

# ТЕПЛОМАССОБМЕН

Учебно-методическое пособие  
для выполнения лабораторных работ



Санкт-Петербург  
2014

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ»**

---

Кафедра промышленной теплоэнергетики

**ТЕПЛОМАССОБМЕН**

Учебно-методическое пособие  
для выполнения лабораторных работ

Для студентов,  
обучающихся по направлению 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Санкт-Петербург  
2014

УДК 621.184(075)

ББК 31.31я7

Т 343

Тепломассообмен: учебно-методическое пособие для выполнения лабораторных работ / сост. В.Н.Белоусов, В.А.Суслов, С.Н.Сморозин, С.В.Антуфьев, В.А.Кучмин/ СПбГТУРП.- СПб., 2014. -54 с.

В настоящем учебно-методическом пособии рассматриваются методы исследования процессов теплообмена. Приводятся теоретические основы, схемы лабораторных установок, порядок проведения опытов и обработки экспериментальных данных.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Рецензенты: зав. кафедрой «Атомная и тепловая энергетика» Института энергетики и транспортных средств Санкт-Петербургского государственного политехнического университета», д-р.техн.наук, проф. Сергеев В.В. ; зав. кафедрой теплотехники и теплоэнергетики Национального минерально-сырьевого университета «Горный», канд.техн.наук, проф. Лебедев В.А.

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия.

© Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров, 2014

© Белоусов В.Н., Суслов В.А., Смородин С.Н, Антуфьев С.В., Кучмин В.А., 2014

## Введение

Процесс обучения студентов специальности «Промышленная теплоэнергетика» основывается на базе ряда теоретических и практических дисциплин.

Курс «Тепломассообмен», наряду с лекциями и практическими занятиями, включает в себя ряд лабораторных работ, охватывающих следующие направления:

- Стационарная теплопроводность
- Нестационарная теплопроводность
- Свободная (естественная) конвекция
- Вынужденная конвекция
- Радиационный теплообмен

Лабораторный практикум способствует закреплению полученных теоретических знаний путем более глубокого изучения процессов теплообмена при ознакомлении с основами их экспериментального исследования.

Выполнению каждой работы предшествуют краткие сведения по теории рассматриваемого вопроса и методические аспекты постановки и формулировки задачи.

Приводится принципиальная схема лабораторной установки, подробно излагается методика проведения эксперимента и обработки опытных данных. Приведены формы журналов для записи результатов измерений.

В отчет по лабораторным работам включаются: схема экспериментальной установки и ее краткое описание, результаты измерений и обработки опытных данных.

## 1. Теплопроводность

Явление теплопроводности представляет собой процесс распространения энергии при непосредственном соприкосновении отдельных частиц тела или отдельных тел, имеющих различные температуры. Теплопроводность обусловлена движением микрочастиц вещества.

В газах перенос энергии осуществляется путем диффузии молекул и атомов, а в жидкостях и твердых телах (диэлектриках) – путем упругих волн. В металлах перенос энергии в основном осуществляется посредством диффузии свободных электронов, а роль упругих колебаний кристаллической решетки второстепенна.

В общем случае процесс передачи теплоты теплопроводностью в твердом теле сопровождается изменением температуры как в пространстве, так и во времени. Исследование процесса теплопроводности сводится к изучению пространственно-временного изменения температуры, т.е. к нахождению уравнения температурного поля [1]

$$t = f(x, y, z, \tau). \quad (1.1)$$

Различают *стационарное* и *нестационарное* температурные поля. Если тепловой режим является установившимся (стационарным), то температура в каждой точке поля с течением времени остается неизменной. В этом случае температура является функцией только координат:

$$t = f(x, y, z); \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0. \quad (1.2)$$

Для процессов *стационарной теплопроводности* решением задачи является исследование температурного поля в соответствии с законом Фурье

$$Q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} F, \text{ Вт} \quad (1.3)$$

и дифференциальным уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0. \quad (1.4)$$

Основным параметром, характеризующим процесс стационарной теплопроводности, является коэффициент теплопроводности

$$\lambda = \frac{Q}{F \tau \Delta t / \Delta l} \cdot (1.5)$$

*Коэффициент теплопроводности* представляет собой количество теплоты  $Q$ , которое проходит в единицу времени  $\tau$  через единицу изотермической поверхности  $F$  при градиенте температуры  $\Delta t / \Delta l$ , равном единице.

Коэффициент теплопроводности зависит от структуры, плотности, влажности и температуры данного материала. Лучшими проводниками теплоты являются металлы. Хуже всего проводят теплоту газы. Так, например, при комнатной температуре для меди  $\lambda = 384 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ , а для воздуха  $\lambda = 0,02 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ .

Коэффициент теплопроводности различных материалов изменяется в зависимости от температуры.

Для большинства газов коэффициент теплопроводности находится в пределах значений  $\lambda = 0,005 \div 0,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ . С повышением температуры  $\lambda$  возрастает, а от давления практически не зависит [4].

Для капельных жидкостей  $\lambda$  составляет  $0,08 \div 0,7 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ . При повышении температуры для большинства жидкостей  $\lambda$  убывает; исключение составляют вода и глицерин.

Строительные и теплоизоляционные материалы имеют коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,02 \div 3,0 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$  и с повышением температуры  $\lambda$  возрастает.

Коэффициенты теплопроводности металлов изменяются в пределах значений  $\lambda = 20 \div 400 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ . Самым теплопроводным металлом является серебро.

Как показывает опыт, для многих твердых материалов зависимость коэффициента теплопроводности от температуры, может быть принята линейной [3]:

$$\lambda = a + bt, \quad (1.6)$$

где  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты для конкретного рабочего тела;  $t$  – температура рабочего тела, °С.

Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности обычно осуществляется для условий одномерного стационарного температурного поля применительно к телу простой геометрической формы. Тогда расчетное выражение принимает вид

$$\lambda = \frac{Q}{\Delta t} K, \quad (1.7)$$

где  $Q$  – количество теплоты, прошедшей через опытный образец, Вт;  $\Delta t$  – перепад температур на границах исследуемого образца, °С;  $K$  – коэффициент формы.

Коэффициент формы определяется следующим образом:

- для плоского тела (плиты):

$$K = \frac{\delta}{F}; \quad (1.8)$$

- для цилиндрического тела (трубы):

$$K = \ln \frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{1}{2\pi l}; \quad (1.9)$$

- для сфероидального тела (шара):

$$K = \left( \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) \cdot \frac{1}{2\pi}. \quad (1.10)$$

Обозначения в выражениях (1.8) – (1.10):

$\delta$  – толщина тела (плиты), м;  $F$  – поверхность исследуемого плоского тела, нормальная к направлению теплового потока, м<sup>2</sup>;  $l$  – длина цилиндрического тела (трубы), м;  $d_1$  и  $d_2$  – соответственно внутренний и наружный диаметры цилиндрического или сфероидального тела.

Таким образом, для экспериментального определения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  необходимо определить при стационарном режиме тепловой поток  $Q$ , проходящий через опытный образец, и температуры на его поверхностях  $t_1$  и  $t_2$ . Проводится несколько опытов в определенном интервале температур образца, что позволяет выявить зависимость коэффициента теплопроводности от средней температуры образца

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad \text{в}$$

виде уравнения (1.6).

Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности методом неограниченного плоского слоя (плиты) реализуется при выполнении лабораторной работы №1. В соответствии с этим методом создается температурный перепад по толщине плоской пластины, одна поверхность которой нагревается, а другая охлаждается с помощью устройств, имеющих, как и исследуемый образец, плоскую форму.

Для получения одномерного теплового потока для образца с достаточно низкими коэффициентами теплопроводности ( $\lambda \leq 2,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$ ) толщину образца  $\delta$  принимают

$$\delta \leq (0,1 \div 0,15)D,$$

где  $D$  – диаметр круглого образца.

Для получения надежных опытных данных толщину пластины обычно принимают от 5 до 50 мм. При этом принимаются меры, устраняющие тепловые потери с торцевой поверхности образца за счет использования тепловой изоляции и охранных нагревателей.

Для нагревания пластины используются преимущественно электрические нагреватели, выполненные из нихрома и вольфрама. Температура горячей поверхности обычно составляет от 100 до 800 °С в зависимости от материала образца. Охлаждение поверхности образца, как правило, осуществляется проточной водой с температурой 20÷90 °С.

Существенным условием достоверного определения  $\lambda$  является отсутствие воздушных зазоров между поверхностью образца и плоскими



поверхностями нагревателя и холодильника. Ошибка в определении коэффициента теплопроводности за счет этого фактора может достигать 30 %. С целью уменьшения контактного термического сопротивления поверхности образца, нагревателя и холодильника подвергаются тщательной обработке: (шлифовка, полировка). Кроме этого, используются промежуточные порошкообразные материалы с хорошей проводимостью (графиты) для засыпки зазоров между образцом и рабочими поверхностями, а для обеспечения хорошего контакта создаются значительные сжимающие усилия.

Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности методом неограниченного цилиндрического слоя и методом шарового слоя принципиально не отличается от вышеизложенного метода плоского слоя. Только в этих случаях исследуемому образцу придают форму соответственно цилиндра или шара.

Методы исследования нестационарной теплопроводности базируются на частных решениях полного дифференциального уравнения теплопроводности [3]

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right),$$

полученных для тел простой геометрической формы и определенных граничных условий.

Основным параметром, характеризующим процесс нестационарной теплопроводности, является коэффициент температуропроводности [6]

$$a = \frac{\lambda}{C \cdot \rho}, \text{ м}^2/\text{с},$$

где  $\lambda$  – теплопроводность материала, Вт/(м·°С);  $C$  – теплоемкость материала, Дж/(кг·°С);  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>.

