

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛУЧИСТОГО ПЕРЕНОСА ТЕПЛОТЫ.

*Цель работы* – ознакомиться с основными понятиями теории лучистого теплообмена, экспериментально определить степень черноты серого тела и зависимость энергии излучения его поверхности от ее абсолютной температуры.

### Основы теории.

Теплообменом излучением называется перенос энергии путем электромагнитных волн или фотонов.

Количество энергии, излучаемое или поглощаемое единицей поверхности тела в единицу времени называется плотностью интегрального излучения тела  $E$

$$E = \frac{Q}{F}, \frac{Bm}{m^2} \quad (1)$$

В общем случае, часть лучистой энергии, падающей на поверхность тела, отражается поверхностью, часть поглощается телом и часть проходит через него. Отношение поглощенной энергии, отраженной части, прошедшей сквозь тело к падающей энергии называется соответственно коэффициентом поглощения  $A$ , отражения  $R$  и прозрачности  $D$ . Очевидно, что

$$A + R + D = 1 \quad (2)$$

При  $A=1, R=D=0$  – тело абсолютно черное;

$R=1, A=D=0$  – тело абсолютно белое;

$D=1, A=R=0$  – тело абсолютно прозрачное.

В природе таких тел не встречается. Однако, введение этих понятий упрощает изучение законов излучения.

Сумма собственного и отраженного излучения называется эффективным излучением тела.

Основные закономерности излучения и лучистого теплообмена устанавливаются следующими законами.

*Закон Планка* – устанавливает зависимость интенсивности излучения абсолютно черного тела  $Y_{Sl}$  от длины волны и температуры

$$Y_{Sl} = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \exp(C_2 / \lambda \cdot T) - 1}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина волны;

$T$  – абсолютная температура;

$C_1, C_2$  – 1-ая и 2-ая константы Планка.

Опыт показывает, что с возрастанием температуры максимум излучения смещается в сторону более коротких длин волн.

*Закон смещения Вина* позволяет определить длину волны, на которую приходится максимум излучения

$$l_m = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{T}. \quad (4)$$

Закон Стефана-Больцмана устанавливает зависимость суммарной энергии излучения  $E_s$  от абсолютной температуры

$$E_s = C_s \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (5)$$

$C_s = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$  – константа Больцмана.

Закон Стефана-Больцмана строго справедлив только для абсолютно черного тела. Однако опыты показали, что его можно применять для реальных (серых) тел. Суммарная энергия, излучаемая реальным телом определяется по формуле

$$E = e \cdot E_s = e \cdot C_s \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (6)$$

$e = \frac{E}{E_s}$  – степень черноты тела,  $0 < e < 1$ .

*Закон Кирхгоффа* устанавливает, что отношение лучеиспускательной способности тела к его лучепоглащательной способности равно лучеиспускательной способности абсолютно черного тела при той же температуре

$$\frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \dots E_s = C_s \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (7)$$

*Закон Ламберта* показывает, что интенсивность излучения абсолютно черного тела в любом направлении меньше чем в направлении, нормальном к элементу излучающей поверхности.

#### Описание установки.

Установка состоит из нагревательного элемента 1 в виде трубы с размерами  $l = 1250 \text{ мм}$ ,  $d = 13 \text{ мм}$ .

Подводимая к нагревателю трубы мощность электрического тока регулируется с помощью автотрансформатора 2 и определяется на основе показаний амперметра 3 и вольтметра 4. Температура поверхности измеряется с помощью термомпары 5 и милливольтметра 6, шкала которого проградуирована в  $^{\circ}\text{C}$ .

### Методика проведения эксперимента.

На нагревателе устанавливается начальное напряжение 100 В и контролируется наступление стационарного температурного режима. Считаем, что стационарный температурный режим наступил, если стрелка милливольтметра в течение 2-3 минут показывает одно и то же значение температуры.

После этого записываются в таблицу 1 показания: милливольтметра, амперметра и вольтметра, температура воздуха.

Последующие опыты проводят, повышая напряжение в цепи нагревателя на 10,15 или 20 В (по указанию преподавателя).

Таблица 1

№ п/п	Температура поверхности $t_{\text{с}}$ , $^{\circ}\text{C}$	Температура воздуха $t_{\text{в}}$ , $^{\circ}\text{C}$	Напряжение в цепи нагревателя $U_i$ , В	Сила тока в цепи нагревателя $Y_i$ , А	$Q_i = Y_i \cdot U_i$ , Вт	$Q_{ki}$ Вт	$Q_{li}$ Вт	$E_i$ Вт/м <sup>2</sup>	$E_{si}$ Вт/м <sup>2</sup>	$\varepsilon_i$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

