

Министерство высшего и среднего специального  
образования РСФСР

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С.П.Королева

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОБМЕНА И ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Утверждено редакционно-изда-  
тельским советом института в  
качестве методических указаний  
к лабораторным работам по курсу  
"Теплопередача"

Куйбышев 1983

Практикум содержит подробное описание цикла из четырех лабораторных работ, выполняемых по курсу "Теплопередача", для студентов дневного и вечернего отделений всех факультетов КуАИ.

Описаны конструкции лабораторных установок, изложены методики проведения экспериментов и обработки их результатов по темам: "Конвективный теплообмен цилиндра при естественной и искусственной конвекции", "Определение коэффициента теплоотдачи методом регулярного режима", "Определение излучательной способности металла".

Практикум может быть полезен сотрудникам отраслевых научно-исследовательских лабораторий.

Составители: Н.Н. Г о р о д н и к о в (4), (6),  
Н.Д. К о л м ш е в (5),  
В.В. Б и р в к и  
А.П. М е р к у л о в (7)

Рецензенты: д.т.н., проф. А.В. Т е м н и к о в,  
д.т.н., проф. А.А. Ж и р н о в

## ТЕПЛОТДАЧА ЦИЛИНДРА В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

Ц е л ь р а б о т ы : изучение методики и приобретение навыков экспериментального исследования частных задач конвективного теплообмена, обработка и обобщение результатов исследования.

### З а д а н и е

1. Провести опыт по определению коэффициента теплоотдачи при различных температурных напорах.
2. Обработать результаты экспериментов и представить их в обобщенной критериальной форме.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

При свободной конвекции течение жидкости на поверхности объекта возникает исключительно под действием разности плотностей, обусловленной неравномерностью ее нагрева.

Если температура поверхности объекта выше температуры окружающей среды, то течение развивается снизу вверх. При обратном соотношении температур течение окружающей среды происходит сверху вниз.

В мировой практике этот вид теплообмена широко исследовался в самых различных вариантах с жидкостями и газами на объектах различной формы и размеров. Исследования в этом направлении продолжаются и в настоящее время.

Математическая постановка задачи о конвективном теплообмене и ее переработка на основе учения о подобии физических явлений приводит к принципиальному выводу о том, что в условиях естественной конвекции обобщенная зависимость теплоотдачи должна выражаться

функциональным соотношением

$$Nu = f(Gr; Pr), \quad (1)$$

где  $Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$  - среднее число Нуссельта на поверхности цилиндра (безразмерное выражение коэффициента теплоотдачи);

$Gr = \beta \frac{g \cdot d^3 \Delta t}{\nu^2}$  - число Грасгофа;

$Pr = \nu / \alpha$  - число Прандтля;

$\alpha, \lambda, \nu, \alpha$  - коэффициенты соответственно теплоотдачи, теплопроводности, кинематической вязкости и температуропроводности среды;

$\beta$  - коэффициент объемного расширения жидкости или газа;

$d$  - определяющий размер;

$t$   
 $\Delta t = t_w - t_f$  - температурный напор (разность температур поверхности объекта и температуры среды).

Многочисленные исследования полностью подтверждают теоретически предсказанную принципиальную зависимость (1). Вид функции устанавливается опытным путем в зависимости от геометрической формы поверхности, участвующей в конвективном теплообмене.

Для геометрически подобных тел независимо от их размеров функциональная зависимость является единой.

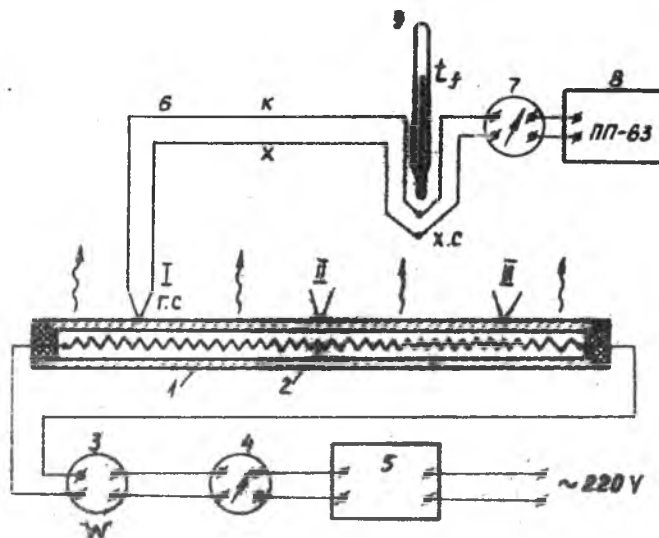
В данной лабораторной работе опыты проводятся с воздухом, для которого число  $Pr$  практически не зависит от температуры и давления ( $Pr = 0,7 = const$ ). Поэтому не представляется возможным установить влияние  $Pr$  на теплоотдачу. В этом случае основная зависимость (1) упрощается:

$$Nu = f(Gr). \quad (2)$$

Следует иметь в виду, что последняя зависимость (2), конкретно определяемая по результатам опытов, в дальнейшем может использоваться в расчетах теплоотдачи только для сред, имеющих то же значение числа  $Pr$  ( $H_2, N_2, O_2, CO$ ).

## ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Принципиальная схема установки представлена на рис. Экспериментальный цилиндр I изготовлен из алюминиевого сплава ( $d = 42 \text{ мм}$ ;  $l = 684 \text{ мм}$ ), внешняя поверхность которого никелирована и отполирована, чтобы по возможности уменьшить рассеяние тепла лучеиспусканием. Равномерное распределение температур по длине цилиндра обеспечивается за счет высокой теплопроводности металлической стенки.



Р и с . Схема установки для исследования теплоудачи цилиндра в условиях естественной конвекции

Внутри цилиндра размещен электронагреватель 2 с максимальной потребляемой мощностью 200 Вт. Торцы цилиндра закрыты термостойкими теплоизоляционными материалами. На поверхности цилиндра прикреплены элементами три дифференциальных хромель-копелевых термопары 6 (I, II, III). Холодные спая термопар находится в воздухе, температура которого регистрируется ртутным термометром 9.

Выводы термопар присоединены к потенциометру ПП-63 через переключатель термопар.

Замер температуры дифференциальными термопарами удобен тем, что одним измерением сразу определяется температурный напор  $-\Delta t$ , являющийся основным параметром при обработке опытных данных. Кроме того, повышается точность измерений.

Электропитание нагревателя осуществляется от сети переменного тока ( $\sim 220\text{ V}$ ) через стабилизатор напряжения 5 и лабораторный автотрансформатор 4.

Для регистрации мощности, потребляемой электронагревателем, в цепь включен ваттметр 3.

### ПРОВЕДЕНИЕ ОПЫТОВ

После ознакомления со схемой опытной установки необходимо проверить правильность включения измерительных приборов и затем приступить к проведению опытов.

Стабилизатор напряжения включить в сеть при нулевом положении рукоятки ЛАТР-I. Затем, повышая трансформатором напряжение, довести мощность до 200 Вт.

В ходе вывода установки на режим следует систематически контролировать температуру по одной из термопар.

Как только температура стенки трубы станет равной  $\sim 175^{\circ}\text{C}$  (показание потенциометра  $\approx 11\text{ mV}$ ), необходимо понизить потребляемую мощность, не допуская дальнейшего повышения температуры стенок.

В этом состоянии выдержать установку до полной стабилизации температуры поверхности трубы, проверяя ее несколькими контрольными замерами, выполняемыми с интервалами  $\sim 3$  мин. С этого момента начинается экспериментальная часть работы.