*Коэффициент температуропроводности* характеризует скорость выравнивания температуры при нагревании или охлаждении тела и имеет такое же значение, как и коэффициент теплопроводности для стационарного режима.

Процесс нагревания или охлаждения твердого тела можно разделить на *три стадии*.

На первой стадии процесс характеризуется резкой неравномерностью распределения температур, температурное поле в теле имеет случайный характер и скорость изменения температур в отдельных точках неравномерна. Эта стадия носит название *режима неупорядоченного процесса*.

С течением времени влияние резких неравномерностей в температурном поле сглаживается. По истечении достаточного количества времени скорость изменения температуры во всех точках тела становится постоянной. Эта стадия называется *режимом упорядоченного процесса*, или *регулярным режимом* [7].

И, наконец, когда пройдет достаточно большое время, система вступает в третью стадию – *стационарного теплового режима*. Температура тела становится равной температуре окружающей среды, и система приходит в состояние теплового равновесия.

Как правило, при решении практических задач нестационарного теплообмена рассматривается вторая стадия – стадия регулярного режима, теория которого разработана Г. М. Кондратьевым.

Сущность метода заключается в следующем: если выбрать внутри тела какую-либо точку и в процессе охлаждения тела в среде с постоянной температурой и достаточно высоким коэффициентом теплоотдачи, измерять в этой точке температуру в зависимости от времени, то в результате, можно построить график охлаждения в полулогарифмических координатах, приведенный на рис. 1.1.

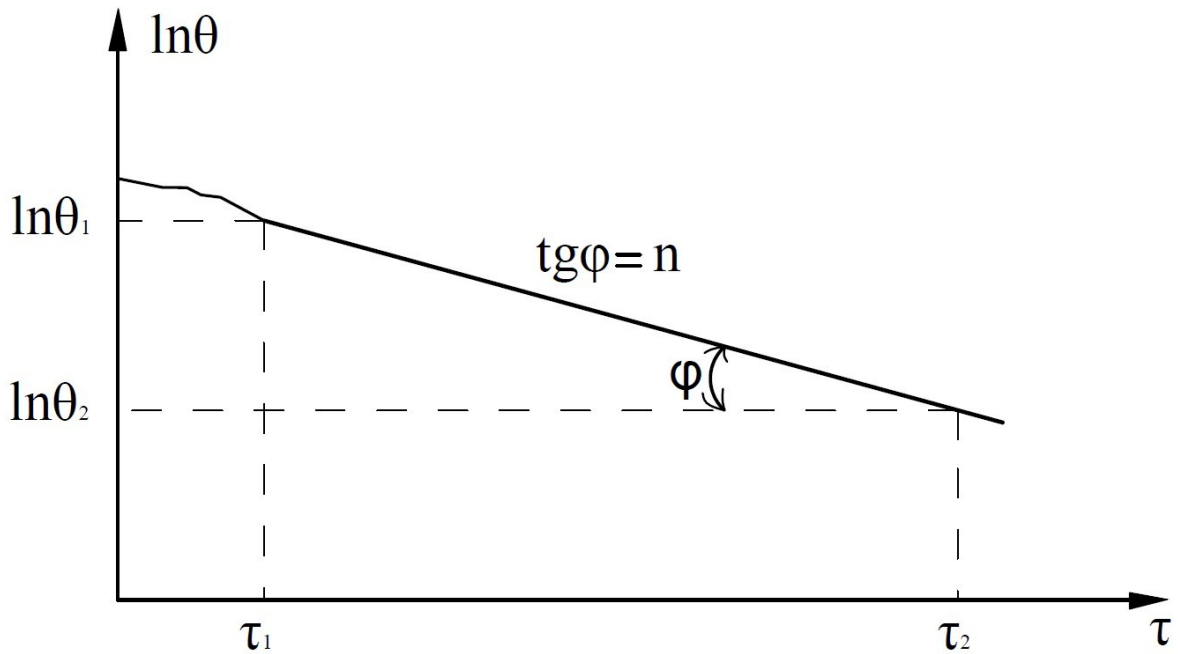


Рис.1.1. Кривая охлаждения

По оси абсцисс откладывается время охлаждения  $\tau$ , а по оси ординат –  $\ln\theta$ , где  $\theta = t_{\text{обр}} - t_{\text{окр}}$  представляет собой разность температур образца и окружающей среды в определенные моменты времени.

Линия  $\ln\theta = f(\tau)$  при наступлении регулярного режима переходит в прямую, т. е. охлаждение тела в этой области характеризуется тем, что относительное изменение температуры в любой точке в единицу времени подчиняется линейному закону. Относительная скорость изменения температуры тела, называемая *темпом охлаждения*  $m$ , определяется из приведенного графика как тангенс угла наклона кривой охлаждения к оси абсцисс

$$m = \frac{\ln \theta_1 - \ln \theta_2}{\tau_2 - \tau_1},$$

где  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – значения температурных разностей ( $t_{\text{обр}} - t_{\text{окр}}$ ), соответствующие точкам 1 и 2;  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – отрезки времени, соответствующие этим точкам, с.

При регулярном режиме величина  $m$  постоянна для всех точек системы и не зависит от времени.

## Лабораторная работа №1

### Определение коэффициента теплопроводности изоляционных материалов методом пластины

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.2.

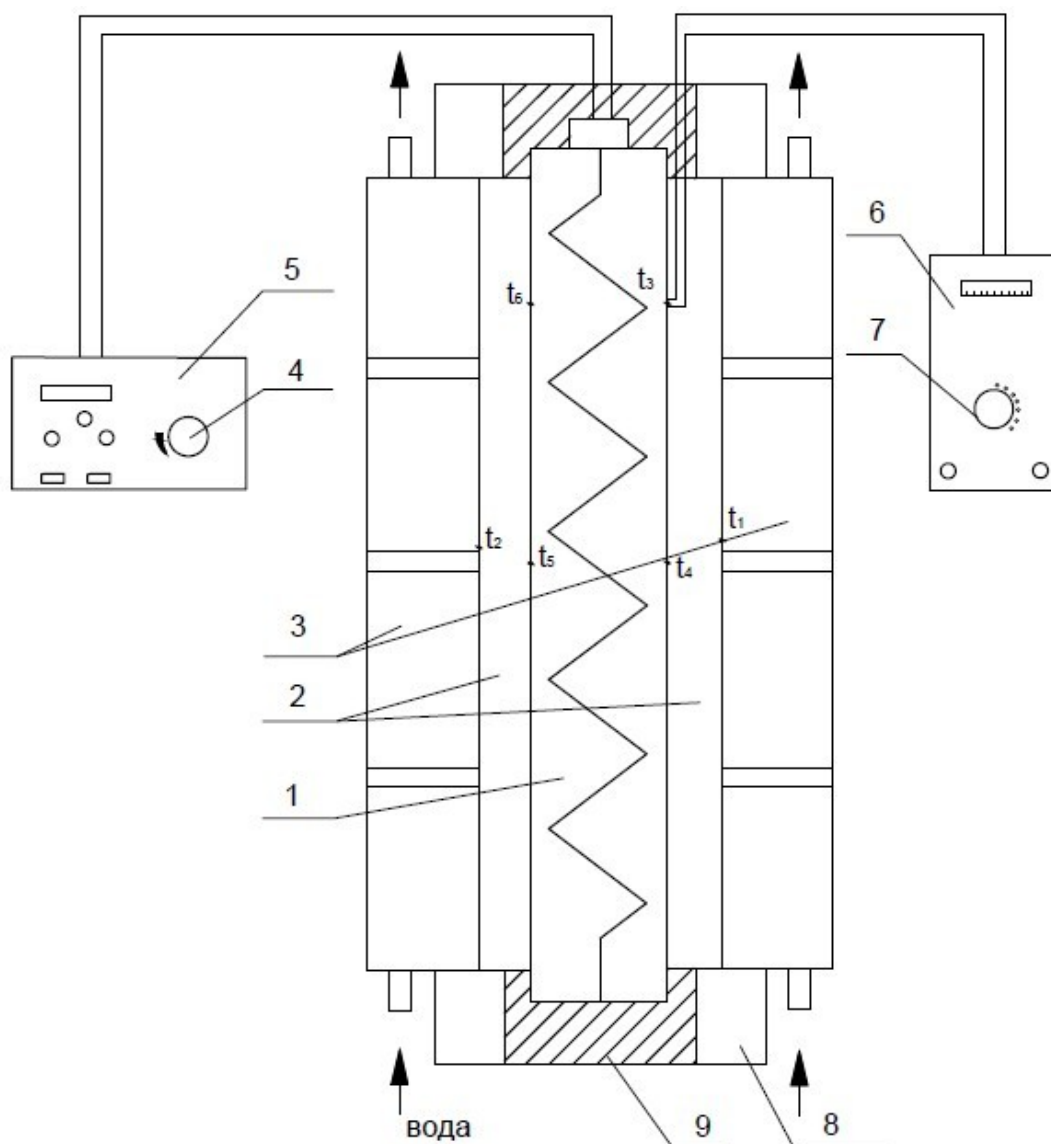


Рис. 1.2. Схема установки для определения коэффициента теплопроводности изоляционного материала методом пластины

## Описание экспериментальной установки

Установка состоит из нагревателя 1 и двух холодильников 3, между которыми расположены образцы исследуемого материала 2, выполненные в форме дисков диаметром  $d = 140$  мм и толщиной  $\delta = 5$  мм.