### Обработка опытных данных

Общее количество теплоты,  $Q$ , отдаваемое поверхностью трубы в окружающую среду определяется как

$$Q_i = Y_i \cdot U_i = Q_{ki} + Q_{li}, \text{ Вт}$$

Конвективная составляющая этой теплоты определяется для горизонтальной трубы из соотношения

$$Q_{ki} = a_k \cdot F \cdot \Delta t = 1,57 \cdot I_g \cdot l \cdot (t_c - t_g) \cdot \left[ \frac{g \cdot d^3}{V_g^2} \cdot b \cdot (t_c - t_g) \cdot \text{Pr}_g \right]^{0,25} \quad (8)$$

или для воздуха при  $20^{\circ}\text{C}$

$$Q_{ki} \approx 0,23 \cdot \Delta t^{1,25}, \text{ Вт}; \quad \Delta t = t_c - t_g.$$

Теплофизические константы в этом уравнении определяются при температуре воздуха  $t_g$ ;  $t_c$  – температура стенки.

Количество лучистой энергии в каждом опыте определяется

$$Q_{Ii} = Q_i - Q_{ki}, \text{ Вт} \quad (9)$$

Затем подсчитываем значения плотности лучистого потока тела

$$E_i = \frac{Q_{Ii}}{F}, \text{ Вт/м}^2, \quad (10)$$

где  $F = p \cdot d \cdot l, \text{ м}^2$ .

Для степени черноты тела имеем соотношение

$$e_i = \frac{E_i}{E_{si}} \quad (11)$$

где  $E_{si}$  – плотность излучения черного тела

$$E_{si} = 5,67 \cdot \left( \frac{T_{ci}}{100} \right)^4, \text{ Вт/м}^2; \quad T_{ci} = t_{ci} + 273 \quad (12)$$

$$E_i = 5,67 \cdot e_i \cdot \left( \frac{T_{ci}}{100} \right)^4;$$

$$e_i = \frac{E_i \cdot 100^4}{5,67 \cdot T_{ci}^4}. \quad (13)$$

На основании опытных данных по уравнению (13) определяем значения  $e_i$  для каждого режима, а затем среднее значение  $e_{cp}$

$$e_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n},$$

где  $n$  – число режимов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СЫПУЧЕГО  
МАТЕРИАЛА СТАЦИОНАРНЫМ МЕТОДОМ ТРУБЫ

Теоретические основы эксперимента

Согласно закону Фурье плотность теплового потока (количество теплоты, проходящее в единицу времени через единицу изотермической поверхности) пропорциональна градиенту температуры

$$\vec{q} = -l \frac{dt}{dn} \cdot \vec{n}_0, \text{ Вт/м}^2 \quad (1)$$

где  $\vec{n}_0$  – единичный вектор, нормальный к изотермической поверхности и направленный в сторону возрастания температуры;  
 $dt/dn$  – градиент температуры.

Коэффициент пропорциональности  $\lambda$  есть физический параметр вещества и называется коэффициентом теплопроводности. Он характеризует способность вещества проводить теплоту и численно равен количеству теплоты, которое проходит в единицу времени через единицу изотермической поверхности при температурном градиенте, равном единице

$$l = \frac{|q|}{grad}, \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{К} \quad (2)$$

Для определения коэффициента теплопроводности стационарным методом трубы используется решение задачи о передаче теплоты через бесконечную цилиндрическую стенку с изотермическими поверхностями.

Количество теплоты, передаваемое через цилиндрический слой, длиной  $l$ , внутреннего диаметра  $d_1$  и наружного диаметра  $d_2$ , имеющего постоянные температуры  $t_1$  на внутренней и  $t_2$  на внешней поверхностях определяется следующим выражением

$$Q = \frac{2p \cdot l \cdot l (t_1 - t_2)}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \text{ Вт} \quad (3)$$

Если известна величина теплового потока, то отсюда можно найти значение коэффициента теплопроводности материала слоя

$$l = \frac{Q \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}{2p \cdot l \cdot (t_1 - t_2)}, \text{ Вт/м} \cdot \text{град} \quad (4)$$

Описание установки.

Экспериментальная установка для определения коэффициента теплопроводности сыпучего материала изображена на рис. 1. Она состоит из трубчатого электронагревателя, обеспечивающего равномерное тепловыделение по дине, и внешней тонкостенной трубы из нержавеющей стали 2. Исследуемый материал 3 (сухой речной песок) образует цилиндрический слой между внешней трубой и нагревателем.

Предположение о бесконечности цилиндрического слоя с достаточной точностью достигается большой длиной слоя по сравнению с его наружным диаметром

$$\frac{l}{d} \approx 23,6.$$

Высокую точность измерения обеспечивает равномерное тепловыделение нагревателя и его точная центровка, а также тепловая изоляция торцов трубы. Количество теплоты, выделенное в нагревателе и проходящее через слой исследуемого материала вычисляют по показаниям амперметра 5 и вольтметра 4 согласно закону

$$Q = Y \cdot U, \text{ Вт.}$$

Температуры внешней и внутренней изотермических поверхностей слоя песка измеряется с помощью термопар 6 и 7, подключенных поочередно к милливольтметру 9.