Опыты проводятся на 6-8 температурных режимах нагревателя. В каждом последующем режиме необходимо снижать потребляемую мощность нагревателя так, чтобы температура поверхности цилиндра снижалась по сравнению с предыдущим опытом на  $\sim 15^{\circ}\text{C}$ . На каждом этапе предварительно необходимо добиваться стабилизации теплового режима установки.

На каждом этапе регистрируются и заносятся в протокол:

1. Показания ваттметра  $W, Bm$ .
2. Показания потенциометра по трем термопарам  $-E_1, E_2, E_3, mV$ .
3. Показания термометра  $-t_f, ^\circ C$ .

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Для каждого температурного режима установки определяются:

1. По показаниям термопар I, II, III значения  $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, ^\circ C$ .
2. Средний температурный напор

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3}{3}, ^\circ C$$

3. Суммарный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{W}{F \cdot \Delta t_{cp}}, \frac{Bm}{M^2 K}, \quad (3)$$

где  $F$  - боковая поверхность цилиндра,  $m^2$ ;  
 $W$  - мощность, потребляемая нагревателем, Вт.

4. Радиационный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_R$ :

$$\alpha_R = \varepsilon_1 \cdot C_0 \cdot \frac{\left(\frac{T_{cp}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_f}{100}\right)^4}{\Delta t_{cp}}, \frac{Bm}{M^2 K}$$

где  $\varepsilon_1 = 0,078$  - собственная степень черноты поверхности трубы;

$C_0 = 5,67$  - коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$T_f, T_{cp}$  - температура окружающего воздуха и поверхности, К.

$$T_f = t_f + 273, K; T_{cp} = \Delta t_{cp} + T_f, K.$$

$\Delta t_{cp} = 4,273$

5. Конвективный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \alpha_{\Sigma} - \alpha_R, Bm/M^2 K.$$

6. Число Нуссельта

$$Nu_f = \frac{\alpha d}{\lambda_f},$$

где  $d$  - диаметр цилиндра, (определяющий размер), м;

$\lambda_f$  - коэффициент теплопроводности воздуха при температуре  $t_f$ , Вт/мК.

$$Nu_f = 2,59 \cdot 10^{-6} \frac{Bm}{M \cdot K}$$

## 7. Число Грасгофа

$$Gr_f = \beta_f \frac{g d^3 \Delta t_{cp}}{\nu_f^2},$$

где  $\beta_f = \frac{1}{T_f}$  - коэффициент объемного расширения воздуха, 1/К;  
 $\nu_f$  - коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с.

Значения  $\nu_f$  приведены при давлениях В=760 мм рт.ст. Пересчет на барометрическое давление во время опытов В в мм рт.ст. делается по соотношению

$$\nu_B = \nu_{760} \frac{760}{B},$$

$g = 9,81$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

8. Определение зависимости  $Nu_f = f(Gr_f)$ , имеющую степенной характер

$$Nu_f = C Gr_f^n \quad (4)$$

производим следующим образом:

значения  $Nu_f$  и  $Gr_f$ , полученные из опыта, откладываются на графике в логарифмических координатах  $\lg Nu_f - \lg Gr_f$ .

Для построения графика могут быть рекомендованы масштабы:

$$1 \text{ ед. } \lg Nu_f = 1000 \text{ мм, } 1 \text{ ед. } \lg Gr_f = 500 \text{ мм.}$$

Через точки на графике проводится осредняющая прямая линия.

Величина показателя степени  $n$  - уравнения (4) определяется как тангенс угла наклона  $\varphi$  этой прямой к оси ординат:

$$n = \operatorname{tg} \varphi = \frac{\lg Nu_B - \lg Nu_A}{\lg Gr_B - \lg Gr_A},$$

где А и В - любые две точки, лежащие на осредняющей прямой. Величина множителя С определяется по соотношению

$$C = \frac{Nu_f}{Gr_f^n},$$

где  $Nu_f$  и  $Gr_f$  берутся для точки, лежащей между значениями А и В на осредняющей прямой.

Отчет о выполненной работе должен содержать принципиальную схему установки, протокол записи измерений, обработку результатов опыта.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ

1. Что такое конвективный теплообмен?
2. Что такое закон Ньютона-Рихмана?
3. Что такое коэффициент теплоотдачи?
4. Является ли коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{\Sigma}$  одинаковым для каждого элемента внешней поверхности?
5. Подвижна или неподвижна окружающая среда (воздух) около поверхности цилиндра?
6. Как будет изменяться средняя скорость воздуха около поверхности цилиндра с увеличением  $\Delta t_{cp}$  и почему?
7. Через торцы цилиндра частично рассеивается тепло, вводимое во внутреннее пространство. Как это сказывается на точности определения  $\alpha_{\Sigma}$  ( в какую сторону )?
8. Как будет развиваться процесс естественной конвекции на поверхности нагретой аппаратуры, помещенной внутри спутников Земли?

ПРОТОКОЛ ОПЫТА

$V_0 =$  \_\_\_\_\_ мм рт.ст.

Дата исполнения \_\_\_\_\_

Номер опыта	Измеряемые параметры										Вычисляемые величины											
	W	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	t <sub>f</sub>	$\Delta t_1$	$\Delta t_2$	$\Delta t_3$	$\Delta t_{ср}$	$\alpha_{\Sigma}$	$\alpha_A$	$\alpha$	T <sub>ср</sub>	T <sub>f</sub>	N <sub>л1</sub>	G <sub>ч1</sub>	G <sub>ч2</sub>	E <sub>г1</sub>	E <sub>г2</sub>			
	Вт	мВ	мВ	мВ	°С	°С				Вт/м <sup>2</sup> °С								К				
0	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17					
I																						
2																						
3																						
4																						

Студент \_\_\_\_\_

Преподаватель \_\_\_\_\_

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ЦИЛИНДРА  
ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ ВОЗДУХОМ

Ц е л ь р а б о т ы : изучение методики и приобретение навыков экспериментального исследования частных задач конвективного теплообмена; обработка и обобщение результатов исследования.

З а д а н и е

1. Провести опыты по определению коэффициента теплоотдачи при различной скорости обдува (десять-двенадцать режимов).
2. Обработать результаты экспериментального исследования и представить их в обобщенной критериальной форме. Результаты сравнить с данными, приведенными в литературных источниках по теплоотдаче единичных цилиндров.
3. Составить отчет о выполненной работе.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Теплоотдача единичных цилиндров в условиях поперечного их обтекания давно привлекает внимание исследователей.

Большинство экспериментов выполнено в воздушных потоках. Как показали результаты экспериментов, общее количество факторов, влияющих на теплоотдачу, значительно. На основе теории подобия все они могут быть сгруппированы в отдельные безразмерные комплексы, именуемые критериями подобия. Число критериев меньше числа исходных размерных физических параметров, поэтому исследование упрощается (внимание концентрируется на меньшем количестве переменных величин).

В условиях газовых потоков обобщенная зависимость теплоотдачи в общем случае может быть определена в безразмерной форме как следующая функциональная связь:

$$Nu = f(Re, Pr), \quad (I)$$

- где
- $Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$  — число Нуссельта;
  - $Re = \frac{w \cdot d}{\nu}$  — число Рейнольдса;
  - $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$  — число Прандтля;
  - $\alpha$  — осредненное по поверхности цилиндров значение коэффициента теплоотдачи;
  - $d$  — диаметр цилиндра;
  - $w$  — скорость набегающего потока;
  - $\lambda, \nu, \alpha$  — соответственно коэффициенты теплопроводности, кинематической вязкости и температуропроводности текучей среды.

