frac{wd}{\nu_{ж}}$ - число Рейнольдса.

При вычислении чисел подобия за определяющий линейный размер принимают внешний диаметр цилиндра d , определяющей температурой является средняя температура жидкости $t_{ж}$. Соотношение (17) справедливо, когда угол атаки, составленный направлением движения потока и осью трубы, равен 90° .

3. Методика выполнения работы

Опытная установка (рис. 5) состоит из тонкостенного дюралевого цилиндра 1 длиной $l=202,5$ мм и внешним диаметром $d=21,5$ мм. Внутри цилиндра расположен электрический нагреватель 2, мощность которого измеряется ваттметром 3 и регулируется лабораторным автотрансформатором в пределах 40-100 Вт. Для измерения температуры на поверхности цилиндра по периметру зачеканены четыре хромель-копелевые дифференциальные термопары, измеряющие температурный

напор $\Delta t = t_c - t_{ж}$. Измерение дифференциальной термоЭДС производят милливольтметром 4. Термопары подключают к прибору через переключатель 5.

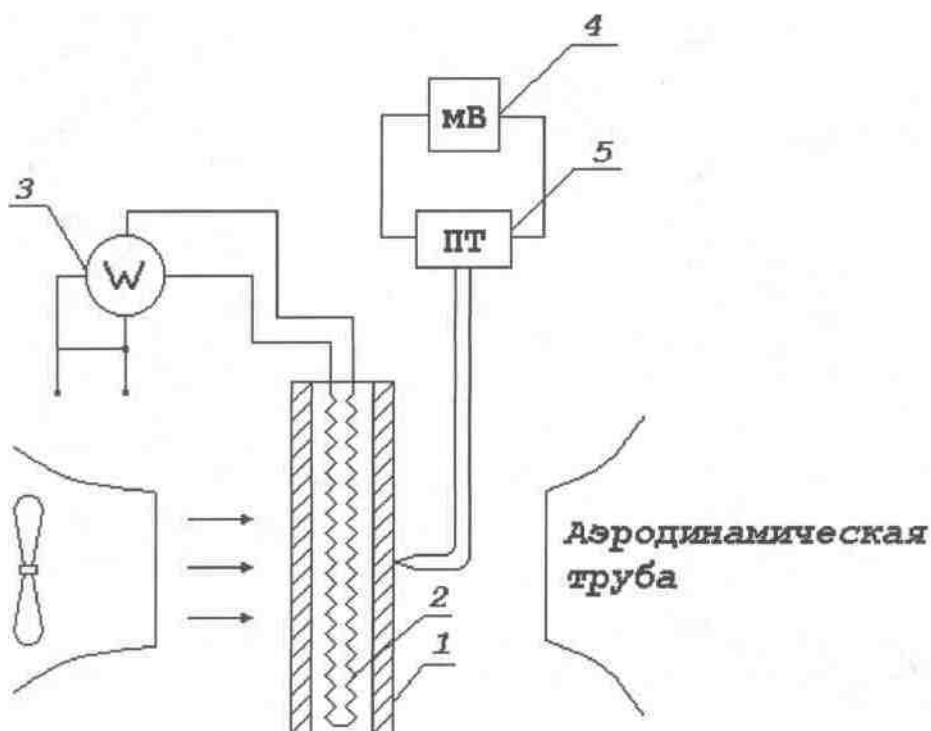


Рис. 5

Температуру воздуха измеряют ртутным термометром.

Испытуемый цилиндр помещен в аэродинамической трубе поперек потока воздуха на специальном держателе. Угол атаки, составленный направлением движения потока и осью цилиндра, равен 90° . Аэродинамическая труба имеет диаметр рабочей части 200 мм, скорость воздушного потока около 30 м/с, число Маха порядка 0,1 (эффекты, связанные со сжимаемостью воздуха, можно не учитывать).

Порядок выполнения работы включает:

1. Автотрансформатором устанавливают мощность нагревателя цилиндра и добиваются установившегося (стационарного) режима; обычно это состояние наступает через 20-25 мин. после запуска установки.
2. В установившемся режиме через 5-10 мин. проводят 3-4 записи показаний измерительных приборов.
3. Работу выполняют для трех установившихся режимов при разной мощности нагревателя в пределах 40-100 Вт.
4. По окончании работы сначала выключают электронагреватель, а затем вентилятор аэродинамической трубы.
5. Данные измерений и расчетов сводят в таблицу по форме 5.

Геометрические параметры трубы: $l=...$, м; $d=...$, м; $F=\pi dl=...$, м².