### Выполнение эксперимента.

Включить регулятор напряжения в сеть и установить минимальное напряжение, заданное перед началом работы. Дождаться установления стационарного режима (25 минут), когда показания обеих термопар не изменяются со времен. Только в стационарном режиме вся теплота, выделяемая нагревателем проходит через слой исследуемого материала, и следовательно, справедливы выражения (3) и (4).

В стационарном режиме измеряются ток и падение напряжения на нагревателе и снимаются показания обеих термопар с помощью милливольтметра.

Данные измерений заносятся в таблицу 1.

Таблица 1

$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_{cp}, ^\circ\text{C}$	$Y, \text{ A}$	$U, \text{ B}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$

Размеры:  $l=1,13 \text{ м}$ ,  $d_1=16 \text{ мм}$ ,  $d_2=49 \text{ мм}$ .

Аналогично проводятся измерения на остальных режимах.

### Обработка результатов.

Используя полученные значения коэффициентов теплопроводности материала определяется с помощью соотношения

$$I(t_{cp}) = \frac{Y \cdot U \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}{2 \cdot p \cdot l \cdot (t_1 - t_2)}, \quad \text{Вт/(м·град)}.$$

Коэффициент теплопроводности относится к средней температуре слоя

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2}.$$

По полученным результатам построить график зависимости коэффициента теплопроводности сухого сыпучего материала от температуры

$$I = I(t_{cp}).$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ  
МЕТОДОМ РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМА.

Теоретическая основа эксперимента.

Процесс охлаждения или нагревания тела, при котором поле температуры в теле изменяется не только в пространстве (по координатам  $x, y, z$ ), но и во времени  $t$ , называется нестационарным.

Первый период охлаждения (нагревания) характерен тем, что скорость изменения температур внутри тела существенно зависит от вида начального распределения температуры. Поэтому первый период называют упорядоченной стадией охлаждения (нагревания).

Выражение для температурного поля в этой стадии записывается в виде бесконечного ряда

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot U_n \cdot e^{-mnt} \quad , \quad (1)$$

где  $u = t - t_{жс}$  – избыточная температура в точках тела по отношению к температуре окружающей среды  $t_{жс}$ ;

$A_n$  – постоянный коэффициент, свой для каждого слагаемого ряда, находится из начальных условий;

$U_n$  – функция, зависящая от координат тела;

$m_n$  – постоянное число, которое как и  $A_n$  зависит от номера слагаемого ряда.  $m_1 < m_2 < m_3 \dots m_n$

Начиная с некоторого момента времени все слагаемые бесконечного ряда (1) становятся малыми по сравнению с первыми и изменение температуры для всех точек при охлаждении (нагревании) не зависит от начальных условий. Эту вторую стадию называют регулярным режимом. Для него зависимость между  $u$  и  $t$  выражается первым членом ряда

$$u = A_1 \cdot U_1 \cdot e^{-m_1 t} \quad (2)$$

Третья стадия охлаждения соответствует стационарному режиму.

Существуют различные экспериментальные методики определения теплофизических характеристик материалов, основанные на методе регулярного режима, общая теория которого разработана профессором Кондратьевым Г. М.

При интенсивном внешнем теплообмене  $a \rightarrow \infty$ , коэффициент теплопроводности  $a$ , согласно второй теореме Кондратьева Г. М. становится пропорциональным темпу охлаждения

$$a = k \cdot m, \text{ м}^2/\text{с} \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, зависит лишь от формы и размеров тела,  $\text{м}^2$ ;

$m$  – темп охлаждения ( $\text{сек}^{-1}$ ) при интенсивном внешнем теплообмене ( $a \rightarrow \infty$ ) определяется в результате эксперимента.

Для оценки теплоизоляционных свойств материалов, работающих в нестационарном тепловом режиме, недостаточно знания только коэффициента теплопроводности, как при стационарном режиме, ибо лучше свойства теплоизоляционного материала характеризуются минимальным значением коэффициента температуропроводности и максимальной теплоемкостью.

Дадим более подробные описания коэффициенту температуропроводности  $a$  и темпу охлаждения  $m$ .

Коэффициент температуропроводности является физическим параметром вещества

$$a = \frac{l}{c \cdot r}, \text{ м}^2/\text{сек} \quad (4)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$ ;

$c$  – теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$ ;

$\rho$  – плотность вещества  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Он характеризует скорость изменения температуры в любой точке тела, т.е. является мерой теплоинерционных свойств тела. Темп охлаждения  $m$  выражает относительную скорость изменения избыточной температуры любой точки тела в зависимости от формы и размеров тела, теплофизических свойств материала и условий внешнего теплообмена.