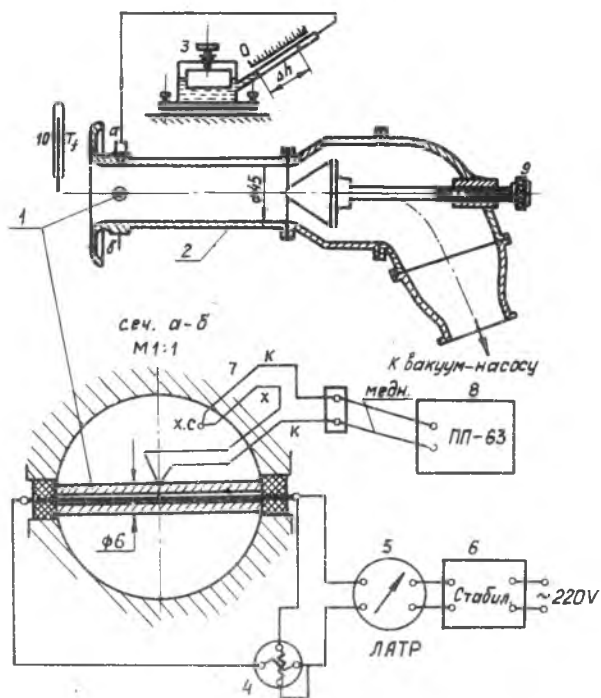
Число  $Pr$  для индивидуальных газов незначительно зависит от температуры и давления. Для определения влияния  $Pr$  на теплоотдачу необходимо провести эксперименты в потоках различных газов и паров. Если  $Pr = const$ , то его влияние на теплоотдачу установить сложно. В этом случае зависимость (I) упрощается:

$$Nu = f(Re). \quad (2)$$

Лабораторная установка (рис. ) спроектирована применительно к этому случаю.

#### ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка представляет собой цилиндр, изготовленный из красной меди ( $d = 6 \text{ мм}$ ,  $l = 45 \text{ мм}$ ). Его наружная поверхность никелиро-



Р и с . Конструктивная схема установки для исследования теплоотдачи цилиндра при поперечном обтекании воздухом

вана и полирована. За счет высокой теплопроводности меди обеспечивается равномерное распределение температур по всей длине цилиндра. По его оси заложен графитовый стержень ( $d = 1,8 \text{ мм}$ ), изолированный от массы цилиндра тонкой прослойкой из огнеупорной глины ( $\delta = 0,2 \text{ мм}$ ). Цилиндр выполняет роль электрического нагревателя. Подвод электрического тока осуществляется через тонкостенные медные колпачки, туго посаженные на концы графитового стержня. Полная длина нагревателя равна длине медного цилиндра. Цилиндр установлен на входе маленькой аэродинамической трубы ( $\varnothing = 45 \text{ мм}$ ), вход выполнен плавным закруглением ( $R = 20 \text{ мм}$ ). Воздух из атмосферы просасывается через трубу с помощью вакуум-насоса. С достаточной точностью можно считать, что поток, набегавший на цилиндр в месте его установки, не имеет дополнительной турбулентности.

Для определения температурного напора  $\Delta t = t_c - t_{\infty}$  используется хромель-копелевая (ХК) термопара из проволок ( $d = 0,23 \text{ мм}$ ). Горячий спай термопары заделан в стенку медного цилиндра на середине его длины. Изолированные провода термопары проложены в канавке сечением  $1 \times 1 \text{ мм}$  по образующей цилиндра и залиты эпоксидной смолой. Заливка зачищена заподлицо с поверхностью цилиндра. Холодный спай термопары введен в воздушный поток.

Нагреватель питается током со стабилизированным напряжением через ЛАТР-1.

Электрическая мощность регистрируется точным ваттметром (кл. 0,2). Скорость набегавшего на цилиндр потока определяется по замерам статического давления в потоке в плоскости установки цилиндра. Измерение давления производится через два диаметрально противоположных отверстия ( $d = 0,8 \text{ мм}$ ) в стенке трубы.

В качестве измерительного прибора используется микроманометр ЦАГИ с наклоном измерительной трубы, соответствующим коэффициенту прибора  $K = 0,3$ .

Скорость потока в узком сечении определяется по соотношению

$$\bar{w} = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot \Delta p}{\rho (1 + \xi)}}, \text{ м/с}, \quad (3)$$

где  $\Delta p = \kappa \cdot \Delta h$  — перепад давления, мм вод.ст.;

$\Delta h$  — показание микроманометра, мм;

$\rho$  — плотность воздуха, определяемая по состоянию атмосферы с помощью уравнения состояния,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\xi = 0,03$  - коэффициент сопротивления;

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2.$$

Расчет теплоотдачи принято относить к скорости набегающего на цилиндр потока. Ее значение

$$w = 0,803 \bar{w}.$$

Здесь 0,803 - отношение площади загроможденного сечения к полной площади трубы.

Опытная установка обладает особенностью, требующей специального рассмотрения. При проведении экспериментов в аэродинамических трубах необходимо соблюдать основное правило - степень загромождения потока моделью должна составлять 1-3%, в худшем случае - не более 5% (во избежание стеночного влияния). В данном случае это правило нарушено из-за миниатюризации установки. Степень загромождения потока экспериментальным цилиндром составляет 19,7%. В результате скорость потока вдоль трубы в районе модели переменна (нарастает в передней и падает в задней части цилиндра). Это обстоятельство сказывается на формировании пограничного гидродинамического слоя на поверхности цилиндра (особенно в лобовой части) и в конечном счете влияет на теплоотдачу. Поэтому результаты проведенного исследования являются частным случаем по сравнению с литературными данными, которые следовало бы более точно характеризовать как теплоотдачу цилиндра в безграничном потоке. Основная закономерность теплоотдачи в данном случае выдерживается. Отмеченное различие только количественного порядка.

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

После ознакомления со схемой опытной установки необходимо проверить правильность включения измерительных приборов и затем приступить к проведению опытов. Включить вакуум-насос. С помощью дросселя  $\theta$  скорость потока отрегулировать таким образом, чтобы показание микроманометра 3 составило  $\Delta h = 20$  мм. Затем на нагреватель подать электрическую мощность.

Вся серия опытов проводится при условии  $\Delta t \approx const$ , соблюдение которого возможно, если скорость потока и электрическая мощность

нагревателя согласованы. Такое согласование достигается предварительными опытами. При установке трубки микроманометра с наклоном, соответствующим  $K=0,3$ , необходимо руководствоваться следующими данными:

$\frac{\Delta h}{mm}$	: 20	: 30	: 40	: 50	: 60	: 80	: 100	: 120	: 140	: 160	: 180	: 200
$\frac{W}{Bm}$	: 13	: 15	: 16	: 16	: 17	: 19	: 20	: 21	: 22	: 24	: 24	: 25

На этих же режимах и при возрастающей скорости обдува проводятся все исследования.

При переходе на очередной режим в первую очередь необходимо увеличить скорость обдува, а затем — электрическую мощность нагревателя. В каждом режиме замеры производятся после наступления тепловой стабилизации. Установка обладает малой тепловой инерционностью, поэтому переход на очередной режим осуществляется достаточно быстро (5–6 мин).

