

Министерство высшего и среднего специального
образования РСФСР

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

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА
И ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Методические указания к лабораторным работам
по курсу "Теплопередача"

Куйбышев 1990

Составители: Н.Н.Огородников (4,6),
Н.Д.Колышев (5), В.В.Бирюк,
А.П.Меркулов (7)

УДК 621.036.7

Исследование конвективного теплообмена и теплового излучения: Метод. указания к лаборатор. работам /Куйбышев. авиац. ин-т; Сост. Н.Н.Огородников, Н.Д.Колышев, В.В.Бирюк, А.П.Меркулов. Куйбышев, 1990. 36 с.

В предлагаемом цикле из четырех лабораторных работ 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".

Данные указания являются продолжением общего цикла работ по курсу "Теплопередача", первая часть которого представлена методическими указаниями "Исследование теплопроводности материалов". Предназначены для студентов дневного и вечернего отделений всех факультетов КуАИ. Могут быть полезны сотрудникам отраслевых научно-исследовательских лабораторий.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Куйбышевского ордена Трудового Красного Знамени авиационного института имени академика С.П. Королёва

Рецензенты: В.А.Кудин, Ю.Г.Лекарев

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 разных форм и размеров. Исследования в этом направлении продолжают 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

$$Nu = f(Gz; Pr), \quad (I)$$

- где $Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$ - среднее число Нуссельта на поверхности цилиндра (безразмерное выражение коэффициента теплоотдачи);
- $Gz = \beta \frac{g d^3 \Delta t}{\nu^2}$ - число Грасгофа;
- $Pr = \nu / a$ - число Прандтля;
- α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);
- λ - теплопроводность газа (жидкости), Вт/(м·К);
- ν - кинематическая вязкость, м²/с;
- a - температуропроводность, м²/с;
- β - коэффициент объемного расширения жидкости или газа;
- d - определяющий размер, м;
- $\Delta t = t_w - t_f$ - температурный напор (разность температур поверхности объекта и температуры среды,) К.

Многочисленные исследования полностью подтверждают теоретически предсказанную принципиальную зависимость (I). 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 (I) упрощается:

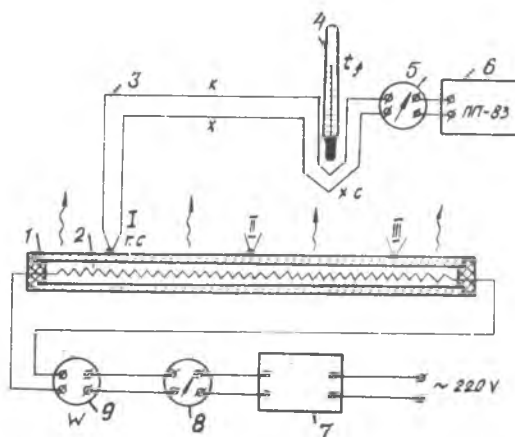
$$Nu = f(Gz). \quad (2)$$

Следует иметь в виду, что последняя зависимость (2), конкретно определяемая по результатам опытов, в дальнейшем может исполь-

зоваться 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 рисунке. Экспериментальный цилиндр I изготовлен из алюминиевого сплава ($d = 42$ мм, $l = 684$ мм), внешняя поверхность которого никелирована и отполирована, чтобы по возможности уменьшить рассеяние тепла лучеиспусканием. Равномерное распределение температур по длине цилиндра обеспечивается высокой теплопроводностью металлической стенки.



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

Внутри цилиндра размещен электронагреватель 2 с максимальной потребляемой мощностью 200 Вт. Торцы цилиндра закрыты термостойким теплоизоляционным материалом. На поверхности цилиндра прикреплены винтами три дифференциальных хромель-копелевых термопары 3 (I, II, III). Холодные спаи термопар находятся в воздухе, температура регистрируется ртутным термометром 4.

Выводы термопар присоединены к потенциометру 6 через переключатель термопар 5.

Замер температуры дифференциальными термопарами удобен тем, что одним измерением сразу определяется температурный напор Δt , 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 7 и лабораторный автотрансформатор 8.

Для регистрации мощности, потребляемой электронагревателем, в цепь включен ваттметр 9.