Для снижения радиальных тепловых потерь нагреватель 1 изолирован асбестоцементным кольцом 9 и асбестовым покрытием 8.

Холодильник 3 предназначен для охлаждения наружной поверхности исследуемого образца и изготовлен из двух симметричных цилиндров. Водяной тракт цилиндров выполнен в виде спиралей для направления циркуляции проточной воды.

К нагревателю подводится переменное напряжение, регулируемое автотрансформатором 4 и измеряемое цифровым прибором на блоке мощности 5. При напряжении на выходе автотрансформатора выше номинального происходит автоматическое отключение нагрузки.

Система измерения температуры поверхностей образцов состоит из шести хромель-копелевых термопар ( $t_1 \div t_6$ ) и блока температур 6 с переключателем термопар 7. Со стороны нагревателя на внутренних поверхностях образцов установлены термопары ( $t_3, t_4, t_5, t_6$ ), а со стороны холодильника на наружных поверхностях образцов – ( $t_1, t_2$ ).

Электродвижущая сила термопар измеряется прибором на блоке температур 6. Внутри блока находится устройство для компенсации электродвижущей силы холодных концов термопар.

## Порядок проведения работы

Перед началом работы следует ознакомиться с установкой и порядком включения измерительных приборов в соответствии с инструкцией по эксплуатации.

**Внимание!!!** Перед включением установки необходимо открыть вентиль для подачи охлаждающей воды.

Для проведения первого опыта на цифровом приборе мощности устанавливается начальное напряжение (по заданию преподавателя). Рекомендуемое начальное напряжение  $U = 35 \div 40$  В.

После выхода установки на *стационарный режим* снимаются показания термопар ( $t_1 \div t_6$ ) и заносятся в журнал наблюдений.

Затем, изменив мощность нагревателя, вновь добиваются стационарного режима и проводят комплекс аналогичных измерений.

Контроль над установлением стационарного режима осуществляется по показаниям любой из термопар до достижения постоянной температуры.

В объеме работы проводятся 5 ÷ 6 опытов, начиная с минимальной мощности нагревателя.

По окончании работы установка приводится в исходное положение. Вентиль подачи охлаждающей воды зарывается в последнюю очередь.

Форма журнала наблюдений приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Журнал наблюдений

№ п/п	Измерения							Результаты расчета						
	U	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>	t <sub>6</sub>	W	Q	t <sup>cp</sup> <sub>в</sub>	t <sup>cp</sup> <sub>н</sub>	Δt	t <sub>cp</sub>	λ
	В	°С	°С	°С	°С	°С	°С	Вт	Вт	°С	°С	°С	°С	Вт/(м·°С)
1														
2														
·														
·														
·														

### Обработка результатов

Коэффициент теплопроводности определяется по формуле

$$\lambda = \frac{Q \cdot \delta}{F \cdot \Delta t}, \text{ Вт/м} \cdot \text{°С},$$

где Q – тепловой поток через опытный образец, Вт ; δ – толщина опытного образца, м ; F – площадь поверхности опытного образца, м<sup>2</sup> ; Δt – разность температур на внутренней и наружной поверхностях опытного образца, °С.

Тепловой поток, проходящий через каждый опытный образец, определяется по мощности электрического нагревателя

$$Q = \frac{W}{2}, \text{ Вт.}$$

Мощность электрического нагревателя

$$W = \frac{U^2}{R}, \text{ Вт.},$$

где  $U$  – напряжение цепи электронагревателя, В ;  $R = 40$  Ом – сопротивление цепи.

Площадь поверхности опытного образца составляет

$$F = \frac{\pi d^2}{4}, \text{ м}^2.$$

Разность температур на внутренней и наружной поверхностях образца

$$\Delta t = t_{\text{в}}^{\text{ср}} - t_{\text{н}}^{\text{ср}},$$

где  $t_{\text{в}}^{\text{ср}} = \frac{t_3 + t_4 + t_5 + t_6}{4}$ ,  $t_{\text{н}}^{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2}{2}$ , °С .

Средняя температура образца составит

$$t_{\text{ср}} = (t_{\text{в}}^{\text{ср}} + t_{\text{н}}^{\text{ср}}) / 2, \text{ °С.}$$

По результатам опытов строится график зависимости  $\lambda = f(t_{\text{ср}})$ . Полученные значения коэффициента теплопроводности сравниваются с литературными данными.

Характерный график зависимости коэффициента теплопроводности от температуры представлен на рис.1.3.

Рис. 1.3. График зависимости  $\lambda = f(t_{\text{ср}})$

## Оценка результатов методом наименьших квадратов

Метод наименьших квадратов (МНК) – один из базовых методов анализа для оценки неизвестных параметров регрессионных моделей по выборочным данным.

В основе метода наименьших квадратов лежит поиск таких значений коэффициентов регрессии, при которых сумма квадратов отклонений теоретического распределения от эмпирического была бы наименьшей

$$\sum (y_i - \tilde{y}_{x_i})^2 \rightarrow \min$$

Таким образом, из всего множества линий *линия регрессии* на графике (рис. 1.4) выбирается так, чтобы сумма квадратов расстояний по вертикали между экспериментальными точками и этой линией была бы минимальной

$$\varepsilon_i = y_i - \tilde{y}_{x_i},$$

следовательно

$$\sum \varepsilon_i^2 \rightarrow \min$$

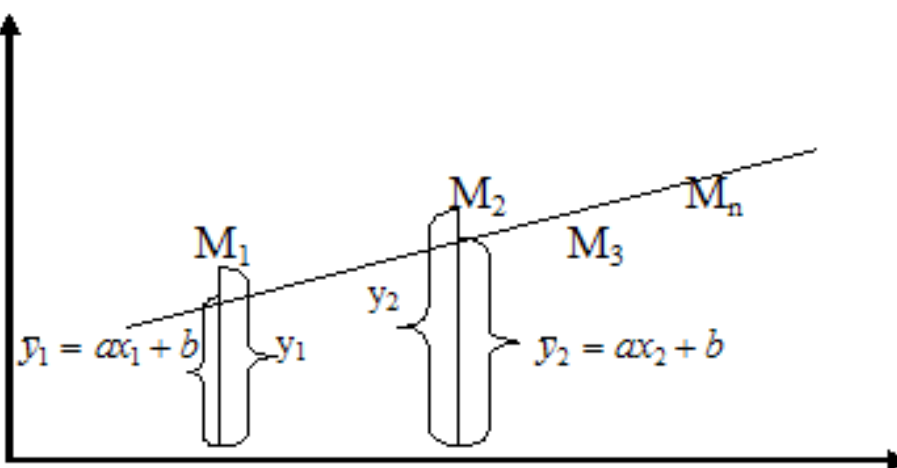


Рис. 1.4. Графическое отображение метода наименьших квадратов

Целью процедур линейной регрессии является подгонка прямой линии по точкам. А именно: необходимо построить линию регрессии так, чтобы минимизировать квадраты отклонений этой линии от наблюдаемых точек.



Поэтому на эту общую процедуру иногда ссылаются как на *оценивание по методу наименьших квадратов*.

Прямая линия на плоскости (в пространстве двух измерений) задается уравнением

$$y = ax + b .$$

### Метод наименьших квадратов для лабораторной работы №1

Метод наименьших квадратов предназначен для вычисления значений коэффициентов  $a$  и  $b$  для уравнения прямой

$$\lambda = a \cdot (t_{cp}) + b$$

из системы линейных уравнений

$$\begin{cases} P \cdot a + L \cdot b = M \\ L \cdot a + N \cdot b = T \end{cases} ,$$

где  $P = \sum_{i=1}^N x_i^2$  ,  $L = \sum_{i=1}^N x_i$  ,  $M = \sum_{i=1}^N (x_i \cdot y_i)$  ,  $T = \sum_{i=1}^N y_i$  ,

при этом  $x_i = (t_{cp})_i$  ,  $y_i = \lambda_i$  – значения из таблицы «Результаты расчета». Значение индекса суммирования  $i$  равно номеру строки в этой таблице;  $N$  – количество измерений (число строк в таблице).

Результаты расчетов по МНК сводятся в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Метод наименьших квадратов

N	$x_i = t_{cp}$	$y_i = \lambda_i$	$x_i^2$	$x_i \cdot y_i$
1				
2				
3				
4				
5				
$\Sigma$				
	L	T	P	M

## 2. Конвективный теплообмен

Понятие конвективного теплообмена охватывает процесс переноса теплоты при движении жидкости или газа в пространстве из области с одной температурой в область с другой температурой. Конвекция возможна только в текучей среде, в которой перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды.

Конвекция всегда сопровождается теплопроводностью, так как при движении жидкости или газа неизбежно происходит соприкосновение отдельных частиц, имеющих различные температуры. В результате конвективный теплообмен описывается уравнением [8]

$$q = -\lambda \text{grad}t + \rho W h, \quad (2.1)$$

где  $q$  – локальное значение плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>; первое слагаемое в правой части описывает перенос теплоты теплопроводностью ( $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С);  $\text{grad}t$  – градиент температуры, °С/м); второе слагаемое – конвекцией ( $\rho$  – плотность среды, м<sup>3</sup>/кг;  $W$  – скорость среды, м/с;  $h$  – теплосодержание среды, Дж/кг).

Движение среды обусловлено действием сил, которые в общем случае можно разделить на массовые (объёмные) и поверхностные. Массовыми называют силы, приложенные ко всем частицам среды и обусловленные внешними силовыми полями, например, гравитационным. Поверхностные силы возникают вследствие действия окружающей среды, например, силы внешнего давления и силы трения.