При регулярном режиме темп охлаждения остается постоянной величиной, не зависящей ни от координат, ни от времени. Действительно, логарифмируя выражение (2) и опуская индексы, получим

$$\ln u = -m \cdot t + c(x, y, z) \quad (5)$$

После дифференцирования обеих частей уравнения (5) имеем

$$\frac{1}{u} \frac{\partial u}{\partial t} = -m = \text{const} \quad (6)$$

При экспериментальном определении темпа охлаждения строится график функции  $\ln u = f(t)$ , так что темп охлаждения найдется по величине тангенса угла наклона прямой к оси абсцисс (рис.1). Взяв на прямой какие-нибудь две точки 1 и 2 с координатами  $t_1$ ,  $\ln J_1$  и  $t_2$ ,  $\ln J_2$  запишем

$$m = \frac{\ln u_1 - \ln u_2}{(t_2 - t_1) \cdot 60}, \text{ с}^{-1} \quad (7)$$

Описание экспериментальной установки.

В термостате 1 (рис.2) с помощью подогревателя нагревают воду, постоянная температура которой поддерживается с помощью системы автоматического контроля.

Чувствительным элементом в системе является контактный термометр. Интенсивный теплообмен между охлаждаемым телом и водой обеспечивается перемешиванием воды. Испытуемое тело 2 (акалориметр) представляет собой цилиндрической формы тонкостенный сосуд из бронзы диаметром  $2 \cdot r_0 = 60$  мм и высотой  $h = 83$  мм, наполненный исследуемым материалом (сухим песком). В центре акалориметра находится спай  $t_1$  дифференциальной термопары 3, другой спай помещен в медную гильзу и имеет температуру жидкости  $t_{ж.}$  для измерения малой величины э.д.с. термопары используется переносной потенциометр ПП-63.

### Порядок проведения работы.

Включив электронагреватель и мешалку термостата, ожидают пока температура воды в термостате не достигнет заданной для опыта постоянной величины ( $t_{ж} \approx 60^\circ\text{C}$ ). За счет регулировки контактный термометр позволяет поддерживать при необходимости другие значения температуры воды. Опыт ведут путем нагрева акалориметра в термостате. Поэтому перед опытом акалориметр должен иметь температуру окружающей среды, т.е. находиться в стационарном тепловом состоянии. В связи с этим в некоторых случаях может возникнуть потребность в специальном предварительном охлаждении акалориметра, для чего следует использовать сосуд с холодной водой. Поместив акалориметр в термостат, записывают в таблицу 1 через каждую минуту показания термопары, которые дают возможность судить об изменении разности температур в центре акалориметра и воды. Измерения прекращают через 12-15 минут.

### Обработка результатов.

По полученным экспериментальным данным строят график  $\ln u = f(t)$  и на нем выделяют область регулярного режима (рис.1). После этого на основании формулы (7) определяется темп охлаждения тела. Для вычисления коэффициента температуропроводности по формуле (3) необходимо использовать коэффициент  $K$ , который для цилиндра конечной длины равен

$$k = \frac{1}{\left(\frac{2,405}{r_0}\right)^2 + \left(\frac{p}{h}\right)^2}.$$

Таблица 1.

#### Результаты измерений

№ отсчетов	Время $\tau$	Разность температур $\nu, ^\circ\text{C}$	$\ln \nu$
------------	--------------	---	-----------

1			
2			
3			

#### Лабораторная работа № 4.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРЕБРЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ.

Количество теплоты, передаваемого при конвективном теплообмене, через плоскую стенку толщиной  $\delta$ , выполненную из материала с коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  и гладкими поверхностями их площади  $F_1$ , находится из выражения

$$Q = \frac{(t_c - t_{\text{возд}})}{\frac{1}{a_1} + \frac{d}{l} + \frac{1}{a_2}} \cdot F_1 = k(t_c - t_{\text{возд}}) \cdot F_1, \text{ Вт.}$$

При очень резком различии коэффициентов теплоотдачи на боковых поверхностях, например,  $\alpha_1 \ll \alpha_2$  коэффициент теплопередачи

$$k = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \frac{d}{l} + \frac{1}{a_2}} = \frac{a_2}{\frac{a_2}{a_1} + a_2 \cdot \frac{d}{l} + 1}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{град)}$$

получается меньше самого малого коэффициента теплоотдачи  $k < \alpha_2$  поскольку

$$\frac{a_2}{a_1} + a_2 \cdot \frac{d}{l} + 1 > 1.$$

Один из способов интенсификации теплопередачи (увеличения  $k$ ) заключается в оребрении поверхности, конвективный теплообмен с которой характеризуется малым коэффициентом теплоотдачи. При этом оребрять поверхность необходимо до тех пор, пока значение  $\alpha_2 \cdot F_2$  ( $F_2$  – площадь оребренной поверхности) не достигнет величины  $\alpha_1 \cdot F_1$ .