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 $\approx 11 \text{ мВ}$), 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 ~ 3 мин. С этого момента начинается экспериментальная часть работы.

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

На каждом этапе регистрируются и заносятся в протокол:

1. Показания ваттметра - W , Вт.
2. Показания потенциометра по трем термопарам - $E_1, E_2, E_3, \text{мВ}$.
3. Показания термометра - t_f , $^\circ\text{C}$.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Для каждого температурного режима установки определяются:

1. Значения $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, ^\circ\text{C}$ (по показаниям термпар I, II, III).

2. Средний температурный напор

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3}{3}.$$

3. Суммарный коэффициент теплоотдачи α_{Σ} , Вт/(м²·К):

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{W}{F \Delta t_{cp}}, \quad (3)$$

где F - боковая поверхность цилиндра, м²;

W - мощность, потребляемая нагревателем, Вт.

4. Радиационный коэффициент теплоотдачи α_R :

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

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:

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

5. Конвективный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \alpha_{\Sigma} - \alpha_R.$$

6. Число Нуссельта

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

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

λ_f - теплопроводность воздуха при температуре t_f , Вт/(м·К).

7. Число Грасгофа

$$Gr_{z_f} = \beta_f \frac{gd^3 \Delta t_{ср}}{\nu_f^2},$$

где $\beta_f = \frac{1}{T_f}$ - коэффициент объемного расширения воздуха, 1/К;
 ν_f - кинематическая вязкость, м²/с. Значения ν_f приведены при давлении $P_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па. Пересчет на барометрическое давление B во время опытов в паскалях осуществляется по соотношению

$$\nu_B = \nu_0 \frac{1,013 \cdot 10^5}{B};$$

$g = 9,81$ м/с² - ускорение свободного падения.

8. Определение зависимости $Nu_{z_f} = f(Gr_{z_f})$, имеющей степенной характер

$$Nu_{z_f} = C Gr_{z_f}^n \quad (4)$$

производим следующим образом:

значения Nu_{z_f} и Gr_{z_f} , полученные из опыта, откладываются на графике в логарифмических координатах $\lg Nu_{z_f} - \lg Gr_{z_f}$.

Для построения графика могут быть рекомендованы масштабы:

$$1 \text{ ед. } \lg Nu_{z_f} = 1000 \text{ мм}, \quad 1 \text{ ед. } \lg Gr_{z_f} = 500 \text{ мм}.$$

Через точки на графике проводится осредняющая прямая линия. Величина показателя степени n уравнения (4) определяется как тангенс угла наклона φ этой прямой к оси ординат:

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

где A и B - любые точки, лежащие на осредняющей прямой. Величина множителя C определяется по соотношению

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

где Nu_f и Gr_f берутся для точки, лежащей между значениями A и B на осредняющей прямой.

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

ПРОТОКОЛ ЗАПИСИ ИЗМЕРЕНИЙ

$B_0 =$ _____ Па

Дата исполнения _____

Номер опыта	Замеряемые параметры						Вычисляемые величины														
	$W,$	$E_1,$	$E_2,$	$E_3,$	$t_f,$	$t_f,$	Δt_1	Δt_2	Δt_3	$\Delta t_{ср}$	α_s	α_R	α	$T_{ср}$	T_f	N_f	$S_{ср}$	$S_{факт}$	$S_{дв}$	$S_{двф}$	
	$MВ$	$MВ$	$MВ$	$MВ$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$															$B_T / (M^2 \cdot K)$
1																					
2																					
3																					
4																					

Студент _____

Преподаватель _____

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 α_{Σ} 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 $\Delta t_{ср}$ и почему?
7. Через торцы цилиндра частично рассеивается тепло, вводимое во внутреннее пространство. Как это сказывается на точности определения α_{Σ} ?
8. Как будет развиваться процесс естественной конвекции на поверхности нагретой аппаратуры, помещенной внутри спутников Земли?

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 (I0-I2 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:

$$Nu = f(Re, Pr), \quad (1)$$

- где
- $Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$ - число Нуссельта;
 - $Re = \frac{wd}{\nu}$ - число Рейнольдса;
 - $Pr = \frac{\nu}{a}$ - число Прандтля;
 - α - осредненная по поверхности цилиндра величина коэффициента теплоотдачи;
 - d - диаметр цилиндра;
 - w - скорость набегающего потока;
 - λ, ν, a - соответственно теплопроводность, кинематическая вязкость и температуропроводность текучей среды.