Температура воздуха $t_{ж}=...$, °С; $T_{ж}=...$, К; $\varepsilon=...$

№ оп.	Q, Вт	E ₁ ,	E ₂ ,	E ₃ ,	E ₄ ,	E _{ср} ,	Δt _{ср} ,	t _с ,	Q _л ,	Q _к ,	α,
				мВ			К	°С	Вт	Вт	Вт/(м ² К)

Обработка экспериментальных данных. Средний коэффициент теплоотдачи при поперечном обтекании потоком воздуха вычисляется по формуле

$$\alpha = \frac{Q_k}{F \Delta t_{ср}}$$

где $\Delta t_{ср} = t_c - t_{ж}$ - разность между средними температурами поверхности трубы и воздушного потока.

Количество теплоты Q_k , передаваемое путем вынужденной конвекции при поперечном обтекании, определяется из равенства

$$Q_k = Q - Q_l,$$

где Q - полное количество теплоты, выделяемой внутри цилиндра в передаваемой во внешнюю среду путем конвекции и лучеиспускания, определяется по мощности электронагревателя цилиндра.

Количество теплоты, передаваемое лучеиспусканием Q_l , Вт, определяется по уравнению

$$Q_l = \varepsilon C_o F \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ж}}{100} \right)^4 \right], \quad (18)$$

где $c_o=5,7$ - коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²К⁴);

ε - степень черноты материала цилиндра;

F - площадь поверхность цилиндра, м²;

T_c и $T_{ж}$ - абсолютные температуры цилиндра и окружающих тел; $T_c=273+\Delta t_c+t_{ж}$;

$T_{ж}=273+t_{ж}$.

Поверхность окружающих тел во много раз больше, чем поверхность цилиндра, поэтому можно принять, что приведенная степень черноты равна ε - степени черноты цилиндра. Для дюралевой слабо полированной поверхности цилиндра можно принять $\varepsilon=0,35$.

В качестве расчетной температуры поверхности цилиндра t_c принимают среднеарифметическую величину из измерений в четырех точках. По опытным

данным строят график зависимости $\alpha_{оп} = f(\Delta t_{ср})$.

Расчет коэффициента теплоотдачи при поперечном обтекании цилиндра по уравнению подобия проводят для одного режима. Скорость потока в аэродинамической трубе $w = 28$ м/с.

Определяют значение числа Рейнольдса:

$$Re_{d,ж} = \frac{wd}{v_{ж}},$$

по формуле (17) вычисляют число Нуссельта и находят $\alpha_{расч}$:

$$\alpha_{расч} = \frac{Nu_{d,ж} \lambda_{ж}}{d}.$$

Индексы $d, ж$ в уравнении подобия обозначают определяющий размер - внешний диаметр цилиндра $d, м$ - и определяющую температуру - температуру воздушного потока в аэродинамической трубе $t_{ж}$. По определяющей температуре из табл. П.2 приложения выбирают физические параметры воздуха ($v_{ж}$ и $\lambda_{ж}$).

Полученное расчетное значение коэффициента теплоотдачи $\alpha_{расч}$ следует сравнить с соответствующим опытным значением для выбранного режима.

4. Содержание отчета

Заполненная форма с результатами измерений, расчеты, график.

Лабораторная работа 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ РАДИАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

1. Цель работы

Определение степени черноты излучающего серого тела и ее зависимости от температуры.

2. Основные теоретические положения

Тепловым излучением (радиацией) называют явление переноса теплоты в виде электромагнитных волн с двойным взаимным превращением теплоты в лучистую энергию и обратно.

Теория теплового излучения различает абсолютно черные тела, характеризующиеся максимальным эффектом излучения и поглощения, и серые, излучение которых всегда меньше, чем у черных, и зависит от физической природы тела, состояния поверхности, температуры.

Радиационный метод определения степени черноты тела основан на сравнении излучения исследуемого тела с излучением абсолютно черного (или другого тела с известным коэффициентом излучения). Теплота, передаваемая в виде лучистой энергии $Q_{\text{л}}$ нагретым телом с температурой T и поверхностью F , равна

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon C_0 F [(T/100)^4 - (T_{\text{ж}}/100)^4], \text{ Вт}, \quad (19)$$

где $T_{\text{ж}}$ - температура тел, воспринимающих излучаемый тепловой поток (принимается равной температуре окружающей среды), К; ε - степень черноты тела, характеризующая излучательную способность тела по отношению к абсолютно черному; $C_0 = 5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ - коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Сравнение лучистых потоков, излучаемых черным и серым телами и измеряемых фотометром (приемником излучения), дает возможность определить степень черноты исследуемого тела $\varepsilon_{\text{с}}$. В работе сравнивается излучение пластины, поверхность которой зачернена (покрыта слоем сажи), с излучением пластины тех же размеров и формы из полированного дюралья (серое тело). Увеличивая температуру поверхности серого тела, можно добиться равенства энергии излучения черного и серого тел.