В общем случае математическое описание процесса конвективного теплообмена включает в себя систему дифференциальных уравнений энергии (теплопроводности), сплошности (неразрывности) и движения. Такая система уравнений описывает бесчисленное множество конкретных процессов.

Чтобы выделить рассматриваемый процесс, к системе дифференциальных уравнений необходимо присоединить условия однозначности, которые дают математическое описание всех частных особенностей рассматриваемого процесса.

Условия однозначности представляют собой следующую совокупность:

- геометрические условия, которые характеризуют форму и размеры тела;
- физические условия, характеризующие физические свойства среды;
- временные или начальные условия, определяющие особенности процесса в начальный момент времени (для нестационарных процессов);
- граничные условия, которые характеризуют особенности протекания процесса на границах текучей среды.

Аналитическое решение задач конвективного теплообмена сопряжено со значительными трудностями. Поэтому на практике такие задачи решают, как правило, методами экспериментального исследования. При этом расчётные зависимости получают в виде уравнений, составленных из обобщенных безразмерных переменных, или *критериев подобия*.

В качестве примера рассмотрим получение методом обобщенных переменных безразмерного комплекса, который называется критерием Нуссельта.

Плотность теплового потока, передаваемого конвекцией, определяется по уравнению Ньютона-Рихмана:

$$q = \alpha \Delta t, \quad (2.2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, характеризующий интенсивность теплообмена между потоком среды и поверхностью твердого тела, Вт/(м<sup>2</sup>·°С),  $\Delta t$  – разность температур между потоком и поверхностью тела, °С.

В тонком пристенном слое среды, у поверхности твёрдого тела, передача теплоты осуществляется теплопроводностью, и плотность теплового потока определяется по уравнению Фурье

$$q = |\lambda \text{grad}t|. \quad (2.3)$$

Приравнивая значения теплового потока из уравнений (2.2) и (2.3), в результате преобразований получим безразмерный комплекс – критерий Нуссельта

$$\frac{\alpha \cdot \Delta t}{\lambda \text{grad}t} \rightarrow \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = Nu, \quad (2.4)$$

Решение задач конвективного теплообмена, как правило, сводится к решению уравнение конвективного теплообмена в критериальном виде, которое записывается следующим образом [5]

$$Nu = f(Gr, Pr, Re), \quad (2.5)$$

где Gr, Pr, Re – критерии Грасгофа, Прандтля и Рейнольдса – определяющие критерии, которые могут быть заданы по условиям протекания процесса.

Различают *свободную* (естественную) и *вынужденную* конвекцию.

**Свободная конвекция** возникает в рассматриваемом пространстве за счёт неоднородности массовых сил. Если среда с неоднородным распределением температуры и, как следствие, с неоднородным распределением плотности находится в поле земного тяготения, то возникает естественное движение среды вдоль твердой поверхности за счёт разности плотностей менее и более нагретых частиц среды. При этом движущиеся частицы переносят теплоту, т.е. возникает процесс конвективного теплообмена.

Движение среды около твердых тел при естественной конвекции в значительной степени зависит от их расположения в пространстве и геометрических размеров.

*Экспериментальному исследованию теплообмена при свободном движении воздуха для вертикальной и горизонтальной труб посвящены лабораторные работы №2 и №3.*

Структура свободного движения воздуха около вертикальной и горизонтальной труб представлена соответственно на рис. 2.1 и 2.2.

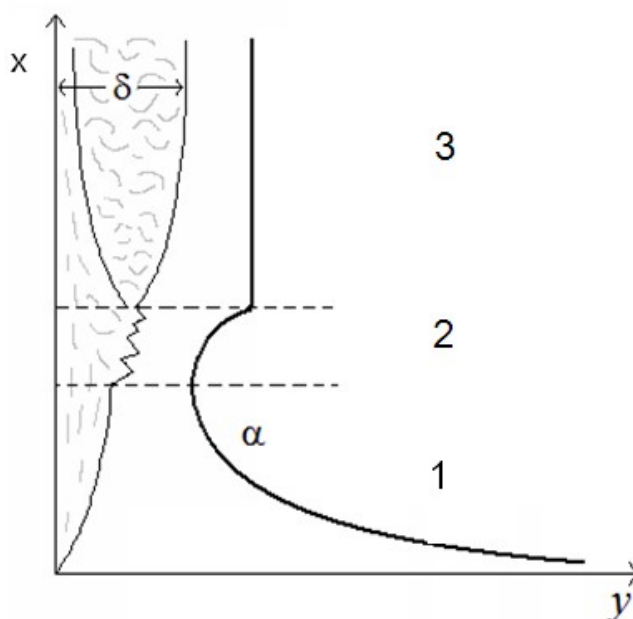


Рис. 2.1. Изменение коэффициента теплоотдачи при свободном движении вдоль нагретой вертикальной трубы (стенки):

$\delta$  - толщина пограничного слоя; 1 - зона ламинарного течения воздуха; 2 - зона переходного течения воздуха; 3 - зона турбулентного течения воздуха

На нижнем участке вертикальной трубы воздух поднимается с небольшой скоростью, наблюдается ламинарный режим течения. Толщина ламинарного слоя увеличивается по мере движения воздуха вверх вдоль трубы. Затем происходит разрушение ламинарного слоя, в переходной области – резкое увеличение толщины пограничного слоя и постепенный переход к турбулентному режиму и его стабилизации, при этом толщина пограничного слоя остаётся неизменной (см. рис. 2.1).

В соответствии с изменением характера движения воздуха изменяется и коэффициент теплоотдачи по высоте трубы. На начальном участке трубы коэффициент теплоотдачи убывает по высоте в связи с увеличением толщины ламинарного слоя и соответствующим увеличением термического сопротивления. По мере перехода ламинарного режима в вихревой коэффициент теплоотдачи возрастает и стабилизируется на определенном уровне.

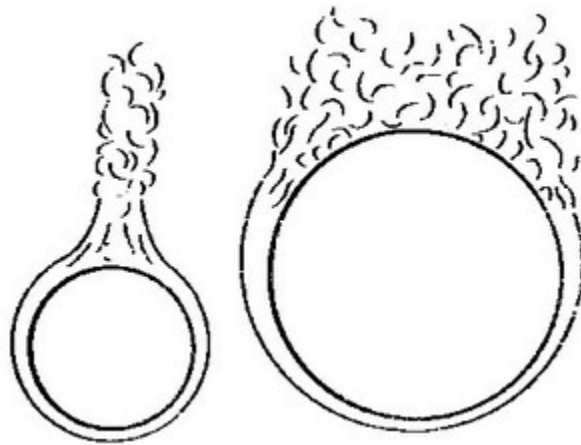


Рис. 2.2. Структура свободного движения воздуха около нагретых горизонтальных труб:  
а) малого диаметра; б) большого диаметра

Для горизонтальных труб ламинарный режим движения воздуха имеет место в нижней части трубы. Протяженность ламинарного режима зависит от диаметра трубы. При прочих равных условиях, чем больше диаметр трубы, тем вероятнее разрушение ламинарного слоя. У труб малого диаметра разрушение ламинарного слоя происходит вдали от трубы (см. рис. 2.2а).

Уравнение конвективного теплообмена в критериальной форме для теплообмена при свободном движении воздуха записывается в виде степенного комплекса

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n, \quad (2.6)$$

где  $Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$  – критерий Нуссельта;

$Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t$  – критерий Грасгофа;

$Pr = \frac{\nu}{a}$  – критерий Прандтля.

В критерии подобия входят следующие параметры:

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от нагретой стенки к воздуху, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

$l$  – определяющий линейный размер, в качестве которого принимается либо *высота* – для вертикальных труб и стен, либо *наружный диаметр* – для горизонтальных труб, м;

$\lambda$ , Вт/(м·°С);  $\nu$ , м<sup>2</sup>/с;  $a$ , м<sup>2</sup>/с – соответственно коэффициенты теплопроводности, кинематической вязкости, температуропроводности воздуха при температуре окружающего воздуха вдали от стенки трубы;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\Delta t = t_{ст} - t_{в}$  – температурный напор, °С;

$\beta = \frac{1}{273 + t_{с}}$  – коэффициент объёмного расширения, К<sup>-1</sup>;

В выражении (2.6)  $C$  и  $n$  – соответственно коэффициент пропорциональности и показатель степени, которые являются постоянными величинами и определяются экспериментально.

В рамках лабораторных работ №2 и №3 коэффициенты  $C$  и  $n$  определяются по опытным данным из графика, построенного в логарифмических координатах  $\lg Nu = f(\lg(Gr \cdot Pr))$ . При обработке опытных данных в таких координатах зависимость (2.6) представляет собой прямую линию, которая описывается уравнением

$$\lg Nu = \lg C + n \cdot \lg(Gr \cdot Pr). \quad (2.7)$$

Графически логарифмическая зависимость этого уравнения представлена на рис.2.3.