Измеряемые величины:

$\Delta h$  — показания микроманометра, мм;

$W$  — показания ваттметра, Вт;

$E$  — ЭДС дифференциальной термопары, измеряющей разность температур цилиндра и воздуха;

$t_{ж}$  — температура воздуха на входе в аэродинамическую трубу, °С;

$B$  — барометрическое давление, мм рт.ст.

#### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Скорость потока определяется по соотношениям (2), (3).

Температурный напор  $\Delta t$  определяется с помощью градуировочных таблиц ХК по величине  $E$ .

Коэффициент теплоотдачи рассчитывается по соотношению

$$\alpha = \frac{W}{F \cdot \Delta t}, \quad \frac{Bm}{m^2 \text{ град}}$$

где  $W$  — показания ваттметра, Вт;

$\Delta t$  — температурный напор, °С;



$F = 8,47 \cdot 10^{-4}$  - боковая поверхность цилиндра, м<sup>2</sup>

Числа  $Nu_{ж}$  и  $Re_{ж}$  определяются по соотношениям

$$Nu_{ж} = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda_{ж}}; \quad Re_{ж} = \frac{w \cdot d}{\nu_{ж}}$$

где  $\lambda_{ж}$ ,  $\frac{Вт}{м \cdot град}$  - соответственно коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости воздуха при средней температуре  $t_{ж}$  за время опытов.

Значения  $\nu_{ж}$  приведены при давлениях  $B = 760$  мм рт.ст. Пересчет на барометрическое давление во время опытов делается по соотношению

$$\nu_B = \nu_{760} \cdot \frac{760}{B}$$

где  $B$  - барометрическое давление, мм рт.ст.

Значения  $Nu_{ж}$  и  $Re_{ж}$  наносятся на графики в логарифмических координатах  $\ln Nu_{ж}$  -  $\ln Re_{ж}$  и осредняются линейной зависимостью. Критериальное соотношение  $Nu_{ж} = f(Re_{ж})$  отыскивается в форме степенной зависимости

$$Nu_{ж} = C \cdot Re_{ж}^n$$

где  $n$  определяется как тангенс угла наклона осредняющей прямой в логарифмических координатах:

$$n = \frac{\ln Nu_{ж2} - \ln Nu_{ж1}}{\ln Re_{ж2} - \ln Re_{ж1}}$$

Индексы 2 и 1 относятся к любым двум точкам, находящимся на осредняющей прямой.

Постоянная  $C$  определяется по соотношению  $C = \frac{Nu_{ж}}{Re_{ж}^n}$ , где значения  $Nu_{ж}$  и  $Re_{ж}$  берутся для точки, находящейся на осредняющей прямой.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Принципиальная схема установки.
2. Протокол записи показаний измерительных приборов.
3. Результаты обработки.
4. График зависимости  $\ln Nu_{ж} = f(\ln Re_{ж})$ .

5. Сопоставление результатов опыта с литературными данными.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ

1. Что называется процессом теплоотдачи?
2. Что называется коэффициентом теплоотдачи?
3. Какова общая форма функциональной связи между числами подобия конвективного теплообмена?
4. Расшифруйте содержание чисел:  $Nu$ ,  $Re$ ,  $P_r$ .
5. Почему в настоящей работе число  $P_r$  исключается из числа определяющих параметров?
6. Объясните принципиальную схему лабораторной установки.
7. Чем измеряется температурный напор между поверхностью цилиндра и омывающим ее потоком воздуха?
8. Как определяется скорость набегающего на цилиндр потока воздуха?
9. Какова особенность данного исследования по сравнению с исследованием теплоотдачи цилиндра в безграничном потоке?

# ПРОТОКОЛ ОПЫТА

$B =$  \_\_\_\_\_ мм рт.ст.

Дата испытания \_\_\_\_\_

Номер опыта	Замеряемые параметры				Вычисляемые величины					
	$\Delta h$ мм	$W$ Вт	$E$ мВ	$t$ $^{\circ}C$	$\bar{W}$ м/с	$W$ м/с	$\Delta t$ $^{\circ}C$	$\alpha$ $\frac{Вт}{м^2 \text{ град}}$	$R_{\text{жс}}$	$N_{\text{жс}}$
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										
2										
3										
4										

1.  $t_{\text{жс}} = \dots ^{\circ}C$

2.  $\nu_{\text{жс}} = \dots \text{ м}^2/\text{с}$

3.  $\lambda_{\text{жс}} = \dots \text{ Вт/м град}$

4.  $\nu_{\text{в}} = \dots \text{ м}^2/\text{с}$

Студент \_\_\_\_\_

Преподаватель \_\_\_\_\_

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ ОТ  
ШАРА К ВОЗДУХУ МЕТОДОМ РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМА**

**Ц е л ь р а б о т ы :** теоретическое и экспериментальное ознакомление с нестационарными методами определения коэффициента теплоотдачи.

**З а д а н и е**

1. Найти значение коэффициента теплоотдачи от шара к воздуху в условиях искусственной конвекции.
2. Составить отчет по результатам работы.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТА**

Методы экспериментального определения конвективного коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  принципиально делятся на две основные группы: стационарные и нестационарные.

Нестационарные методы, как правило, всегда проще по своему техническому оформлению и менее трудоемки, чем стационарные. К особым достоинствам нестационарных методов следует отнести возможность их использования для изучения конвективного теплообмена таких объектов, где применение стационарных методов физически невозможно. Например, теплоотдача к поверхностям вращающихся лопаток и дисков газовых турбин, теплоотдача внутри действующих атомных реакторов, теплоотдача на поверхности ракет в полетных условиях и др.

Нестационарные методы исследования теплоотдачи, а также методы определения тепловых свойств материалов глубоко развиты в трудах

выдающегося советского теплофизика проф. Г.М.Кондратьева и его учеников. В Советском Союзе эти методы широко распространены и именуются как "методы теплового регулярного режима".

В данной лабораторной работе используется наиболее простой случай, связанный с применением регулярного режима. Излагаемая ниже теория вполне очевидна и достаточно элементарна. Задачей лабораторной работы является экспериментальное определение конвективного коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от шара к воздуху в условиях искусственной конвекции. В качестве приема для определения осредненного по поверхности шара коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  используется закономерность, вытекающая из рассмотрения процесса нестационарного охлаждения нагретого шара.

### Условные обозначения

А . Ш а р :

$M$  - масса шара, кг;

$C$  - теплоемкость материала, Дж/кг К;

$F$  - поверхность, м<sup>2</sup>;

$Q_f, Q_R$  - тепло, отдаваемое шаром окружающей среде конвекцией и лучеиспусканием, Дж;

$\alpha, \alpha_R, \alpha_\Sigma$  - конвективный, радиационный и суммарный коэффициенты теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup> К;

$\varepsilon_f$  - степень черноты поверхности;

$t$  - мгновенное текущее значение температуры в процессе остывания, °С;

$i$  - удельная энтальпия материала, Дж/кг;

Б. Окружающая среда.

$t_f$  - температура воздуха вдали от нагретой поверхности  
(  $t_f = const$  ), °С;

$\tau$  - время, с.