При одинаковой энергии излучения тел

$$\varepsilon_{\text{ч}} C_0 F [(T_{\text{ч}}/100)^4 - (T_{\text{ж}}/100)^4] = \varepsilon_{\text{с}} C_0 F [(T_{\text{с}}/100)^4 - (T_{\text{ж}}/100)^4],$$

где $\varepsilon_{\text{ч}} = 0,95$ - степень черноты пластины, покрытой слоем сажи; $T_{\text{ч}}$ - температура зачерненной поверхности пластины, К; $T_{\text{с}}$ - температура серой пластины при такой же энергии излучения, как и с черной поверхности, К; $T_{\text{ж}}$ - температура тел, воспринимающих излучение, равная температуре воздуха в лаборатории, К.

Из последнего соотношения определяется степень черноты $\varepsilon_{\text{с}}$ исследуемого серого тела:

$$\varepsilon_{\text{с}} = \frac{\varepsilon_{\text{ч}} [(T_{\text{ч}}/100)^4 - (T_{\text{ж}}/100)^4]}{(T_{\text{с}}/100)^4 - (T_{\text{ж}}/100)^4}. \quad (20)$$

3. Методика выполнения работы

Опытная установка (рис. 6) состоит из двух пластин, закрепленных в поворотной рамке параллельно друг другу, что обеспечивает идентичность условий наблюдения. Рамка I с пластинами поворачивается на 180° вокруг горизонтальной

оси. Внутри рамки между пластинами размещен нихромовый нагреватель, мощность которого регулируется лабораторным автотрансформатором. Поверхность эталонной пластины зачернена. Исследуемое тело - пластина из полированного дюрала. Температура каждой пластины измеряется в четырех точках с помощью хромель-копелевых термопар a, b, c, d - для черной пластины, a', b', c', d' - для серой. Холодные спаи термопар находятся при комнатной температуре. ТермоЭДС термопар измеряются цифровым милливольтметром 3, подключаемым через переключатель 4. Соответствующие разности температур $\Delta t_{ч}$, $\Delta t_{с}$ выбираются из градуировочной табл. П.1 приложения.

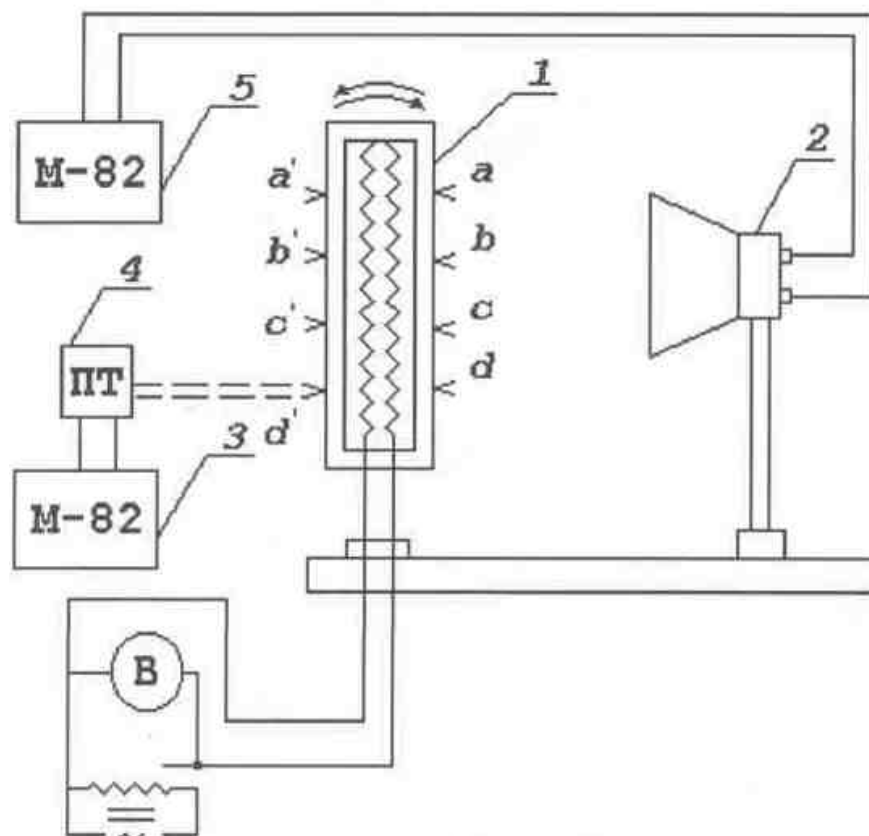


Рис. 6

В качестве приемника излучения используется фотометр 2, представляющий собой батарею из 50 последовательно включенных термопар. Спаи термопар через один зачернены; при падении лучистой энергии они нагреваются больше, чем незачерненные, и в цепи возникает термоЭДС, которая фиксируется цифровым милливольтметром 5.