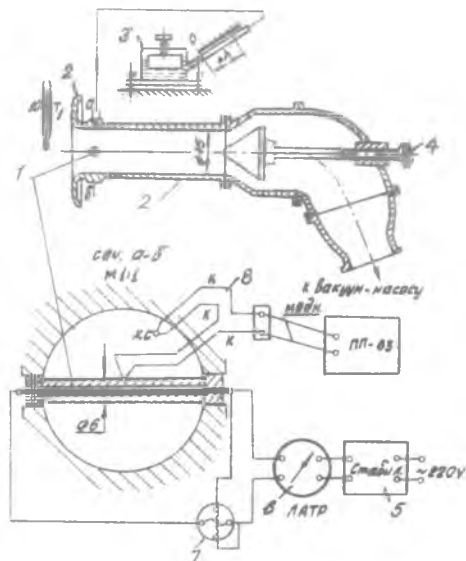
Число Pr для индивидуальных газов незначительно зависит от температуры и давления. Для определения влияния Pr на теплоотдачу необходимо провести эксперименты в потоках различных газов и паров. Если $Pr = const$, то его влияние на теплоотдачу установить сложно. В этом случае зависимость (1) упрощается:

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

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

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка представляет собой цилиндр I, изготовленный из красной меди ($d = 6$ мм, $l = 45$ мм). Его наружная поверхность никелирована и полирована. За счет высокой теплопроводности меди обеспечивается равномерное распределение температур по всей длине цилиндра. По его оси заложен графитовый стержень ($d = 1,8$ мм), изолированный от массы цилиндра тонкой прослойкой из огнеупорной глины ($\delta = 0,2$ мм). Цилиндр выполняет роль электрического нагревателя. Подвод электрического тока осуществля-



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

ется через тонкостенные медные колпачки, туго посаженные на концы графитового стержня. Полная длина нагревателя равна длине медного цилиндра. Цилиндр установлен на входе маленькой аэродинамической трубы 2 ($D = 45$ мм), вход выполнен плавным закруглением ($R = 20$ 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 $\Delta t = t_0 - t_{0\text{в}}$ используется хромель-копелевая (ХК) термопара 8 из проволок ($d = 0,23$ мм). Горячий спай термопары заделан в стенку медного цилиндра на середине его длины. Изолированные провода термопары проложены в канавке сечением 1×1 мм по образующей цилиндра и залиты эпоксидной смолой. Заливка зачищена заподлицо с поверхностью цилиндра. Холодный спай термопары введен в воздушный поток.

Нагреватель питается током автотрансформатора 6 через стабилизатор 5.

Электрическая мощность регистрируется точным ваттметром 7 (кл. 0,2). Скорость набегающего на цилиндр потока определяется по замерам статического давления в потоке в плоскости установки цилиндра. Измерение давления производится через два диаметрально противоположных отверстия ($d = 0,8$ мм) в стенке трубы.

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

Скорость потока в узком сечении определяется по соотношению

$$\bar{w} = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho (1 + \xi)}}, \quad (3)$$

где $\Delta p = K \Delta h g$ — перепад давления, Па;

Δh — показания микроманометра, мм;

ρ — плотность воздуха, определяемая по состоянию атмосферы с помощью уравнения состояния, кг/м³;

$\xi = 0,03$ — 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.

Спытная 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 (см. рисунок) необходимо проверить правильность включения измерительных приборов и затем приступить к проведению опытов. Включить вакуум-насос. С помощью дросселя 4 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:

$\Delta h, \text{ мм}$	20	30	40	50	60	80	100	120	140	160	180	200
$W, \text{ Вт}$	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:

Δh — показания микроманометра, мм;

W — показания ваттметра, Вт;

- E - ЭДС дифференциальной термопары, измеряющей разность температур цилиндра и воздуха;
- $t_{\text{воз}}$ - температура воздуха на входе в аэродинамическую трубу, °С;
- B - барометрическое давление, Па.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

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

Температурный напор Δt определяется с помощью градуировочных таблиц ХК по величине E .