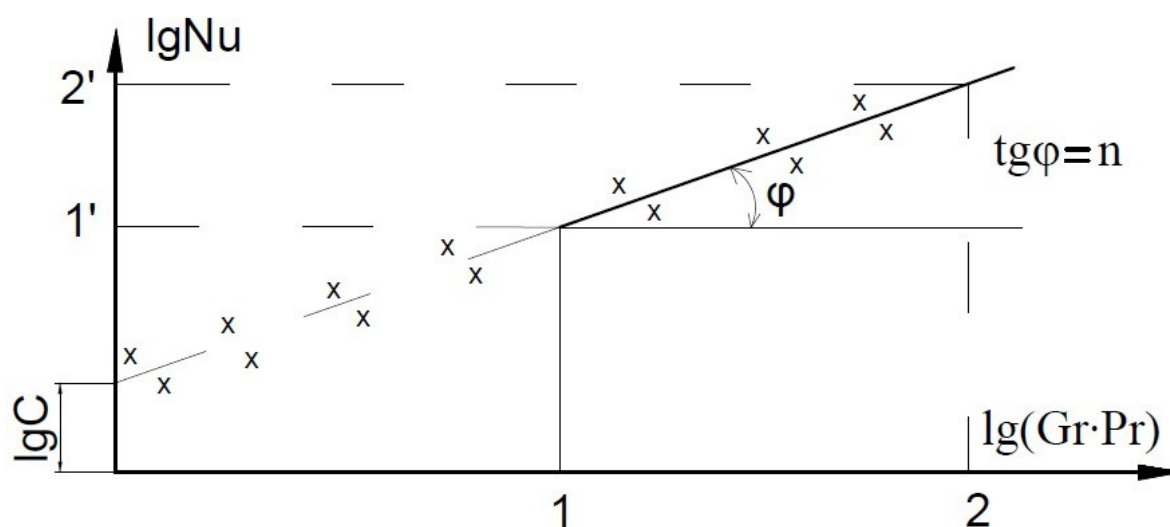


Рис. 2.3. Логарифмическая зависимость к определению констант  $C$  и  $n$ :  $x$  – опытные точки

По экспериментальным точкам проводят осредняющую прямую линию. Расстояние между точкой пересечения осредняющей прямой с осью ординат  $\lg Nu$  и началом координат дает величину  $\lg C$ . Показатель степени  $n$  представляет собой тангенс угла наклона осредняющей прямой к оси абсцисс и определяется по уравнению

$$n = \operatorname{tg} \varphi = \frac{\lg Nu_2 - \lg Nu_1}{\lg (Gr \cdot Pr)_2 - \lg (Gr \cdot Pr)_1}$$

$$n = \operatorname{tg} \varphi = \frac{(\lg Nu)_2 - \lg Nu_1}{\lg (Gr \cdot Pr)_2 - \lg (Gr \cdot Pr)_1} \quad (2.8)$$

При найденном значении показателя степени  $n$  коэффициент пропорциональности  $C$  может быть определен и из выражения (2.6)

$$C = \frac{Nu}{(Gr \cdot Pr)^n} \quad (2.9)$$

По литературным данным уравнение (2.6) имеет вид:

*для горизонтальной трубы*

$$Nu = 0,5 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} \quad \text{при } Gr \cdot Pr = 10^3 \div 10^9; \quad (2.10)$$

*для вертикальной трубы (стенки)*

$$Nu = 0,75 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} \quad \text{при } Gr \cdot Pr = 10^3 \div 10^9; \quad (2.11)$$

$$Nu = 0,15 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,33} \quad \text{при } Gr \cdot Pr > 6 \cdot 10^{10}. \quad (2.12)$$

**Вынужденная** конвекция происходит под действием внешних поверхностных сил за счёт предварительно сообщённой кинетической энергии, (например, посредством работы насоса, вентилятора, ветра). Вынужденное движение в общем случае может сопровождаться свободным движением, влияние которого тем больше, чем больше разница температур отдельных частиц среды и чем меньше скорость вынужденного движения. При больших скоростях влияние свободной конвекции становится пренебрежимо малым.



Теплообмен в случае вынужденной конвекции зависит от физических свойств жидкости, её температуры, скорости, режима движения, формы и размеров канала, способа омывания потоком поверхности теплообмена (продольное или поперечное) и т.п.

*Задача по экспериментальному исследованию теплообмена и гидравлического сопротивления при вынужденном продольном течении воздуха внутри трубы рассматривается при выполнении лабораторной работы №4.*

Различают два основных режима движения жидкости: *ламинарный* и *турбулентный*. Характер изменения скорости потока в поперечном сечении круглой трубы приведён на рис. 2.4.

*Ламинарный режим* реализуется при малых скоростях потока, малых размерах канала, преимущественно для вязких жидкостей и характеризуется спокойным, параллельно-струйным течением. *Турбулентный режим* характеризуется хаотичностью, неупорядоченностью движения при больших скоростях [2].

При ламинарном режиме скорость изменяется по закону параболы, при турбулентном режиме кривая изменения скорости имеет вид усеченной параболы. Вблизи стенки при турбулентном режиме образуется ламинарный пограничный слой, толщина которого уменьшается с увеличением скорости потока.

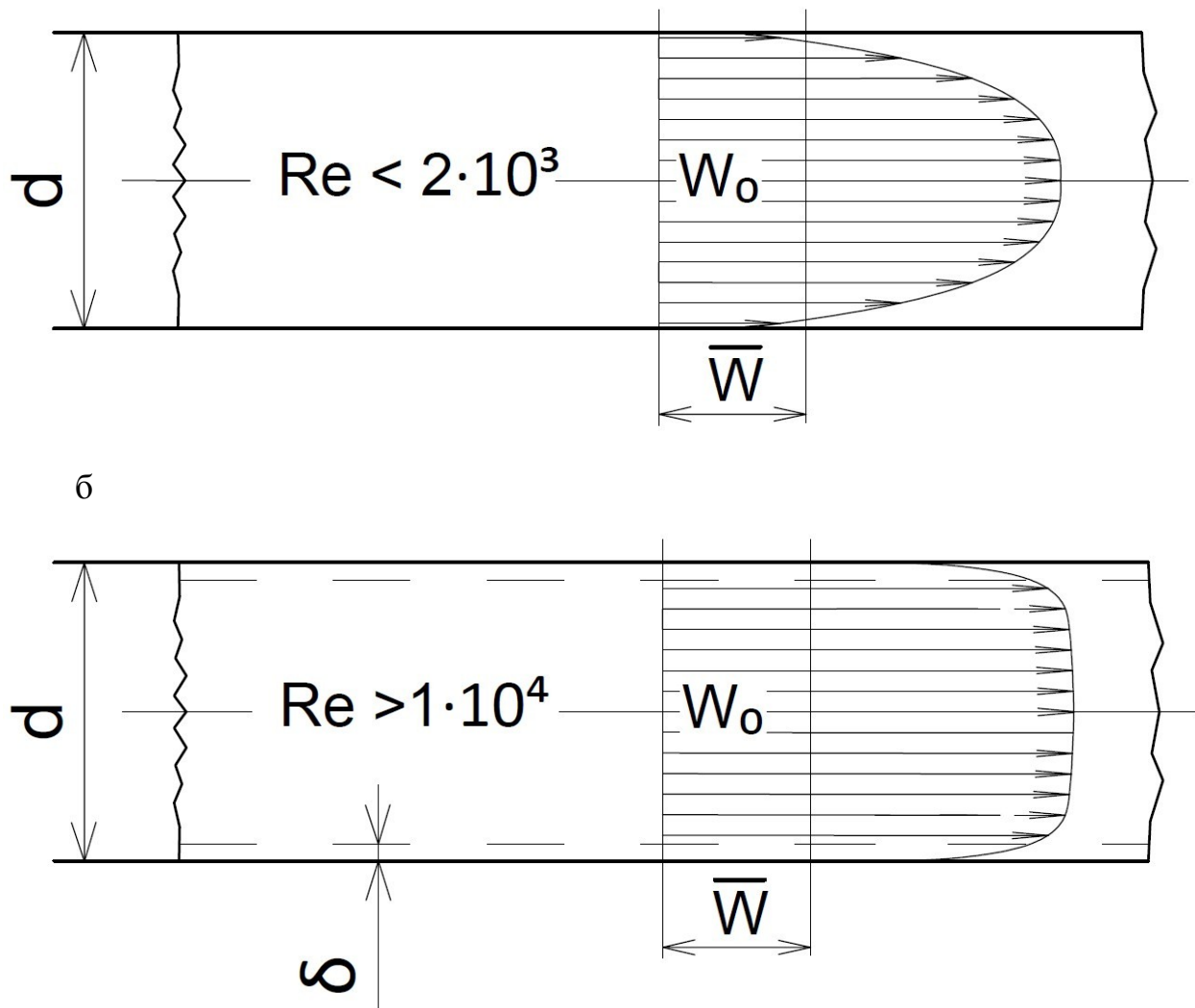


Рис. 2.4. Распределение скорости потока по сечению круглой трубы при различных режимах движения:  
а - ламинарный, б - турбулентный

Указанное распределение скорости справедливо для стабилизированного движения, которое наступает на расстоянии  $(30 \div 60)d$  от входа потока в трубу. На участке от входа до начала стабилизации характер движения претерпевает большие изменения. В соответствии с этим изменяется значение коэффициента теплоотдачи по длине трубы. На начальном участке коэффициент теплоотдачи имеет наибольшее значение, на последующих участках длины он убывает, стремясь к некоторому предельному значению, которое для стабилизированного участка становится постоянным.

Переход от ламинарного режима к турбулентному в случае движения жидкости внутри трубы осуществляется при значениях числа  $Re$  более 2300.

При турбулентном режиме течения происходит непрерывное образование вихрей. Причиной вихреобразования может быть внезапное торможение частиц движущейся среды при встрече с каким-либо препятствием. Вследствие вязкости среды вихри постепенно затухают и исчезают. Таким образом, при турбулентном движении происходит непрерывное перемешивание среды. Чем больше образуется вихрей, тем интенсивнее происходит перемешивание, тем выше турбулентность потока и, следовательно, интенсивнее теплоотдача.