Порядок выполнения работы включает:

1. Установить перед фотометром зачерненную пластину, включить электронагреватель и автотрансформатором подать некоторую мощность на нагреватель.
2. При достижении зачерненной пластиной температуры 50...60 °С измерить термоЭДС $E_{ч}$, среднюю по показаниям четырех термопар, зачеканенных в черную пластину. Перевести значение термоЭДС в температуру по табл. П.1 приложения. Переключить цифровой милливольтметр на фотометр и замерить его термоЭДС -

E_{ϕ} , характеризующую мощность излучения черной пластины.

3. Повернуть рамку с пластинами на 180° и направить на фотометр излучение серой пластины. Оно меньше, чем от черной пластины; фотометр регистрирует меньшую мощность излучения. Для достижения равенства мощностей излучения серой и зачерненной пластин автотрансформатором увеличить мощность электронагревателя. Когда излучение серой пластины станет равным излучению черной (отсчет по милливольтметру 5, соединенному с фотометром, станет равным E_{ϕ} , измерить термоЭДС E_c , среднюю по показаниям четырех термопар, зачеканенных в серую пластину. Полученное значение перевести в температуру серой пластины по табл. П.1 приложения.

Повторить опыт при двух-трех различных значениях температур зачерненной пластины. Избыточные температуры $\Delta t_{\text{ч}}$ и $\Delta t_{\text{с}}$ определить по градуировочной табл. П.1 приложения, используя средние значения показаний милливольтметра для четырех термопар, закрепленных соответственно на зачерненной и серой поверхностях пластин.

Температуры $T_{\text{ч}}$ и $T_{\text{с}}$ определяются по соотношениям

$$T_{\text{ч}} = 273 + \Delta t_{\text{ч}} + t_{\text{ж}}; \quad T_{\text{с}} = 273 + \Delta t_{\text{с}} + t_{\text{ж}}. \quad (21)$$

Температура $T_{\text{ж}}$ приемника излучения - комнатная.

Вычислить степень черноты серого тела по формуле (21). Данные измерений и расчетов свести в таблицу по форме 6.

Форма 6

Температура окружающих тел $T_{\text{ж}} = \dots, \text{K}; (T_{\text{ж}}/100)^4 = \dots, \text{K}^4; \varepsilon_{\text{ч}} = 0,95$										
№ оп.	$E_{\text{ч}},$ мВ	$\Delta t_{\text{ч}},$ К	$T_{\text{ч}},$ К	$(T_{\text{ч}}/100)^4,$ К ⁴	$E_{\phi},$ мВ	$E_{\text{с}},$ мВ	$\Delta t_{\text{с}},$ К	$T_{\text{с}},$ К	$(T_{\text{с}}/100)^4,$ К ⁴	$\varepsilon_{\text{с}}$

Построить график зависимости степени черноты серой пластины $\varepsilon_{\text{с}}$ от ее температуры.

4. Содержание отчета

Заполненная форма и график.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

Градуировочная таблица перевода термоЭДС (мВ) в разность температур (К) для хромель-копелевых термопар*)