Коэффициент теплоотдачи рассчитывается по соотношению

$$\alpha = \frac{W}{F \Delta t}$$

где W - показания ваттметра, Вт;

Δt - температурный напор, °С;

$F = 8,47 \cdot 10^{-4}$ - боковая поверхность цилиндра, м².

Числа $Nu_{\text{воз}}$ и $Re_{\text{воз}}$ определяются по соотношениям

$$Nu_{\text{воз}} = \frac{\alpha d}{\lambda_{\text{воз}}}, \quad Re_{\text{воз}} = \frac{W d}{\nu_{\text{воз}}}$$

где $\lambda_{\text{воз}}$ - теплопроводность воздуха, Вт/м·К;

$\nu_{\text{воз}}$ - кинематическая вязкость воздуха при средней температуре $t_{\text{воз}}$ за время опытов, м²/с.

Табличные значения ν_0 приведены при давлении $P_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па. Пересчет на барометрическое давление во время опытов делается по соотношению

$$\nu_{\text{воз}} = \nu_0 \frac{1,03 \cdot 10^5}{B}$$

где B - барометрическое давление, Па.

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

$$Nu_{отс} = C Re_{отс}^n,$$

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

$$n = \frac{\ln Nu_{отс2} - \ln Nu_{отс1}}{\ln Re_{отс2} - \ln Re_{отс1}}.$$

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

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

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

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

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 , Pr .
5. Почему в настоящей работе число Pr 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 ЗАПИСИ ИЗМЕРЕНИЙ

$B =$ _____ Па

Дата испытания _____

Номер опыта	Замеряемые параметры				Вычисляемые величины					
	$\Delta h,$ мм	$W,$ Вт	$E,$ МВ	$t,$ °C	$\bar{w},$ м/с	$w,$ м/с	$\Delta t,$ °C	$\alpha,$ $\frac{Вт}{М^2 \cdot К}$	$Re_{жс}$	$Nu_{жс}$
I										
2										
3										
4										

1. $t_{жс} = \dots ^\circ C$
2. $\nu_{жс} = \dots м^2/с$
3. $\alpha_{жс} = \dots Вт/(м \cdot К)$
4. $\nu_0 = \dots м^2/с$

Студент _____

Преподаватель _____

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ОТ ШАРА К ВОЗДУХУ МЕТОДОМ РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМА

Ц е л ь р а б о т н : 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 α 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 поверхности 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 α от шара к воздуху в условиях искусственной конвекции. В качестве приема для определения осредненного по поверхности шара коэффициента теплоотдачи α используется закономерность, вытекающая из рассмотрения процесса нестационарного охлаждения нагретого шара.

Условные обозначения

А. Шар

M - масса шара, кг;

C - теплоемкость материала, Дж/(кг·К);

F - поверхность, м²;

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/(м²·К);

ϵ_1 - 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;

τ - время, с.

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

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

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:

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

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

$$-MC dT = \alpha F (T - T_f) d\tau + \epsilon_1 C_0 F \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right] d\tau$$

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

Полученное выражение перепишем в форме

$$\frac{dT}{T - T_f} = - \frac{F}{MC} \left[\alpha + \epsilon_1 C_0 \frac{\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4}{T - T_f} \right] d\tau. \quad (4)$$

Второй член в скобках имеет размерность Вт/(м²·К) и именуется радиационным коэффициентом теплоотдачи α_R .

Введем новые обозначения:

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

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

Из условия $T_p = const$ следует $d\vartheta = d\tau$.

С учетом дополнительных обозначений получим конечную форму дифференциального уравнения нестационарного теплообмена

$$\frac{d\vartheta}{\vartheta} = - \frac{F\alpha_s}{MC} d\tau. \quad (5)$$

Сделав допущение, что $\alpha_s = const$ (это еще необходимо специально обосновать) и введя обозначение

$$m = \frac{F\alpha_s}{MC}, \quad (6)$$

проинтегрируем уравнение (5)

$$\ln \vartheta = -m\tau + const. \quad (7)$$

Уравнение (7) является отправным пунктом во всей теории регулярного режима. Из уравнения (7) следует, что логарифм натуральной избыточной температуры ϑ является линейной функцией времени τ . 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. $\alpha_{\Sigma} = const.$