К телу, остывающему в изобарных условиях, применимо аналитическое выражение первого начала термодинамики, в форме которой устанавливается связь между теплотой и энтальпией:

$$dQ = -M \cdot di. \quad (1)$$

Выражение (1) строго справедливо для равновесных и неравновесных процессов. Величина  $dQ$  в левой части выражается суммой:

$$dQ = dQ_f + dQ_R \quad (2)$$

Сравнивая выражения (1) и (2), получаем исходное дифференциальное уравнение для решения поставленной задачи:

$$-M \cdot di = dQ_f + dQ_R. \quad (3)$$

Раскрываем выражение (3), используя для определения  $Q_f$  и  $Q_R$  известные закономерности и относя рассуждения к бесконечно малому промежутку времени  $d\tau$ :

$$-M c dT = \alpha \cdot F (T - T_f) d\tau + \varepsilon_r C_o \cdot F \left[ \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 \right] d\tau$$

(знак "минус" в левой части потому, что при остывании тела его температура снижается).

Полученное выражение перепишем в форме

$$\frac{dT}{T - T_f} = - \frac{F}{M c} \left[ \alpha + \varepsilon_r C_o \cdot \frac{\left( \frac{T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_f}{100} \right)^4}{T - T_f} \right] \cdot d\tau \quad (4)$$

Второй член в скобках имеет размерность  $\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$  и именуется радиационным коэффициентом теплоотдачи  $\alpha_r$ .

Введем новые обозначения:

$\alpha_\Sigma = \alpha + \alpha_r$  - суммарный коэффициент теплоотдачи;

$\vartheta = T - T_f$  - текущая избыточная температура шара, отсчитанная от температуры окружающей среды.

Из условия  $T_f = \text{const}$  следует  $d\vartheta = dT$ .

С учетом дополнительных обозначений получим конечную форму дифференциального уравнения нестационарного теплообмена:

$$\frac{d\vartheta}{\vartheta} = - \frac{F \cdot \alpha_\Sigma}{M \cdot c} \cdot d\tau. \quad (5)$$

Сделаем допущение, что  $\alpha_\Sigma = \text{const}$  (это еще необходимо специально обосновать) и введя обозначение

$$m = \frac{F \cdot \alpha_z}{M \cdot c} \cdot \frac{1}{c}, \quad (6)$$

проинтегрируем уравнение (5):

$$\ln \vartheta = -m\tau + \text{Const}. \quad (7)$$

Уравнение (7) является отправным пунктом во всей теории регулярного режима. Из уравнения (7) следует, что логарифм натуральный избыточной температуры  $\vartheta$  является линейной функцией времени  $\tau$ . При выводе уравнения (7) без специальных оговорок сделаны допущения:

А. Шар остывает как одно целое (температура во всех точках шара имеет одно и то же значение), т.е. температурное поле по объему равномерно.

Параметром, определяющим неравномерность температурного поля, является число Био ( $Bi$ ):

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}.$$

Если  $Bi = 0$ , то в объеме тела имеется строго равномерное распределение температур по объему.

$Bi = \infty$  — предельная степень неравномерности температурного поля.

В данной установке порядок величины  $Bi$  для шара составляет  $Bi \approx 0,003$ . Специальным расчетом можно показать, что в этом случае разность температуры центра и поверхности в условиях опыта не превышает  $0,1^\circ\text{C}$ , что находится за пределами точности данных измерений. Таким образом, принятое допущение вполне оправдано.

Б.  $\alpha_z = \text{const}$

Величина  $\alpha_R$ , входящая в состав  $\alpha_z$ , зависит как от температурного напора, так и от абсолютных значений температур  $T$  и  $T_f$ . Однако эта зависимость слабая. Опыт проводится в диапазоне  $t$  от  $\sim 150^\circ\text{C}$  до  $\sim 80^\circ\text{C}$ . Изменение  $\vartheta$  составляет  $\sim 70^\circ\text{C}$ .

Поверхность шара никелирована и обладает слабой излучательной способностью ( $\epsilon, \approx 0,075$ ). Благодаря этой специальной мере, среднее абсолютное значение  $\alpha_R$  по сравнению с  $\alpha_z$  составляет величину порядка  $\sim 3\%$ . Изменение  $\alpha_R$  за время опыта составляет  $\sim 10\%$ .

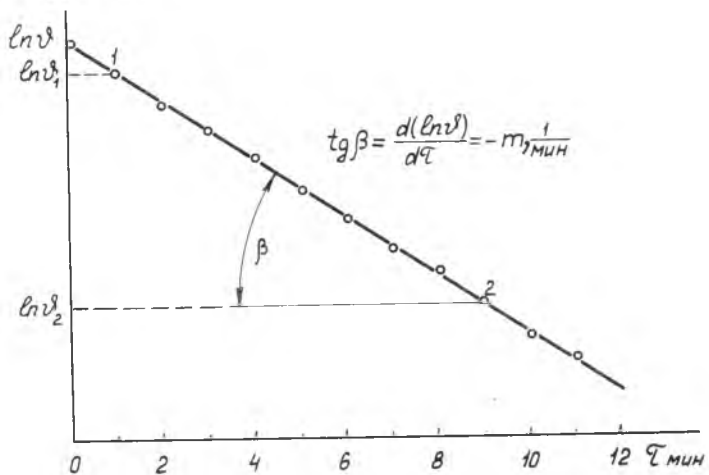
Поскольку  $\alpha_R$  входит слагаемым в состав  $\alpha_z$ , то полное изменение  $\alpha_z$  во время опыта не превышает  $\sim 0,3\%$ .

Строго говоря, для оценки возможности интегрирования уравнения (5) важно постоянство всего комплекса  $m$  (6). Кроме рассмотренного влияния  $\alpha_R$  на величину  $m$ , следует иметь ввиду, что величина  $C$ ,

входящая в состав знаменателя, при остывании шара в указанном диапазоне температур также изменяется на  $\sim 0,5\%$ . При остывании  $\alpha_R$  и  $c$  убывают. Поскольку эти величины входят в состав  $m$  в виде отношения, то их совместное влияние на  $m$  меньше, чем отдельное влияние  $\alpha_R$ , и, таким образом, изменение  $m$  фактически составит величину  $\sim 0,1\%$ .

Из уравнения (7) следует, что если в процессе остывания шара регистрировать величину  $v^{\circ}$  и время  $\tau$ , то в координатах  $\ln v^{\circ} \div \tau$  должен получиться падающий линейный график с тангенсом угла наклона

$$\operatorname{tg} \beta = -m \quad (\text{рис. I}).$$



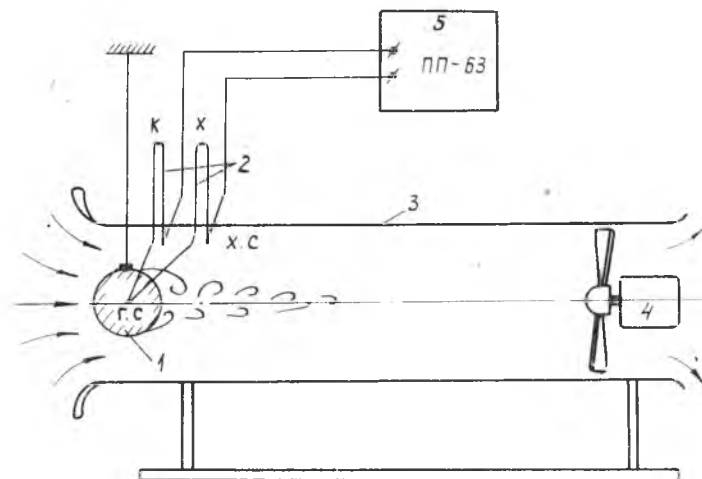
Р и с . I . График охлаждения нагретого шара в полулогарифмических координатах при постоянном значении среднего коэффициента теплоотдачи на поверхности

В теории регулярного режима величина  $m$  именуется "темп охлаждения". Любые исследования, связанные с применением регулярного режима, всегда сводятся к определению  $m$ . В данном случае по величине  $m$  из соотношения (6) определяется  $\alpha_{\Sigma}$ , а затем  $\alpha$ . Физический смысл "темп охлаждения" состоит в том, что  $m$  определяет не скорость изменения самой избыточной температуры ( $\frac{dv^{\circ}}{d\tau}$ ,  $\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{с}}$ ), а скорость изменения логарифма избыточной температуры во времени. В стадии регулярного режима эта скорость  $m = \frac{d[\ln v^{\circ}]}{d\tau} \cdot \frac{1}{c} = \text{const.}$



## ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема установки изображена на рис.2. Шар (альфакалориметр) I выполнен из красной меди, никелирован, полирован, подвешен на вертикальной подвижной державке.