Однако, при оребрении коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$  изменяется и количество теплоты, отдаваемое оребренной поверхностью, обычно представляют в виде суммы

$$Q_{op} = Q_p + Q_c.$$

Количество теплоты, отдаваемой с поверхности ребер

$$Q_p = a_p \cdot (t_c - t_{\text{возд}}) \cdot E \cdot F_p, \text{ Вт,}$$

здесь  $\alpha_p$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности ребер;

$E$  – эффективность ребра;

$F_p$  – площадь поверхности ребер;

$t_c$  – температура основания ребра, равная температуре гладкой части оребренной поверхности.

Количество теплоты, отдаваемое гладкой частью оребренной поверхности

$$Q_c = a_c \cdot (t_c - t_{\text{возд}}) \cdot F_c, \text{ Вт,}$$

где  $a_c$  – коэффициент теплоотдачи гладкой части оребренной поверхности.

Ввиду того, что практически невозможно определить по отдельности  $a_c$  и  $a_p$ , удобно количество теплоты, отдаваемой оребренной поверхности отнести к неоребренной поверхности стенки

$$Q_{op} = a_p \cdot (t_c - t_{\text{возд}}) \cdot E \cdot F_p + a_c (t_c - t_{\text{возд}}) \cdot F_c = a_{\text{эф}} \cdot (t_c - t_{\text{возд}}) \cdot F_c$$

где  $F_c$  – площадь поверхности на которую нанесено оребрение;

$a_{\text{эф}}$  – эффективный коэффициент теплоотдачи оребренной поверхности.

Тогда отношение количества теплоты, рассеиваемой в окружающую среду оребренной поверхностью, к количеству теплоты, рассеиваемой такой же по форме и величине поверхностью без оребрения при равных температурах поверхностей и окружающего воздуха называется эффективностью оребрения

$$j = \frac{Q_{op}}{Q_c} = \frac{a_{\text{эф}}(t_c - t_{\text{возд}}) \cdot F_c}{a_c \cdot (t_c - t_{\text{возд}}) \cdot F_c} = \frac{a_{\text{эф}}}{a_c}.$$

### Описание экспериментальной установки.

Экспериментальная установка для определения эффективности оребрения цилиндрической поверхности изображена на рис. 1. Основными ее частями являются гладкая труба 1 и оребренная труба 2, имеющие одинаковую длину  $l$ , и нагреваемые изнутри трубчатými электронагревателями 3. Гладкая труба получена из оребренной снятием оребрения. Ее наружный диаметр  $d_1$  равняется диаметру поверхности трубы 2, на которую нанесено оребрение.

Равномерное тепловыделение по длине негревателей, точная их центровка внутри труб и высокий коэффициент теплопроводности материала труб (алюминий) в сочетании с большой толщиной стенки обеспечивают постоянство температуры на теплоотдающих поверхностях.

Количество теплоты, рассеиваемого электронагревателями через боковые поверхности труб, определяется по показаниям амперметров 5 и вольтметров 4 согласно закону

$$Q = I \cdot U.$$

Возможность утечки теплоты через торцы труб устраняется тепловой изоляцией. Температура поверхности труб  $t_c$  находится по показаниям хромель-копелевых термопар 6, подключаемых поочередно с помощью переключателя 7 к милливольтметру 8.

### Проведение эксперимента.

Включить регуляторы напряжения в сеть и установить на гладкой трубе первое значение напряжения, указанное преподавателем.

На оребренной трубе установить напряжение примерно в 1,25 раза больше. После наступления стационарного температурного режима (примерно через 20 минут) записать показания амперметров, вольтметров для обеих труб.

Результаты измерений заносятся в таблицу 1.  
Эксперимент повторяется трижды.

### Обработка результатов.

На основании полученных данных строятся графические зависимости  $Q = f(t_c - t_{возд})$  для каждой трубы по трем экспериментальным точкам.

Эффективность оребрения  $j = \frac{Q_{op}}{Q_c}$  определяется графически с помощью построенных зависимостей следующим образом. В пределах температурного диапазона, охваченного экспериментом, выбираются 3 значения  $(t_c - t_{возд})$  и по ним определяются на построенных кривых соответствующие значения  $Q_{op}$  и  $Q_c$  (на рис. 2 эти значения определены как «вспомогательные точки»).

Полученные три пары значений и определяют величину эффективности оребрения  $j = \frac{Q_{op}}{Q_c}$  для соответствующих величин  $(t_c - t_{возд})$  (рис.3).

По полученным данным строится графическая зависимость эффективности оребрения от температурного (по трем точкам)  $j = j(t_c - t_{возд})$  (рис. 3).

Таблица 1

Режим	Гладкая труба				Оребренная труба			
	$t_{zл}, ^\circ\text{C}$	$Y_{zл}, \text{A}$	$U_{zл}, \text{B}$	$Q_{zл}, \text{Bт}$	$t_{op}, ^\circ\text{C}$	$Y_{op}, \text{A}$	$U_{op}, \text{B}$	$Q_{op}, \text{Bт}$
1								
2								
3								

## ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ПРИ СВОБОДНОМ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА ОКОЛО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЫ.