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

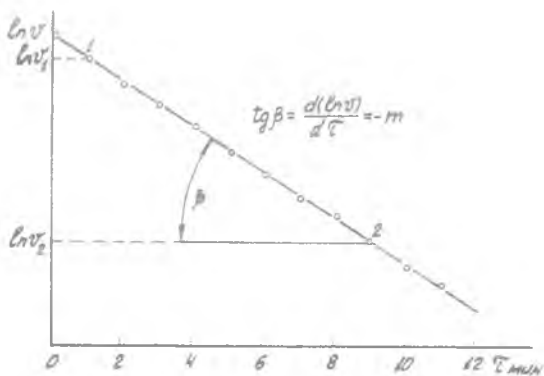
Поверхность шара никелирована и обладает слабой излучательной способностью ($\epsilon_1 \approx 0,075$). Благодаря этой специальной мере среднее абсолютное значение α_R по сравнению с α_{Σ} составляет величину порядка $\sim 3\%$. Изменение α_R за время опыта составляет $\sim 10\%$.

Поскольку α_R входит слагаемым в состав α_{Σ} , то полное изменение α_{Σ} 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 α_R на величину m , следует иметь в виду, что величина C , входящая в состав знаменателя, при остывании шара в указанном диапазоне температур также изменяется на $\sim 0,5\%$. При остывании α_R и C убывает. Поскольку эти величины входят в состав m в виде отношения, то их совместное влияние на m меньше, чем отдельное влияние α_R , и, таким образом, изменение m фактически составит $\sim 0,1\%$.

Из уравнения (7) следует, что если в процессе остывания шара регистрировать величину α и время τ , то в координатах $\ln \alpha - \tau$ должен получиться падающий линейный график с тангенсом угла наклона $\text{tg } \beta = -m$, I/мин (рис. I).

В теории регулярного режима величина m именуется "темпом охлаждения". Любые исследования, связанные с применением регулярного режима, всегда сводятся к определению m . В данном случае по значению величины из соотношения (6) определяется α_{Σ} , а затем α . Физический смысл "темпа охлаждения" состоит в том, что m определяет не скорость изменения самой избыточной температуры $\left(\frac{d\alpha}{d\tau}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{с}}\right)$, а скорость изменения логарифма избыточной температуры во времени. В стадии регулярного режима эта скорость $m = \frac{d[\ln \alpha]}{d\tau} = const.$



Р и с. 1. График охлаждения нагретого шара в полулогарифмических коэффициентах при постоянном значении осредненного коэффициента теплоотдачи на поверхности

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

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

Характеристики шара:

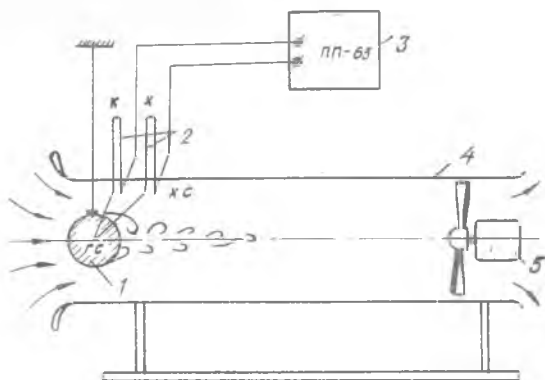
$d = 70,14$ мм (определено как среднее значение в результате микрометрического обмера);

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

$C = 397$ Дж/(кг·К) - средняя изобарная теплоемкость меди в интервале температур $t \approx 150 \dots 70^\circ\text{C}$;

$F = \pi d^2 = 0,01545$ м² - поверхность шара.

Для измерения текущей разности температур $\vartheta^s = t - t_{sp}$ используется хромель-копелевая (ХК) дифференциальная термопара из проволок $d = 0,5$ мм. Горячий спай через сверление $d = 3$ мм введен до центра шара. Для улучшения теплового контакта сверление на глу-



Р и с. 2. Схема установки для определения коэффициента теплоотдачи от шара к воздуху методом регулярного режима: 1 - шар "альфакалориметр"; 2 - дифференциальная термопара ХК; 3 - потенциометр; 4 - аэродинамическая труба; 5 - вентилятор

бину ~ 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, затем включается вентилятор.