Р и с . 2 . Схема установки для определения коэффициента теплоотдачи от шара к воздуху методом регулярного режима: I - шар "альфакалориметр"; 2 - дифференциальная термопара ХК; 3 - аэродинамическая труба; 4 - вентилятор; 5 - потенциометр.

Характеристика шара:

$d = 70,14$  мм (определено как среднее значение в результате микрометрического обмера);

$M = 1,610$  кг (определено взвешиванием на лабораторных весах после сверления);

$C = 397 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$  - средняя изобарная теплоемкость меди в интервале температур  $t \approx 150-70^\circ\text{C}$ ;

$F = \pi d^2 = 0,01545$  - поверхность шара,  $\text{м}^2$ .

Для измерения текущей разности температур  $\vartheta^g = t - t_a$  используется хромель-копелевая (ХК) дифференциальная термопара 2 из проволок

$d = 0,5$  мм. Горячий спай через сверление  $d = 3$  мм введен до центра шара. Для улучшения теплового контакта сверление на высоту  $\sim 6$  мм залито сплавом Вуда. Холодный спай помещен в воздушный поток. Замер ЭДС термопары производится потенциометром ПП-63.

До начала эксперимента поверхность шара протирается спиртом для удаления пыли и жировых загрязнений. Затем прогревается на специальной электрической плитке до температуры  $\sim 150^{\circ}\text{C}$ . Нагретый шар вводится в устье аэродинамической трубы 3, затем включается вентилятор 4.

Эксперимент начинается первым отсчетом показания потенциометра 5, одновременно в ход пускается секундомер. Дальнейшие измерения производятся через одну минуту в течение 10-12 мин.

#### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

С помощью таблиц ХК расшифровываются значения избыточной температуры  $v^{\circ}\text{C}$ .

По таблицам натуральных логарифмов определяются значения  $\ln v^{\circ}$  с точностью до третьего знака после запятой. На миллиметровой бумаге строится график  $\ln v^{\circ} = f(\tau)$  в следующем масштабе: одна логарифмическая единица равна 500 мм, одна минута - 10...15 мм.

Через точки графика проводится осредняющая прямая. По ее наклону определяется темп охлаждения:

$$m = \frac{\ln v_1^{\circ} - \ln v_2^{\circ}}{\tau_2 - \tau_1} \cdot \frac{1}{\text{мин}}$$

Индексы 1 и 2 относятся к любым двум точкам, находящимся на осредняющей прямой (см. рис.1). Суммарный коэффициент теплоотдачи определяется из уравнения (7).

$$\alpha_z = \frac{M}{F} \cdot C \frac{m}{60}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}} \quad (8)$$

где  $\frac{M}{F} = 104,15 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}$  - константа калориметра;  
 $C = 397 \text{ Дж/кг К}$

$m$  - темп охлаждения из построенного графика.

С учетом постоянных коэффициентов

$$\alpha_z = 689 \cdot m, \frac{Bm}{M^2K} \quad (9)$$

Среднее значение радиационного коэффициента теплоотдачи определяется по среднему значению температуры  $T$  за время опыта. В качестве

$T_f$  принимается значение температуры помещения:

$$\alpha_R = \varepsilon_1 C_0 \frac{\left(\frac{T}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_f}{100}\right)^4}{T - T_f}, \frac{Bm}{M^2K} \quad (10)$$

где  $\varepsilon_1 \cdot C_0 = 0,418$  — коэффициент лучеиспускания поверхности шара.

Конвективный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \alpha_z - \alpha_R + \frac{B\tau}{M^2K} \quad (11)$$

При аккуратном ведении опыта погрешность определения  $\alpha$  не превышает  $\pm 3\%$ .

Отчет о выполненной работе должен содержать принципиальную схему установки, протокол записи измерений, обработку результатов опыта.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ

1. Что такое конвективный теплообмен?
2. Что такое закон Ньютона-Рихмана?
3. Каков физический смысл коэффициента теплоотдачи?
4. Физический смысл темпа охлаждения.
5. Что такое тепловой регулярный режим?
6. Какой вид будет иметь график охлаждения  $\ln v^8 - \tau$ , если коэффициент теплоотдачи в процессе остывания будет изменяться (возрастать, падать)?

ПРОТОКОЛ ОПЫТА

$B =$  \_\_\_\_\_ мм рт.ст.

Дата испытания \_\_\_\_\_

№№№ шт.	$\tau$ мин	$E$ mV	$\Delta$ $^{\circ}C$	$ln V$	$m$ 1/мин	$\alpha_s$	$\alpha_R$	$\alpha$
				Вт/м <sup>2</sup> К				
I								
2								
3								
4								

Студент \_\_\_\_\_

Преподаватель \_\_\_\_\_

## ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ОКИСЛЕННОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Ц е л ь р а б о т ы : определение калориметрическим методом зависимости интегральной излучательной способности металлической поверхности как функции температуры.

### З а д а н и е

1. Определить количество тепла, излучаемое вольфрамовой нитью в интервале температур 600-1300К.
2. На основании полученных результатов определить собственную излучательную способность вольфрамовой проволоки и ее степень черноты.
3. Результаты экспериментов отразить графически и аппроксимировать аналитической зависимостью.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Излучение энергии, происходящее из поверхностного слоя твердого тела в окружающую среду, называется излучением твердого тела.

Тепловое излучение является процессом рассеивания внутренней энергии излучающего тела электромагнитными волнами. Оно является результатом внутриатомных процессов, которые зависят от температуры тела. Возбудителем волн являются заряженные материальные частицы (электроны, ионы). При поглощении каким-либо другим телом электромагнитное излучение, взаимодействуя с атомной структурой, вызывает изменение внутренней энергии этого тела. Все виды электромагнитного излучения имеют одинаковую природу и различаются лишь по длине волны.

Виды излучения	Длина волны, мм
космическое	$0,05 \cdot 10^{-9}$
$\gamma$ -излучение	$0,05 \cdot 10^{-9} \dots 0,1 \cdot 10^{-9}$
рентгеновское	$0,1 \cdot 10^{-9} \dots 2,0 \cdot 10^{-5}$
ультрафиолетовое	$-2,0 \cdot 10^{-5} \dots 0,4 \cdot 10^{-3}$
видимое	$-0,4 \cdot 10^{-3} \dots 0,8 \cdot 10^{-3}$
тепловое (инфракрасное)	$-0,8 \cdot 10^{-3} \dots 0,8$
радиоволновое	$0,2 \dots \lambda \cdot 10^6$

Необходимо отметить, что представление о лучистой энергии как энергии только электромагнитных колебаний не позволяет объяснить некоторые ее свойства. Лучистая энергия излучается и поглощается не в виде непрерывного потока, а некоторыми порциями-квантами, которые обладают и волновыми и корпускулярными свойствами. Эти свойства дополняют друг друга.