### Теоретические основы эксперимента.

Свободное движение жидкости возникает в поле силы тяжести за счет изменения плотности жидкости с температурой. Если температура поверхности выше температуры окружающей среды, то расположенные у нагретой поверхности более горячие слои жидкости за счет разности плотностей в поле силы тяжести будут подниматься вверх. Интенсивность движения возрастает с увеличением разности температур.

Большое значение в технике имеет передача теплоты при свободном движении воздуха от нагретых вертикальных пластин и труб (элементы теплообменной арматуры, теплообмен от стен в помещениях и т.п.).

Характеристикой конвективного теплообмена является коэффициент теплоотдачи, который устанавливает связь между количеством теплоты  $Q$ , передаваемым с горячей поверхности площадью  $F$  и разностью температур между ними

$$Q = a \cdot (t_c - t_{жс}) \cdot F, \text{ Вт} \quad (1)$$

Коэффициент теплоотдачи является неизвестной величиной. Если в конкретном случае удастся определить  $a$  в зависимости от условий теплообмена

$$a = \frac{Q}{(t_c - t_{жс}) \cdot F}, \text{ м}^2 \cdot \text{Вт/град} \quad (2)$$

а затем представить полученные значения в безразмерной критериальной форме

$$Nu_{жс} = 0,75 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25}, \quad (3)$$

то полученное выражение можно использовать для расчета теплоотдачи всех подобных процессов при свободном ламинарном движении воздуха у вертикальных труб или вертикальных поверхностей.

В выражении (3) использованы следующие обозначения

$Nu_{жс} = \frac{a \cdot h}{l}$  – безразмерный критерий теплоотдачи Нуссельта;

$Pr$  – число Прандтля воздуха (является его физической характеристикой);

$Gr = \frac{g \cdot b \cdot (t_c - t_{жс}) \cdot h^3}{\nu^2}$  – критерий Грасгофа, который характеризует соотношение между подъемной силой в жидкости, возникающей вследствие разности плотностей и силой вязкости при движении жидкости;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение силы тяжести;

$t_c$  – температура стенки трубы;

$t_{жс}$  – температура воздуха вдали от трубы;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·град);

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с;

$h$  – длина трубы, м;

$\beta$  – температурный коэффициент объемного расширения. Для идеального газа (воздух при нормальных условиях)  $\beta = 1/T_{жк}$ , 1/град;

$T_{ж}$  – абсолютная температура воздуха. Индекс «жк» обозначает, что в качестве определяющей температуры для выбора физических свойств жидкости принимается температура воздуха вдали от трубы.

### Описание экспериментальной установки.

Схема экспериментальной установки для определения теплоотдачи при свободном движении воздуха около вертикальной трубы изображена на рис. 1. Она представляет собой вертикальный трубчатый электронагреватель 1 наружным диаметром  $d=16$  мм и высотой  $h=1,13$  м, подвешенный на кронштейне в углу лаборатории. Количество выделяемой теплоты регулируется изменением мощности с помощью лабораторного автотрансформатора и определяется по показаниям амперметра 2 и вольтметра 3.

Для измерения температуры поверхности трубы в ней зачеканены 10 хромель-копелевых термопар, подключаемых поочередно с помощью переключателя термопар 5 к милливольтметру 4.

### Выполнение эксперимента.

Включить регулятор напряжения в сеть и установить первое из трех значений тока на нагревателе, указанных преподавателем.

После этого нагреватель нагревается и примерно в течении 20 минут выходит на стационарный режим. После наступления стационарного режима, когда температура поверхности нагревателя перестает расти, считываются показания амперметра, вольтметра и всех 10 термопар, последовательно переключая положения переключателя термопар.

Затем устанавливаются новые значения тока и напряжения и аналогично производятся измерения в остальных режимах. Результаты измерений записываются в таблицу 1.

### Обработка результатов экспериментов.

В каждом стационарном состоянии определяется средняя температура поверхности, как средняя арифметическая всех термопар

$$\bar{t}_c = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N t_{ci}, \quad (4)$$

где  $t_{ci}$  – показания  $i$ -термопары;

$N$  – число термопар.

Затем определяется средняя разность температур ( $\bar{t}_c - t_b$ ), где  $t_b$  – температура окружающего воздуха.