$\Delta t, K$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,71	1,77	1,84	1,90
30	1,97	2,04	2,11	2,17	2,24	2,28	2,31	2,45	2,51	2,58
40	2,65	2,72	2,79	2,86	2,93	3,00	3,06	3,13	3,20	3,27
50	3,34	3,41	3,48	3,55	3,62	3,69	3,75	3,82	3,89	3,96
60	4,03	4,10	4,17	4,24	4,31	4,38	4,45	4,52	4,59	4,66
70	4,73	4,80	4,87	4,95	5,02	5,09	5,16	5,23	5,31	5,38
80	5,45	5,52	5,59	5,67	5,74	5,81	5,88	5,95	6,03	6,10
90	6,17	6,24	6,32	6,39	6,46	6,54	6,61	6,68	6,75	6,83
100	6,90	6,97	7,05	7,12	7,20	7,27	7,34	7,42	7,49	7,57
110	7,64	7,72	7,79	7,87	7,94	8,02	8,09	8,17	8,24	8,32
120	8,39	8,47	8,54	8,62	8,69	8,77	8,84	8,92	8,99	9,07
130	9,14	9,22	9,29	9,37	9,45	9,53	9,60	9,68	9,76	9,83
140	9,91	9,99	10,06	10,14	10,22	1,30	10,37	10,45	10,53	10,60
150	10,68	10,76	10,84	10,91	10,99	11,07	11,15	11,23	11,30	11,38
160	11,46	11,54	11,62	11,70	11,78	11,86	11,93	12,01	12,09	12,17
170	12,25	12,33	12,41	12,49	12,57	12,65	12,72	12,80	12,88	12,96
180	13,04	13,12	13,20	13,28	13,36	13,44	13,51	13,59	13,67	13,75
190	13,83	13,91	13,99	14,08	14,16	14,24	14,32	14,40	14,49	14,57
200	14,65	14,73	14,82	14,90	14,99	15,07	15,16	15,24	15,33	15,41
210	15,50	15,58	15,66	15,75	15,83	15,92	16,00	16,09	16,17	16,26
220	16,34	16,42	16,51	16,59	16,68	16,76	16,84	16,93	17,02	17,10
230	17,19	17,27	17,35	17,44	17,52	17,61	17,69	17,78	17,86	17,95
240	18,03	18,11	18,20	18,28	18,37	18,45	18,54	18,62	18,71	18,79
250	18,88	18,96	19,04	19,13	19,21	19,30	19,38	19,47	19,55	19,64
260	19,72	19,80	19,89	19,97	20,06	20,14	20,23	20,31	20,40	20,48
270	20,57	20,65	20,73	20,82	20,90	20,99	21,07	21,16	21,24	21,33
280	21,41	21,49	21,58	21,66	21,75	21,83	21,92	22,00	22,09	22,17
290	22,26	22,34	22,42	22,51	22,59	22,68	22,76	22,85	22,93	23,02

1. Найдите в таблице полученные из опыта значения термоЭДС.
2. В крайнем левом столбце прочтите соответствующее значение температуры (десятки градусов) и добавьте к нему число единиц градусов из верхней строки.

Таблица П.2

Теплофизические свойства сухого воздуха при нормальном атмосферном давлении

t, °C	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кгК)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(мК)	$\alpha \cdot 10^5$, м ² /с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
-50	1,584	1,013	2,035	1,27	9,23	0,728
-30	1,453	1,013	2,198	1,49	10,80	0,723
-10	1,342	1,009	2,361	1,74	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,442	1,88	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,594	2,01	14,16	0,705
30	1,165	1,005	2,757	2,29	16,00	0,701
50	1,093	1,005	2,896	2,57	17,95	0,698
70	1,029	1,009	3,129	2,86	20,02	0,694
100	0,946	1,009	3,338	3,36	23,13	0,688
140	0,854	1,017	3,641	4,03	27,80	0,684
180	0,779	1,022	3,780	4,75	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,931	5,14	34,85	0,680

Таблица П.3

Определение расхода воздуха по показаниям ротаметра

Деление шкалы ротаметра	Расход $V \cdot 10^4$, м ³ /с	Деление шкалы ротаметра	Расход $V \cdot 10^4$, м ³ /с
5	5,56	40	13,3
10	6,65	45	14,4
15	7,77	50	15,6
20	8,89	55	16,6
25	10,0	60	18,0
30	11,1	65	19,4
35	12,2	70	20,8

Примечание. Величины расхода между промежуточными делениями шкалы прибора определяют с помощью линейной интерполяции.

СОДЕРЖАНИЕ

Работа 1. Определение коэффициента теплопроводности керамического материала методом трубы.	3
Работа 2. Теплоотдача горизонтальной и вертикальной труб при свободном движении воздуха.	6
Работа 3. Теплоотдача в ограниченном объеме при свободном движении воздуха.	11
Работа 4. Теплоотдача при вынужденном движении воздуха в трубе. . . .	15
Работа 5. Теплоотдача при поперечном обтекании цилиндра воздухом. .	19
Работа 6. Определение степени черноты радиационным методом.	23
Приложение.	27

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. -М.: Энергия, 1981.
2. Михеев М. А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. - М.: Энергия, 1974, 1977.
3. Шелудько О.В., Оноприенко А. И. Тепломассообмен. Часть 1. – СПб.: СЗТУ, 2003.

Подписано в печать 22.02.18. Формат 84x108/32
Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Бумага мелованная. Усл. Печ. л. – 1,52.
Тираж 50 экз.

Издательство Современного технического университета
390048, г. Рязань, ул. Новоселов, 35А.
(4912) 30-06-30, 30 08 30