Корпускулярные свойства (отражение, поглощение, фотоэффект) наиболее существенно проявляются в коротковолновом спектре излучения, волновые (дифракция, интерференция) – в длинноволновом.

Излучение свойственно всем телам и происходит при любой температуре, отличной от абсолютного нуля. Каждое тело не только непрерывно излучает, но и непрерывно поглощает лучистую энергию. Количество отдаваемого или воспринимаемого тепла определяется разностью между количеством излучаемой и поглощаемой лучистой энергии. Эта разность отлична от нуля, если температура тел, участвующих во взаимном обмене лучистой энергии, различна. При одинаковой температуре тел вся система находится в подвижном тепловом равновесии. В этом случае все тела системы также излучают и поглощают энергию, но для каждого из них приход лучистой энергии равен ее расходу (на основании закона теплового равновесия).

В процессах лучистого теплообмена участвуют лишь тонкие поверхностные слои. Для проводников тепла толщина слоя составляет 1 мкм, а для непроводников тепла – около 1 мм.

Количество тепла, переносимого путем излучения, становится существенным только при высоких температурах.

При всем разнообразии процессов излучения в различных областях длин волн для них могут быть установлены некоторые общие свойства. В качестве характеристики вводится величина, называемая плотностью излучения –  $E$ . Она представляет собой количество энергии, излучаемой при данной температуре с единицы поверхности тела в единицу времени:

$$E = \frac{Q}{F\tau}, \text{ Вт/м}^2. \quad (1)$$

В теории лучистого теплообмена широко используется закон Стефана-Больцмана, устанавливающий зависимость полной излучательной способности абсолютно черного тела от его температуры:

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4, \text{ Вт/м}^2, \quad (2)$$

где  $C_0 = 5,67$  - коэффициент излучения абсолютно черного тела, константа, не зависящая от температуры,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ К}^4}$ .

Излучение реальных нагретых тел отличается от излучения черного тела и называется серым излучением. Излучательная способность серого тела отклоняется от знака Стефана-Больцмана. Однако для однообразия расчетных построений в основу всех расчетов теплового излучения различных тел положены, как наиболее простые и универсальные, законы излучения абсолютно черного тела (в виде закона четвертой степени) в форме

$$E = c \left(\frac{T}{100}\right)^4, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \quad (3)$$

где  $c$  - коэффициент излучения серого тела,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ К}^4}$ . Его численное значение является функцией температуры тела, определяется экспериментально и может быть представлено зависимостью

$$c = \varepsilon C_0, \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  - степень черноты (отношение количества энергии собственного излучения тела при данной температуре к энергии излучения абсолютно черного тела той же температуры).

Как показывают опыты, степень черноты различных тел определяется не только их природой, но также формой, состоянием поверхности и температурой.

Согласно опытным данным повышение температуры твердых тел приводит к увеличению  $\varepsilon$ , поэтому излучательная способность реальных тел, в общем, изменяется пропорционально температуре не в четвертой, а в более высокой степени, т.е.  $T^n$ , где  $n > 4$  (для платины  $n = 5,11$  в интервале  $T=500-900\text{К}$ ; для алюминия  $n = 4,73$  в интервале  $T=500-800\text{К}$ ). Результирующий лучистый теплообмен в системе двух серых тел, имеющих температуры  $T_1$  и  $T_2$ , всегда определяется как некоторая разность их

лучистых эффективных потоков в форме

$$Q_R = F \varepsilon_n C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_n$  — приведенная степень черноты системы, зависящая от излучательных свойств материалов ( $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ) и геометрических форм излучающих поверхностей:

$F$  — излучающая поверхность,  $\text{м}^2$ .

Если комплекс перед квадратными скобками обозначить через  $C$ ,

т.е.

$$C = \varepsilon_n C_0, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}, \quad (6)$$

то с учетом равенства (6) соотношение (5) запишется в виде

$$Q_R = F C \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт}. \quad (7)$$

Выражение (7) является типичной формой расчетной зависимости, которая искусственно вводится в рамки закона четвертой степени абсолютной температуры (для единообразия расчетных соотношений).

Вместе с тем представляет интерес установление фактической излучательной способности реальных тел как функции от температуры. Предположительно эта закономерность выражается соотношением:

$$Q_R = F C \left( \frac{T}{100} \right)^n, \quad (8)$$

где ожидается  $n > 4$ . Проверка этого соотношения и является задачей лабораторной работы.

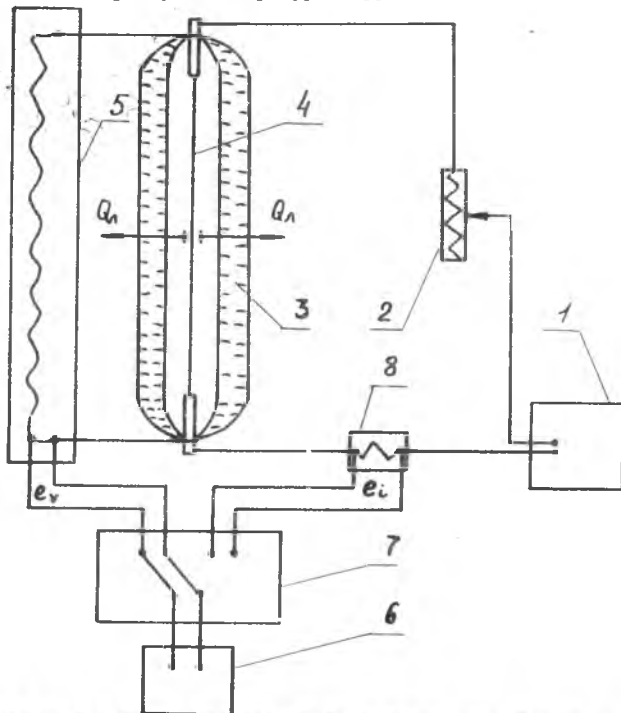
Существует ряд методов экспериментального определения  $n$ : метод теплового регулярного режима, метод сравнения реального излучения с излучением абсолютно черного тела, калориметрический метод и др.

В проводимой работе используется калориметрический метод, основанный на непосредственном измерении энергии, излучаемой исследуемым телом, а также его температуры и температуры окружающей среды. Обработка данных эксперимента проводится с учетом выражений (I)-(7).



## ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Схема установки показана на рис. I. В качестве излучателя энергии используется тонкая проволока 4 из вольфрамового сплава длиной  $l$  и диаметром  $d$ , впаянная в стеклянный сосуд с двойными стенками. Полость стеклянного сосуда вакуумирована до давления  $10^{-4}$  мм рт.ст., что исключает конвективную передачу тепла от проволоки к стенке сосуда. Это означает, что перенос тепла от проволоки осуществляется только путем излучения  $Q_R$  через вакуумную полость. В пространство 3 между двойными стенками залита вода, поддерживающая температуру стенок, практически равную температуре окружающей среды.



Р и с . I . Схема установки: 1 - выпрямитель; 2 - резистор; 3 - охлаждающий контур; 4 - излучающая вольфрамовая нить; 5 - делитель напряжения; 6 - потенциометр; 7 - переключатель; 8 - эталонное сопротивление.