Критериальное уравнение для определения коэффициента теплоотдачи при движении любой капельной жидкости внутри трубы имеет вид [8]

$$Nu_{\pi} = C \cdot Gr_{\pi}^{n_1} \cdot Re_{\pi}^{n_2} \cdot Pr_{\pi}^{n_3} \cdot \left( \frac{Pr_{\pi}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}, \quad (2.13)$$

где экспериментально определённые коэффициенты  $C$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  зависят от режима движения жидкости; индексы « $n$ » (поток) и « $ст$ » (стенка) определяют температуру, по которой определяются физические параметры.

Поскольку критерий Прандтля для воздуха практически не зависит от температуры ( $Pr = 0,7$ ), критериальное уравнение в этом случае упрощается и, в зависимости от режима движения среды, принимает следующий вид:  
для ламинарного режима

$$Nu = c \cdot Re^n \cdot Gr^{0,1}, \quad (2.14)$$

для переходного и турбулентного режима

$$Nu = c \cdot Re^n, \quad (2.15)$$

где  $Re = wl/\nu$  – критерий Рейнольдса.

В критериях подобия в качестве определяющего линейного размера  $l$  принимается внутренний диаметр трубы  $d_{вн}$ , в качестве определяющей скорости  $w$  – средняя скорость потока по сечению трубы.

Значения коэффициентов  $C$  и  $n$  в выражениях (2.14) и (2.15) определяются по опытным данным из графиков, построенных

соответственно в координатах  $\lg \frac{Nu}{Gr} - \lg Re$  или  $\lg Nu - \lg Re$ .

В таких координатах зависимости (2.14) и (2.15) представляют собой прямые линии, которые описываются уравнениями

$$\lg \frac{Nu}{Gr^{0,1}} = \lg C + n \lg Re$$

или

$$\lg Nu = \lg C + n \lg Re$$

Методика определения  $C$  и  $n$  аналогична вышеизложенной для решения уравнения (2.7).

По литературным данным [1] уравнения (2.14) и (2.15) имеют вид:

$$\begin{aligned} \text{при } Re < 2300 \quad Nu &= 0,13 \cdot Re^{0,33} \cdot Gr^{0,1}, \\ \text{при } Re > 2300 \quad Nu &= 0,018 \cdot Re^{0,8}. \end{aligned} \quad (2.16)$$

При оценке эффективности конвективного теплообмена большое значение имеют гидравлические сопротивления, возникающие при движении среды. С увеличением скорости потока увеличиваются затраты мощности на сопротивление.

В зависимости от природы возникновения различают *местные сопротивления* и *сопротивление трения*.

*Местные сопротивления* возникают в местах изменения сечения канала и при преодолении отдельных препятствий: например, при входе, выходе, сужении, расширении, повороте и т.д. Потери напора на местные сопротивления определяются по формуле

$$\Delta P = \Sigma \psi \frac{\rho \cdot w^2}{2}, \text{ Па}$$

$$(2.17)$$

где  $\Sigma \psi$  – сумма коэффициентов местного сопротивления;  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $w$  – средняя скорость потока, м/с.

*Сопротивление трения* обусловлено вязкостью среды. В практических расчётах сопротивление трения в трубах и каналах определяется по формуле Дарси

$$\Delta P = \zeta \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2}, \text{ Па} \quad (2.18)$$

где  $\zeta$  – коэффициент сопротивления трению;  $l$  – длина канала, м;  $d$  – внутренний диаметр, м.

Коэффициент сопротивления трению является функцией критерия Рейнольдса и может быть определён из графика Никурадзе, полученного на основе результатов опытов.

Для ламинарного режима движения указанная зависимость записывается в соответствии с законом Пуазейля

$$\zeta = \frac{A}{\text{Re}}, \quad (2.19)$$

где  $A$  – коэффициент формы канала (для круглых труб  $A = 64$ ).

Для турбулентного режима движения зависимость от числа Рейнольдса записывается в соответствии с законом Блазиуса

$$\zeta = \frac{C}{\text{Re}^n}. \quad (2.20)$$

Значения  $C$  и  $n$  в этом случае определяются по опытными данным из графиков, построенных в координатах  $(\lg \zeta - \lg \text{Re})$ . В таких координатах указанная зависимость представляет собой прямую линию, описываемую уравнением

$$\lg \zeta = \lg c + n \lg \text{Re}.$$

Методика определения  $C$  и  $n$  аналогична вышеизложенной для решения уравнения (2.7). По литературным данным [1] в диапазоне изменения критерия Рейнольдса от  $3 \cdot 10^3$  до  $10^5$   $C = 0,3164$ ,  $n = 0,25$ .

Целью лабораторных работ является углубление знаний по конвективному теплообмену, приобретение методических и практических навыков в проведении исследований по влиянию различных факторов на

теплообмен и сопротивление, ознакомление с основными методами обработки опытных данных.

## Лабораторная работа №2

### Определение коэффициента теплоотдачи при свободном движении от стенки вертикальной трубы к воздуху

#### Описание экспериментальной установки

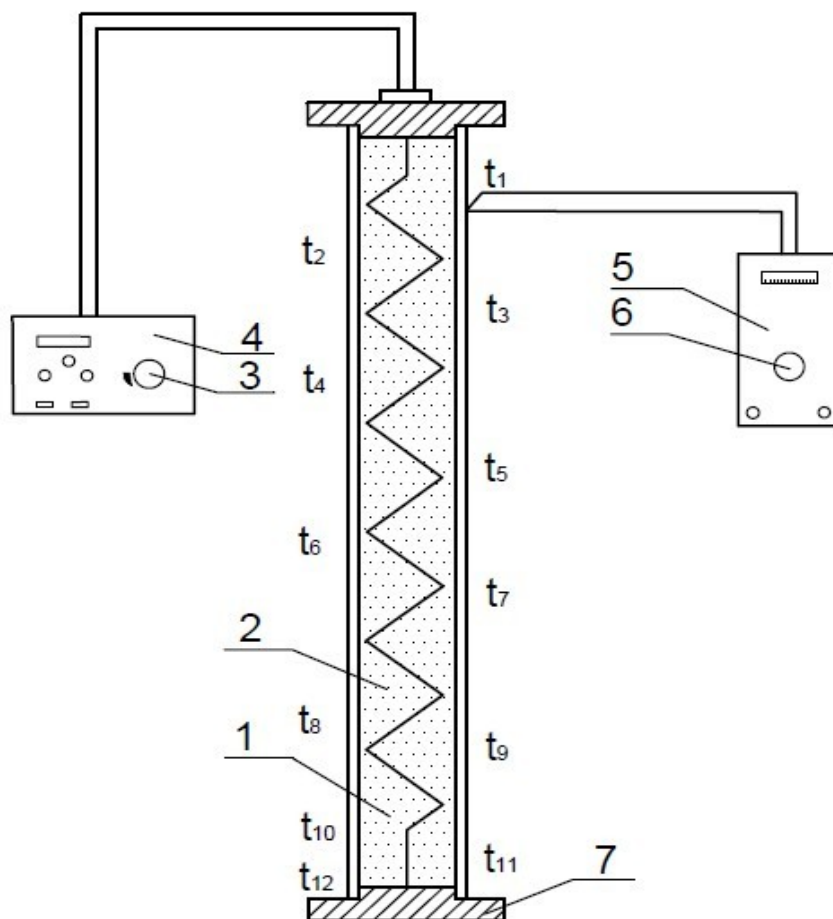


Рис. 2.5. Схема установки для определения коэффициента теплоотдачи при свободном движении от стенки вертикальной трубы к воздуху

Установка представляет собой вертикально расположенную трубу 1, изготовленную из нержавеющей стали, наружным диаметром  $d_n = 40$  мм, высотой  $H = 1600$  мм и толщиной стенки  $\delta = 1$  мм.

Внутри трубы установлен электрический нагреватель 2. Регулирование подводимого к экспериментальному участку напряжения осуществляется автотрансформатором 3 на блоке мощности 4. При напряжении на выходе автотрансформатора выше номинального происходит автоматическое отключение нагрузки.

Система измерений температур поверхности трубки состоит из двенадцати ( $t_1 - t_{12}$ ) хромель-копелевых термопар, равномерно расположенных по высоте трубы, и блока температур 5 с переключателем термопар 6.

Для определения местных значений коэффициента теплоотдачи предусмотрены две передвижные термопары (на схеме не показаны).

Во избежание торцевых потерь теплоты концы трубы закрыты изоляционными заглушками 7.

Электродвижущая сила термопар измеряется прибором на блоке температур. Внутри блока находится устройство для компенсации электродвижущей силы холодных спаев термопар.

## **Порядок проведения работы**

Перед началом работы следует ознакомиться с установкой и последовательностью включения приборов, изложенной в инструкции по эксплуатации.

Для проведения первого опыта на цифровом приборе блока мощности по заданию преподавателя устанавливается начальное напряжение.

После выхода установки на стационарный режим для определения мощности измеряются падение напряжения  $U$ , сила тока  $I$  в сети электронагревателя, температуры стенки  $t_1 - t_{12}$ .





3																				
...																				

Таблица 2.2

Результаты расчета

№ п/п	$t_{ст}^{cp}$	$\Delta t$	I	Q	$Q_{л}$	$Q_{к}$	$\alpha$	Nu	Gr	Gr·Pr	lgNu	lg(Gr·Pr)
	°C	°C	A	Вт	Вт	Вт	$\frac{Вт}{м^2 \cdot °C}$	-	-	-	-	-
1												
2												
3												
...												