Эксперимент начинается первым отсчетом показания потенциометра, 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 ϑ° , $^{\circ}\text{C}$.

По таблицам натуральных логарифмов определяются значения $\ln \vartheta$ с точностью до третьего знака после запятой. На миллиметровой бумаге строится график $\ln \vartheta = f(\tau)$ 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:

$$m = \frac{\ln \tau_1 - \ln \tau_2}{\tau_2 - \tau_1}.$$

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

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{M}{P} C \frac{m}{60}, \quad (8)$$

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

m - темп охлаждения из постоянного графика, мин^{-1} .

С учетом постоянных коэффициентов

$$\alpha_{\Sigma} = 689 m. \quad (9)$$

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

$$\alpha_R = C \frac{\left(\frac{T_{\text{ср}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_f}{100}\right)^4}{T - T_f}, \quad (10)$$

где $C = 0,418 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ - коэффициент излучения поверхности шара.

Конвективный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \alpha_{\Sigma} - \alpha_R. \quad (11)$$

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

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

ПРОТОКОЛ ЗАПИСИ ИЗМЕРЕНИЙ

$B =$ _____ Па

Дата испытания _____

№ п/п	$\tau,$ мин	$B,$ МВ	$\vartheta,$ °С	$\ln \vartheta$	$m,$ г/мин	α_{Σ}	α_R	α
				$B_T/(M \cdot K)$				
1								
2								
3								
4								

Студент _____

Преподаватель _____

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 $\ln \vartheta - \tau$; если коэффициент теплоотдачи в процессе остывания будет изменяться (возрастать, падать)?

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...1300 К.

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	$0,05 \cdot 10^{-9}$
γ -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	$0,2 \dots 10 \cdot 10^5$

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, волновое (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 микрон, 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 длины волн для них могут быть установлены некоторые общие свой-

ства. В качестве характеристики вводится величина, называемая плотностью излучения — \mathcal{S} (Вт/м²). Она представляет собой количество энергии, излучаемой при данной температуре с единицы поверхности тела в единицу времени:

$$\mathcal{S} = \frac{Q}{F\tau}, \quad (1)$$

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

$$\mathcal{S}_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (2)$$

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

Излучение реальных нагретых тел отличается от излучения черного тела и называется серым излучением. Излучательная способность серого тела отклоняется от знака Стефана-Больцмана. Однако для образования 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

$$\mathcal{S} = C \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (3)$$

где C — коэффициент излучения серого тела, Вт/м²·К⁴. Его численное значение является функцией температуры тела, определяется экспериментально и может быть представлено зависимостью

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

где ε — 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 ϵ , 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 $T = 500 \dots 9000$ К; для алюминия $n = 4,73$ в интервале $T = 500 \dots 800$ 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

$$\Phi = F \epsilon_n C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (5)$$

где ϵ_n - приведенная степень черноты системы, зависящая от излучательных свойств материалов (ϵ_1, ϵ_2) и геометрических форм излучающих поверхностей; F - излучающая поверхность, m^2 .

Если комплекс перед квадратными скобками обозначить через C , т.е.

$$C = \epsilon_n C_0, \quad (6)$$

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

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

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

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

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, calorиметрический 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 (1)-(7).

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

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

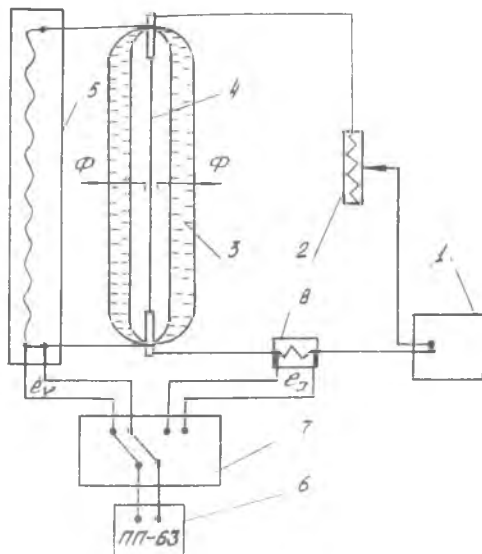
К исследуемой проволоке подводится постоянный электрический ток от выпрямителя, подаваемая мощность регулируется реостатом. Подводимая электрическая мощность измеряется потенциометром по падению напряжения \mathcal{E} на проволоке и току \mathcal{I} , проходящему по ней.