На основании данных таблицы 1 определяется величина коэффициента теплоотдачи для каждого режима

$$a = \frac{Q}{(\bar{t}_c - t_b) \cdot F} = \frac{Y \cdot U}{(\bar{t}_c - t_b) \cdot pdh}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (5)$$

После этого производится вычисление для каждого режима безразмерных комплексов

$$Nu = \frac{a \cdot h}{l}; \quad Gr = \frac{g \cdot b \cdot (\bar{t}_c - t_b) \cdot h^3}{n^2} \quad (6)$$

При расчете используются следующие числовые значения:  $h = 1,13\text{ м}$ ;  $d=0,06\text{ м}$ ;  $g = 9,8 \text{ м}/\text{с}^2$ ; физические свойства воздуха при температуре окружающего воздуха  $t_b=20^\circ\text{С}$ , имеют следующие значения

$$b = \frac{1}{273 + 20} = \frac{1}{293}, 1/\text{К}; \quad \lambda = 0,026 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \quad \nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}; \quad Pr = 0,703.$$

Затем определяются десятичные логарифмы комплексов  $\lg(Nu)$ ;  $\lg(Gr \cdot Pr)$ .

Полученные величины заносятся в таблицу 2 и откладываются в логарифмических координатах  $\lg(Nu) \div \lg(Gr \cdot Pr)$ . Через построенные точки проводится прямая. Уравнение этой прямой имеет вид

$$\lg(Nu) \cdot \lg C + \lg(Gr \cdot Pr). \quad (7)$$

Используя полученную прямую, определяют коэффициенты «С» и «n» в критериальной зависимости

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (8)$$

которая описывает теплообмен в исследуемом процессе. Для этого на построенной прямой выбираются две вспомогательных точки I и II, желательно дальше друг от друга, и считываются значения их координат

$$\lg(Nu)_I, \lg(Nu)_{II}, \lg(Gr \cdot Pr)_I, \lg(Gr \cdot Pr)_{II}.$$

Искомые параметры n, C рассчитываются из следующих выражений

$$n = \frac{\lg(Nu)_I - \lg(Nu)_{II}}{\lg(Gr \cdot Pr)_I - \lg(Gr \cdot Pr)_{II}}, \quad (9)$$

$$C = \frac{Nu_I}{(Gr \cdot Pr)_I^n} = \frac{Nu_{II}}{(Gr \cdot Pr)_{II}^n}. \quad (10)$$

Таблица 1.

Результаты измерений.

№ п/п	Y, A	U, B	Показания термопар										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1													
2													
3													

Таблица 2.

Результаты вычислений.

$t_c, ^\circ\text{C}$	$t_c - t_\theta, ^\circ\text{C}$	$\alpha, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	Nu	Gr	lgNu	Gr·Pr	Lg(Gr·Pr)
1	2	3	4	5	6	7	8

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ СВОБОДНОМ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА ОКОЛО ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЫ.

### Теоретическая основа эксперимента.

Свободное движение жидкости возникает в поле силы тяжести за счет изменения плотности жидкости с температурой. Если температура поверхности выше температуры окружающей среды, то расположенные у нагретой поверхности более горячие слои жидкости за счет разности плотностей в поле силы тяжести будут подниматься вверх. Интенсивность движения возрастает с увеличением разности температур.

Наибольшее практическое значение имеет теплоотдача при свободном движении воздуха у нагретых горизонтальных труб (паропроводы, провода электропередачи и т.п.).

Характеристикой конвективного теплообмена является коэффициент теплоотдачи  $a$ , который устанавливает связь между количеством теплоты  $Q$ , передаваемым с горячей поверхности площадью  $F$  и разностью температур между ними

$$Q = a \cdot (t_c - t_g) \cdot F, \text{ Вт} \quad (1)$$

Коэффициент теплоотдачи является неизвестной величиной. Если в конкретном случае удастся определить  $a$  в зависимости от условий теплообмена

$$a = \frac{Q}{(t_c - t_g) \cdot F}, \text{ м}^2 \cdot \text{Вт/град} \quad (2)$$

а затем представить полученные значения в безразмерной критериальной форме

$$Nu_{жс} = 0,5 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25}, \quad (3)$$

то полученное выражение можно использовать для расчета теплоотдачи всех подобных процессов при свободном ламинарном движении воздуха у горизонтальной трубы.

В выражении (3) использованы следующие обозначения:

$Nu_{жс} = \frac{a \cdot d}{l}$  – безразмерный критерий теплоотдачи Нуссельта;

$Pr$  – число Прандтля воздуха;

$Gr = \frac{g \cdot b \cdot (t_c - t_g) \cdot d^3}{\nu^2}$  – критерий Грасгофа, который характеризует соотношение между подъемной силой в жидкости, возникающей вследствие разности плотностей и силой вязкости жидкости;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение силы тяжести;

$t_c$  – температура стенки трубы,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_g$  – температура воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·град);  
 $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с;  
 $d$  – наружный диаметр трубы, м;  
 $\beta$  – температурный коэффициент объемного расширения. Для идеального газа (воздух при нормальных условиях)  $\beta = 1/T_0$ , 1/град;  
 $T_0$  – абсолютная температура воздуха. Индекс «в» обозначает, что в качестве определяющей температуры для выбора физических свойств жидкости принимается температура воздуха вдали от трубы.