К исследуемой проволоке подводится постоянный электрический ток от выпрямителя 1, подаваемая мощность регулируется реостатом 2. Подводимая электрическая мощность измеряется потенциометром по падению напряжения  $E$  на проволоке и току  $I$ , проходящему по ней.

Для регистрации падения напряжения и тока применяется потенциометр ПП-63 6 и набор шунтов. Полученные значения ЭДС на потенциометре необходимо умножить на переводные коэффициенты для определения истинных значений напряжения и тока:

$$V = e_v K_v, B \quad (9)$$

$$I = e_i K_i, A \quad (10)$$

Температура исследуемой проволоки измеряется по ее сопротивлению, которое для определенного проводника имеет однозначную зависимость от температуры. Сопротивление проволоки на каждом тепловом режиме проводимого исследования может быть подсчитано по падению напряжения на ней и силе тока в цепи:

$$R = \frac{V}{I}, \text{ ом} \quad (11)$$

График зависимости сопротивления  $R$  от абсолютной температуры проволоки  $T, K$  прилагается на рис.2.

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Включить установку в электрическую сеть 220 В. Опыты проводятся при нескольких значениях температуры излучателя  $T_i$ , для чего с помощью реостата меняется ток, проходящий через излучатель. Первоначально устанавливается питающее напряжение, равное 50-60 В. После 3-5 мин выдержки наступает стабилизация режима, на что показывает стабильность ЭДС потенциометра, после этого можно проводить измерения. В зависимости от положения переключателя 7 потенциометром измеряются  $e_v$  или  $e_i$  в милливольтх. На этом измерения на данном режиме заканчиваются.

Затем питающее напряжение увеличивается до 70 В, и после выдержки проводятся те же измерения. Следует провести измерение на 6-7 режимах для напряжений  $V = 50, 60, 70, 75, 80, 85, 90$  В.

При выключении установки вначале необходимо вывести в нулевое положение ручку регулирования реостата и обесточить установку.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. По выражениям (9, 10, 11) подсчитываются значения  $\mathcal{J}, V, R$  для каждого режима.

2. Электрическая мощность, подаваемая на нагрев проволоки, находится по формуле

$$Q_R = \mathcal{J} V, \text{ Вт} \quad (12)$$

При установившемся режиме все тепло, выделившееся излучателем, полностью передается охлаждающей воде, т.е. в окружающую среду.

3. По рассчитанным значениям  $R$  из графика, прилагаемого к инструкции (см. рис. 2), определяется абсолютная температура проволоки  $T_1, \text{ К}$ . Эту операцию определения  $T_1$  по  $R$  следует выполнять с наибольшей точностью.

4. Температура окружающей среды определяется комнатным термометром.

5. По выражению

$$C^P = \frac{Q_R}{F \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_M}{100} \right)^4 \right]} \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4} \quad (13)$$

определяются значения коэффициента излучения проволоки для  $n=4$ .

6. Фактическое значение показателя  $n^{\Phi}$  можно определить графически, откладывая на графике опытные значения  $Q_R, T_1$  в координатах

$$\lg(Q_R) = f \left\{ \lg \left( \frac{T_1}{100} \right) \right\}.$$

Из уравнения (8) следует, что на графике получится прямая линия, тангенс угла наклона которой равен показателю  $n^{\Phi}$ . Через точки графика проводится осредняющая прямая. Значение  $n^{\Phi}$  определяется выражением

$$n^{\Phi} = \frac{\lg(Q_R)_A - \lg(Q_R)_B}{\lg \left( \frac{T_1}{100} \right)_A - \lg \left( \frac{T_1}{100} \right)_B},$$

где А и В - любые две точки, лежащие на осредняющей прямой.

7. Определяется  $C^{\Phi}$

$$C^{\Phi} = \frac{Q_R}{F \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^{n_{\Phi}} - \left( \frac{T_2}{100} \right)^{n_{\Phi}} \right]}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^n},$$

где F - излучающая поверхность проволоки.

8. Определяются значения приведенной степени черноты поверхности проволоки для обоих случаев:

$$\varepsilon^P = \frac{C^P}{C_0}; \quad \varepsilon^{\Phi} = \frac{C^{\Phi}}{C_0}.$$

9. В заключение составляется аналитическое выражение излучательной способности проволоки для обоих случаев по уравнению

$$q_R = \varepsilon_n C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^n - \left( \frac{T_2}{100} \right)^n \right], \text{ Вт/м}^2.$$

Здесь  $\varepsilon_n = \varepsilon^P$  или  $\varepsilon_n \approx \varepsilon^{\Phi}$ .

10. По результатам расчетов строятся графики  $q_R^P$  и  $q_R^{\Phi}$ , как функция температуры излучателя, в одних осях координат.

#### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Принципиальная схема установки.
2. Протокол записи показаний измерительных приборов.
3. Обработка результатов опыта.
4. Графики зависимости.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ

1. Что такое тепловое излучение?
2. Является ли вакуум преградой для передачи тепла излучением?
3. Является ли газовая прослойка преградой для передачи тепла излучением?
4. Что называется результирующим излучением?
5. Для чего выкачивается воздух из полости между излучающей нитью и охлаждающим контуром?
6. Какие тела называются абсолютно черными?
7. Что из себя представляют температуры  $T_1$  и  $T_2$  в выражении

$$Q_R = c \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] ?$$

8. Как определяется в опыте количество тепла  $Q_R$ , переданное излучением?
9. Какой слой металла по толщине участвует в лучистом теплообмене?
10. Как контролируется в опыте температура излучающей нити?

ПРОТОКОЛ ОПЫТА

$B = \underline{\hspace{2cm}}$  мм рт.ст

Номер опыта	$E_V$ мВ	$E_3$ мВ	$V$ В	$\gamma$ А	$R$ Ом	$T,$ К	$Q_R$ ВТ

$t_H = \hspace{2cm}$  °C

Но- мер опы- та	$C^P$ $\frac{BT}{M^2K^4}$	$n^{\Phi}$	$C^{\Phi}$ $\frac{BT}{M^2K^4}$	$\varepsilon^P$	$\varepsilon^{\Phi}$	$q_R^P$ $\frac{BT}{M^2}$	$q_R^{\Phi}$ $\frac{BT}{M^2}$

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

Лабораторная работа № 4. Теплоотдача цилиндра в условиях естественной конвекции . . .	3
Лабораторная работа № 5. Исследование теплоотдачи цилиндра при поперечном обтекании воздухом . . . . .	II
Лабораторная работа № 6. Определение коэффициента теплоотдачи от шара к воздуху методом регулярного режима . . . . .	20
Лабораторная работа № 7. Тепловое излучение окисленной металлической поверхности . . . .	29

Составители: Николай Николаевич Огородников  
Натаан Дмитриевич Кошьев  
Владимир Васильевич Биряк  
Александр Петрович Меркулов

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА  
И ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Редактор М.И.Д о г у н о в а  
Техн.редактор Н.М.К а л е н ю к  
Корректор В.П.П е т р о в а

Подписано в печать 10.10.1983 г.  
Формат 60x84 1/16. Бумага оберточная белая.  
Печать оперативная. Усл.п.л. 2,3. Уч.-изд.л. 2,0.  
Т. 500 экз. Заказ 7249 Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С.П.Королева,  
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.  
Обл.тип.им. В.П.Мяги, г.Куйбышев, ул. Венцека, 60.