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

$$V = e_{25} K_2, \quad (9)$$

$$I = e_I K_I. \quad (10)$$

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



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

$$R = \frac{V}{I} \quad (II)$$

Температура проволоки T, K определяется по эмпирической формуле

$$T = 212 R + 300$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Включить установку в электрическую сеть 220 В. Опыты проводятся при нескольких значениях температуры излучателя T_1 , 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 указывает стабильность ЭДС потенциометра, после этого можно проводить измерения. В зависимости от положения переключателя (см. рис.) потенциометром измеряются e_{23} или e_{σ} в милливольтках. 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)–(II) подсчитываются значения J, V, R для каждого режима.

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

$$\Phi = JV, \quad (I2)$$

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

3. По рассчитанным значениям R определяется абсолютная температура проволоки T_f, K . Эту операцию определения T_f по R следует выполнить с наибольшей точностью.

4. Температура окружающей среды определяется комнатным термометром.

5. По выражению

$$c_p = \frac{\Phi}{R \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_H}{100} \right)^4 \right]} \quad (I3)$$

определяются расчетные значения коэффициента излучения проволоки при $n = 4$.

6. Экспериментальное значение показателя n_3 можно определить графически, откладывая на графике опытные значения Φ, T_f в координатах

$$e_g(\Phi) = f \left\{ e_g \left(\frac{T_f}{100} \right) \right\}.$$

Из уравнения (8) следует, что на графике получится прямая линия, тангенс угла наклона которой равен показателю n_g . Через точки графика проводится осредняющая прямая. Значение n_g определяется выражением

$$n_g = \frac{\lg(\varphi)_A - \lg(\varphi)_B}{\lg\left(\frac{T_1}{100}\right)_A - \lg\left(\frac{T_1}{100}\right)_B},$$

где A и B - любые две точки, лежащие на осредняющей прямой.

7. Определяется экспериментальное значение коэффициента излучения:

$$C_g = \frac{\varphi}{F \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^{n_g} - \left(\frac{T_H}{100}\right)^{n_g} \right]},$$

где F - излучающая поверхность проволоки.

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

$$\varepsilon_p = \frac{C_p}{C_0}, \quad \varepsilon_g = \frac{C_g}{C_0}.$$

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

$$y = \varepsilon_n C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^n - \left(\frac{T_H}{100}\right)^n \right].$$

Здесь $\varepsilon_n = \varepsilon_p$ или $\varepsilon_n \approx \varepsilon_g$.

10. По результатам расчетов строятся графики ε_p и ε_g , как функции температуры излучателя, в одних осях координат.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

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

ПРОТОКОЛ ЗАПИСИ ПОКАЗАНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

$B =$ _____ Па

Номер опыта	$E_V,$ МВ	$E_D,$ МВ	$V,$ В	$J,$ А	$R,$ ОМ	$T_1,$ К	$\Phi,$ Вт

$t_H =$ _____ °С

Номер опыта	$C_p,$ $\frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$	n_D	$C_D,$ $\frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$	ϵ_p	ϵ_D	$\gamma_p,$ $\frac{Вт}{м^2}$	$\gamma_D,$ $\frac{Вт}{м^2}$

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. Значения температур каких тел T_1 и T_2 подставляются в выражение

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

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

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА
И ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Составители: О г о р о д н и к с в Николай Николаевич,
К о л ы ш е в Натан Дмитриевич,
Б и р ь к Владимир Васильевич,
М е р к у л о в Александр Петрович

Редактор Н.Д.Ч а й н и к о в а
Техн.редактор Н.М.К а л е н ь к
Корректор Н.Д.Ч а й н и к о в а

Подписано в печать 25.05.90 г. Формат 60x84^I/16.
Бумага оберточная белая. Печать оперативная.
Усл.п.л. 2,1. Усл.кр.-отт. 4,2. Уч.-изд.л. 2,0.
Тираж 1000 экз. Заказ № 3505 Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева.
443086 Куйбышев, Московское шоссе, 34.

Типография Куйбышевского полиграфического объединения
имени В.П.Мяги. 443099 Куйбышев, ул. Венцева, 60.