**Обработка результатов**

Коэффициент теплоотдачи конвекцией от стенок трубы к окружающему воздуху:

$$\alpha = \frac{Q_{к}}{F \cdot \Delta t}, \quad \frac{Вт}{м^2 \cdot °C},$$

где  $Q_{к} = Q - Q_{л}$  – конвективный тепловой поток от поверхности трубы к окружающему воздуху, Вт;

$F = \pi \cdot d_{н} \cdot H$  – поверхность трубы, м<sup>2</sup>;

$\Delta t = t_{ст}^{cp} - t_{в}$  – разность между средней температурой поверхности трубы и окружающего воздуха, °C.

Суммарный конвективный и лучистый тепловой поток от стенки трубы к окружающему воздуху определяется мощностью электрического нагревателя:

$$Q = U \cdot I, \text{ Вт.}$$

Лучистый тепловой поток рассчитывается в соответствии с законом Стефана-Больцмана:

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon \times C_0 \times \left[ \left( \frac{T_{\text{ст}}^{\text{cp}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{в}}}{100} \right)^4 \right] \times F, \text{ Вт}$$

где  $\varepsilon = 0,15$  – степень черноты поверхности трубы;

$C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела;

$T_{\text{ст}}^{\text{cp}} = t_{\text{ст}}^{\text{cp}} + 273$  – средняя температура стенки трубы, К;

$T_{\text{в}} = t_{\text{в}} + 273$  – температура окружающего воздуха, К;

$F$  – поверхность трубы,  $\text{м}^2$ .

Средняя температура стенки:

$$T_{\text{ст}}^{\text{cp}} = \left( \sum_{i=1}^{i=12} \frac{t_{\text{ст}i}}{12} \right) + 273, \text{ К} .$$

По результатам опытов строится график критериальной зависимости  $\lg Nu = f(\lg Gr \cdot Pr)$ , пример которой приведён на рис. 2.6.

Рис. 2.6. График зависимости  $\lg Nu - \lg(Gr \cdot Pr)$

Определяющим геометрическим размером в критериях подобия является высота трубы  $H$ .

Физические параметры, входящие в критерии подобия, определяются по температуре окружающего воздуха  $t_{\text{в}}$ .

С помощью графика определяется показатель степени  $n$  (формула 2.8) и коэффициент пропорциональности  $C$  (формула 2.9).

Полученные результаты сравниваются с литературными данными [1].

## Метод наименьших квадратов для лабораторной работы №2

Метод наименьших квадратов предназначен для вычисления значений коэффициентов  $C$  и показателя степени  $n$  для уравнения логарифмической прямой

$$\lg Nu = n \cdot \lg(\text{Gr} \cdot \text{Pr}) + \lg C$$

из системы линейных уравнений

$$\begin{cases} P \cdot n + L \cdot \lg C = M \\ L \cdot n + N \cdot \lg C = T \end{cases},$$

где  $P = \sum_{i=1}^N x_i^2$ ,  $L = \sum_{i=1}^N x_i$ ,  $M = \sum_{i=1}^N (x_i \cdot y_i)$ ,  $T = \sum_{i=1}^N y_i$ ,

при этом  $x_i = \lg(\text{Gr} \cdot \text{Pr})_i$ ,  $y_i = \lg Nu_i$  – значения из таблицы «Результаты расчета». Значение индекса суммирования  $i$  равно номеру строки в этой таблице;  $N$  – количество измерений (число строк в таблице).

Результаты расчетов по МНК сводятся в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Метод наименьших квадратов

N	$x_i = \lg(\text{Gr} \cdot \text{Pr})_i$	$y_i = \lg Nu_i$	$x_i^2$	$x_i \cdot y_i$
1				
2				
3				
...				
$\Sigma$				
	L	T	P	M

## Лабораторная работа №3

**Определение коэффициента теплоотдачи при свободном движении от стенки горизонтальной трубы к воздуху**

## Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.7.

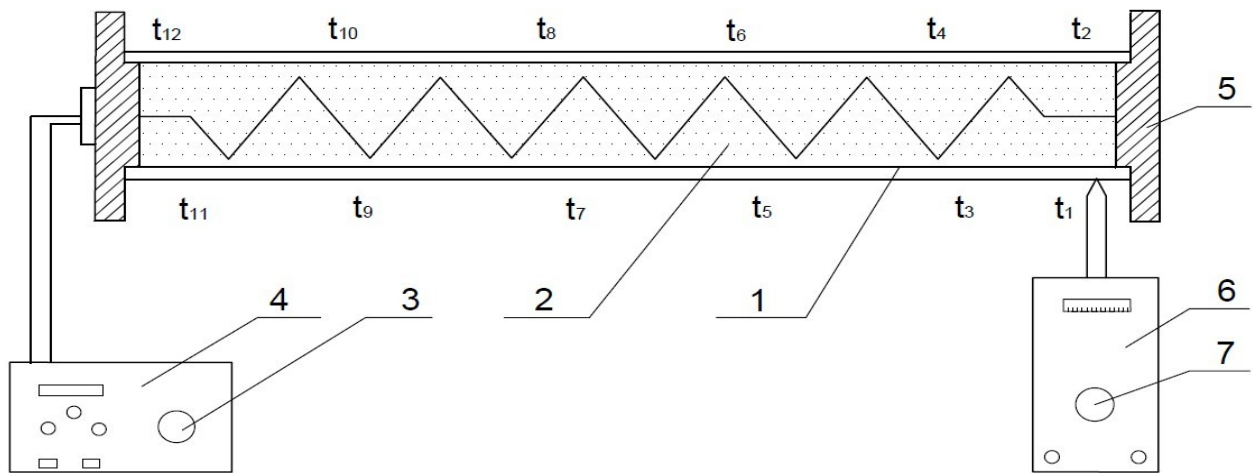


Рис. 2.7. Схема установки для определения коэффициента теплоотдачи при свободном движении от стенки горизонтальной трубы к воздуху

Установка представляет собой горизонтально расположенную трубу 1, изготовленную из нержавеющей стали, наружным диаметром  $d_n = 20$  мм, длиной  $l = 854$  мм и толщиной стенки  $\delta = 0,5$  мм.

Внутри трубы установлен электрический нагреватель 2. Регулирование подводимого к экспериментальному участку напряжения осуществляется автотрансформатором 3 на блоке мощности 4. При напряжении на выходе автотрансформатора выше номинального происходит автоматическое отключение нагрузки.

Система измерений температур поверхности теплообменной трубки состоит из двенадцати хромель-копелевых термопар ( $t_1 - t_{12}$ ), равномерно расположенных по длине трубы, и блока температур 6 с переключателем термопар 7. Во избежание торцевых потерь теплоты концы трубы закрыты теплоизоляционными заглушками 5.

Электродвижущая сила термопар измеряется прибором на блоке температур. Внутри блока находится устройство для компенсации силы холодных спаев термопар.

## Порядок проведения работы

Перед началом работы следует ознакомиться с установкой и последовательностью включения приборов, изложенной в инструкции по эксплуатации.

Для проведения первого опыта на цифровом приборе блока мощности по заданию преподавателя устанавливается начальное напряжение.

После выхода установки на стационарный режим измеряется падение напряжения  $U$ , сила тока  $I$  в сети электронагревателя и температуры стенки  $t_1 - t_{12}$ . Измерение силы тока производится через шунт постоянного тока и определяется по формуле

$$I = k_{ш} \cdot U_{пр} ,$$

где  $U_{пр}$  – напряжение, измеренное цифровым прибором в соответствии с инструкцией по эксплуатации, В;  $k_{ш} = 0,76 \div 0,91$  А/мВ – коэффициент шунта.

Температура окружающего воздуха, необходимая для расчетов, измеряется дополнительным (на схеме не показан) лабораторным термометром.

Затем, изменив мощность нагревателя, вновь добиваются стационарного режима и проводят комплекс аналогичных измерений.

Контроль над установлением стационарного режима осуществляется по показаниям любой из термопар до достижения постоянной температуры.

В объеме работы проводятся 5 – 7 опытов, начиная с минимальной мощности нагревателя.

По окончании работы установка приводится в исходное положение.

В табл. 2.4 приведена форма «Журнала наблюдений», а в табл. 2.5 сводятся «Результаты измерений».

Таблица 2.4

## Журнал наблюдений

№ п/п	U	U <sub>пр</sub>	Температура стенки														
			t <sub>в</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>	t <sub>6</sub>	t <sub>7</sub>	t <sub>8</sub>	t <sub>9</sub>	t <sub>10</sub>	t <sub>11</sub>	t <sub>12</sub>		
	В	мВ	°С														
1																	
2																	
3																	
...																	

Таблица 2.5

## Результаты расчета

№ п/п	t <sub>ст</sub> <sup>сп</sup>	Δt	I	Q	Q <sub>л</sub>	Q <sub>к</sub>	α	Nu	Gr	Gr·Pr	lgNu	lg(Gr·Pr)
	°С	°С	А	Вт	Вт	Вт	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°С}}$	-	-	-	-	-
1												
2												
3												
...												

**Обработка результатов**

Коэффициент теплоотдачи конвекцией от стенок трубы к окружающему воздуху:

$$\alpha = \frac{Q_k}{F \cdot \Delta t}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}},$$

где  $Q_k = Q - Q_l$  – конвективный тепловой поток от поверхности трубы к окружающему воздуху, Вт;

$F = \pi \cdot d_n \cdot l$  – поверхность трубы, м<sup>2</sup>;

$\Delta t = t_{ct}^{cp} - t_b$  – разность между средней температурой поверхности трубы и окружающего воздуха, °С.