### Описание экспериментальной установки.

Экспериментальная установка для определения теплоотдачи при свободном движении воздуха около горизонтальных труб изображена на рис. 1. Она состоит из двух горизонтальных труб (на рис. 1 показана только одна труба) равной длины  $l=1,13$  м, расположенных вдали от окружающих предметов. Диаметр труб  $d_2=20$  мм,  $d_3=25$  мм. Внутри труб расположены трубчатые нагреватели 2, создающие равномерное тепловыделение по длине. Вся теплота, выделяемая нагревателем, теплопроводностью передается к наружной поверхности трубы и далее за счет конвективного теплообмена от нее к окружающему воздуху. Количество выделяемой теплоты регулируется с помощью лабораторного автотрансформатора и определяется по показаниям вольтметра 3 и амперметра 4. Сочетание равномерного тепловыделения и изоляции торцов труб обеспечивают постоянство температуры вдоль поверхностей. Температуры поверхностей труб измеряются с помощью термопар 5 по две на каждую трубу. Термопары через переключатель 6 подключаются поочередно к милливольтметру 7. Положения переключателя 3 и 4 относятся к термопарам 2-ой трубы, а 5 и 6 – к термопарам 3-й трубы.

### Выполнение эксперимента.

Включить регуляторы напряжения в сеть и установить значения тока и напряжения на каждой трубе, указанное преподавателем. После этого трубы подогреваются и выходят на стационарный режим. Когда температура поверхностей труб прекращает повышаться и устанавливается некоторое определенное значение температуры поверхности для каждой термопары. стационарный режим устанавливается через 20-25 минут. После наступления стационарного режима считываются показания амперметров и вольтметров для каждой трубы и заносятся в таблицу 1. Для каждой трубы определяется также средняя температура поверхности по показаниям 2-х термопар: для трубы 2 – это положения 3 и 4 на переключателе, для трубы 3 – положения 5 и 6.

Затем устанавливается новое значение параметров нагрева и аналогично производятся измерения в остальных двух режимах, указанных преподавателем.

### Обработка результатов.

На основании данных таблицы 1 определяется величина коэффициента теплоотдачи для каждой трубы во всех исследованных режимах по формуле

$$a = \frac{Q}{(\bar{t}_c - t_e) \cdot F} = \frac{Y \cdot U}{(\bar{t}_c - t_e) \cdot pdl}. \quad (4)$$

Затем производится определение в каждом режиме безразмерных комплексов

$$Nu = \frac{a \cdot d}{l}; \quad Gr = \frac{g \cdot b \cdot (\bar{t}_c - t_e) \cdot d^3}{n^2} \quad (5)$$

При расчете используются следующие числовые значения:  $l = 1,13$  м;  $d_2 = 0,02$  м;  $d_3 = 0,025$  м;  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>; физические свойства воздуха при температуре окружающего воздуха  $t_b = 20^{\circ}\text{C}$ , имеют следующие значения

$$b = \frac{1}{273 + 20} = \frac{1}{293}, 1/K; \quad \lambda = 0,026 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \quad \nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}; \quad Pr = 0,703.$$

Для каждого режима и трубы определяются десятичные логарифмы комплексов  $\lg(Nu)$ ;  $\lg(Gr \cdot Pr)$ . Полученные величины откладываются в логарифмических координатах  $\lg(Nu) \div \lg(Gr \cdot Pr)$ . Через полученные точки проводится прямая с наименьшим разбросом точек около нее. Уравнение этой прямой имеет вид

$$\lg(Nu) = \lg C + n \cdot \lg(Gr). \quad (6)$$

Используя полученную прямую, определяют коэффициенты «С» и «n» в критериальной зависимости

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (7)$$

которая описывает теплообмен в исследуемом процессе.

Для этого на построенной прямой выбираются две вспомогательных точки I и II, желательно дальше друг от друга, и считываются значения их координат

$$\lg(Nu)_I, \lg(Nu)_{II}, \lg(Gr \cdot Pr)_I, \lg(Gr \cdot Pr)_{II}.$$

Искомые параметры n, C рассчитываются из следующих выражений

$$n = \frac{\lg(Nu)_I - \lg(Nu)_{II}}{\lg(Gr \cdot Pr)_I - \lg(Gr \cdot Pr)_{II}}, \quad (8)$$

$$C = \frac{Nu_I}{(Gr \cdot Pr)_I^n} = \frac{Nu_{II}}{(Gr \cdot Pr)_{II}^n}. \quad (9)$$

Таблица 1.

$d, \text{ м}$	$Y, \text{ А}$	$U, \text{ В}$	$t_c, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$t_c - t_e, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\alpha, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$Nu$	$Gr$	$Gr \cdot Pr$	$\lg Nu$	$\lg(Nu \cdot Pr)$