Суммарный конвективный и лучистый тепловой поток от стенки трубы к окружающему воздуху определяется мощностью электрического нагревателя:

$$Q = U \cdot I, \text{ Вт.}$$

Лучистый тепловой поток рассчитывается в соответствии с законом Стефана-Больцмана:

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon \times \sigma_0 \times \left[ \left( \frac{T_{cm}^{cp}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_b}{100} \right)^4 \right] \times F, \text{ Вт},$$

где  $\varepsilon = 0,15$  – степень черноты поверхности трубы;

$\sigma_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела;

$T_{ct}^{cp} = t_{ct}^{cp} + 273$  – средняя температура стенки трубы, К;

$T_b = t_b + 273$  – температура окружающего воздуха, К;

$F$  – поверхность трубы, м<sup>2</sup>.

Средняя температура стенки:

$$T_{cm}^{cp} = \left( \sum_{i=1}^{i=12} \frac{t_{cm_i}}{12} \right) + 273, \text{ К}.$$

По результатам опытов строится график критериальной зависимости  $\lg Nu = f(\lg Gr \cdot Pr)$ , пример которой приведён на рис. 2.8.

Рис. 2.8. График зависимости  $\lg Nu - \lg(Gr \cdot Pr)$

Определяющим геометрическим размером в критериях подобия является наружный диаметр трубы  $d_n$ .

Физические параметры, входящие в критерии подобия, определяются по температуре окружающего воздуха  $t_b$ .

С помощью графика определяется показатель степени  $n$  (формула 2.8) и коэффициент пропорциональности  $C$  (формула 2.9).

Полученные результаты сравниваются с литературными данными [1].

### Метод наименьших квадратов для лабораторной работы №3

Метод наименьших квадратов предназначен для вычисления значений коэффициентов  $C$  и показателя степени  $n$  для уравнения логарифмической прямой

$$\lg Nu = n \cdot \lg(Gr \cdot Pr) + \lg C$$

из системы линейных уравнений

$$\begin{cases} P \cdot n + L \cdot \lg C = M \\ L \cdot n + N \cdot \lg C = T \end{cases},$$

где  $P = \sum_{i=1}^N x_i^2$ ,  $L = \sum_{i=1}^N x_i$ ,  $M = \sum_{i=1}^N (x_i \cdot y_i)$ ,  $T = \sum_{i=1}^N y_i$ ,

при этом  $x_i = \lg(Gr \cdot Pr)_i$ ,  $y_i = \lg Nu_i$  – значения из таблицы «Результаты расчета». Значение индекса суммирования  $i$  равно номеру строки в этой таблице;  $N$  – количество измерений (число строк в таблице).

Результаты расчетов по МНК сводятся в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Метод наименьших квадратов

N	$x_i = \lg(Gr \cdot Pr)_i$	$y_i = \lg Nu_i$	$x_i^2$	$x_i \cdot y_i$
1				
2				
3				
...				



$\Sigma$				
	L	T	P	M

## Лабораторная работа №4

### Определение коэффициента теплоотдачи и гидравлического сопротивления при вынужденном движении воздуха внутри трубы

#### Описание экспериментальной установки

Рабочий участок экспериментальной установки представляет собой горизонтально расположенную стальную трубку 1 длиной  $l = 730$  мм, внутренним диаметром  $d_{\text{вн}} = 8$  мм и толщиной стенки  $\delta = 0,5$  мм. Один конец трубы свободен, другой через гибкий шланг 3 соединен с центробежным вентилятором 4.

Схема установки приведена на рис. 2.9.

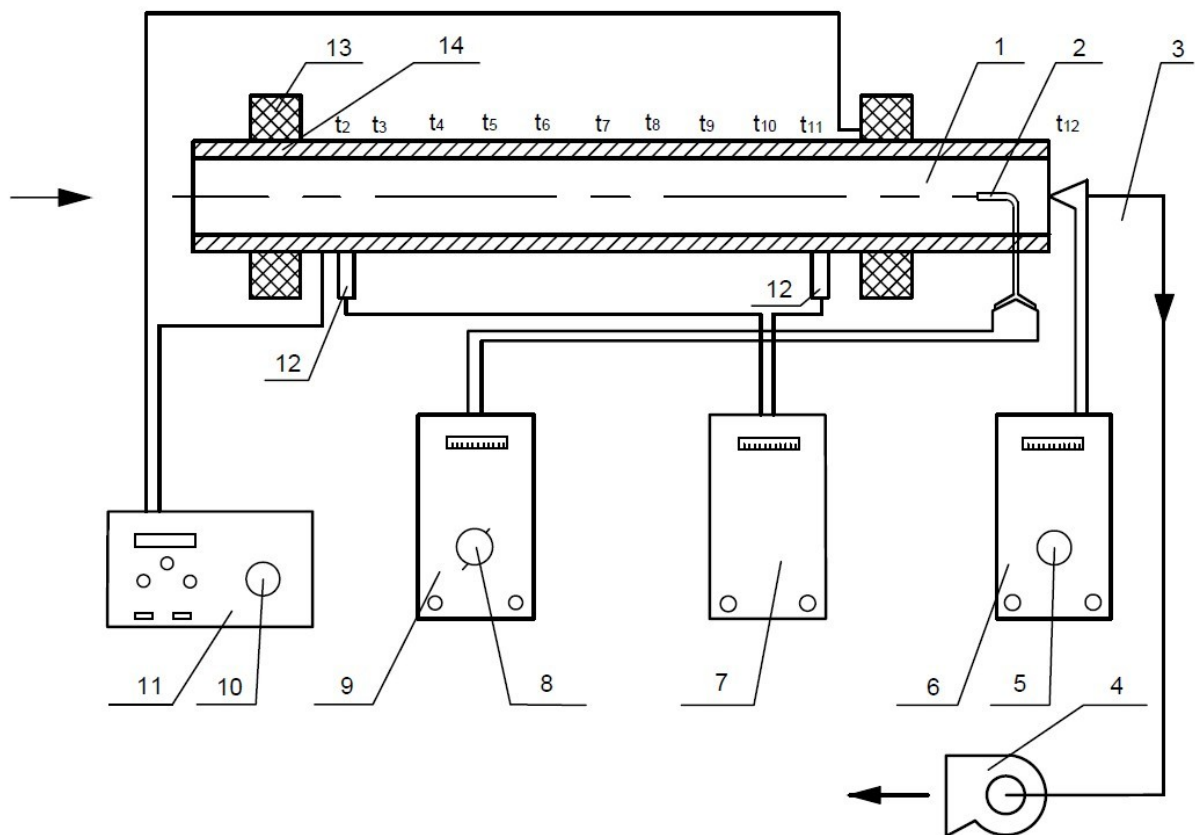


Рис. 2.9. Схема экспериментальной установки для определения коэффициента теплоотдачи и гидравлического сопротивления при вынужденном движении воздуха внутри трубы

Стенка трубы нагревается переменным током низкого напряжения, подводимым через медные шайбы 14 к концам трубы. Для электроизоляции рабочего участка стальная труба помещена во фторопластовые опоры 13.

Регулирование подводимого к трубе напряжения осуществляется автотрансформатором 10 на блоке мощности 11. При напряжении на выходе автотрансформатора выше номинального происходит автоматическое отключение нагрузки.

Измерение падения напряжения на экспериментальном участке осуществляется цифровым прибором на блоке мощности.

Система измерений температур состоит из десяти термопар ( $t_2 - t_{11}$ ) для измерения температуры стенки трубы, установленных по всей длине экспериментального участка, и двух термопар, предназначенных для измерения температуры воздуха на входе ( $t_1$ ) и на выходе ( $t_{12}$ ) трубы, а также блока температур 6.

Электродвижущая сила термопар измеряется прибором на блоке температур с помощью переключателя термопар 5. Внутри блока температур установлено устройство для компенсации электродвижущей силы холодных слоев термопар.

Для измерения расхода воздуха на выходе из трубы установлена пневмометрическая трубка 2 в комплекте с дифференциальным манометром, выходной сигнал которого поступает на показывающий прибор блока расхода 9. Расход воздуха регулируется изменением числа оборотов вентилятора с помощью рукоятки 8 автотрансформатора блока расхода.

Падение давления на экспериментальном участке измеряется с помощью двух трубок статического отбора 12 в комплекте с



3														
...														

Таблица 2.8

Результаты расчета

№ п/п	$t_{ст}^{cp}$	$t_{в}^{cp}$	$\Delta t_{cp}$	G	Q	W	$\alpha$	Nu	Re	$\xi$	$lg \frac{Nu}{u}$	lgRe	lg(100· $\xi$ )
	°C	°C	°C	$\frac{кг}{с}$	Вт	$\frac{м}{с}$	$\frac{Вт}{м^2 \cdot °C}$	-	-	-	-	-	-
1													
2													
3													
...													

**Обработка результатов**

Коэффициент теплоотдачи конвекцией от стенки трубы к воздуху определяется по формуле

$$\alpha = \frac{Q}{F \times \Delta t}, \quad \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}),$$

где Q – количество теплоты, передаваемое от стенки трубы к воздуху, Вт;

$F = \pi \cdot d_{вн} \cdot l$  – внутренняя поверхность трубы, м<sup>2</sup>;

$\Delta t$  – средний температурный напор, °C.

Количество переданной теплоты рассчитывается из уравнения теплового баланса по степени подогрева воздуха в рабочем участке

$$Q = G \cdot C_p \cdot (t''_г - t'_г), \text{ Вт}$$

где G – массовый расход воздуха, кг/с;

$C_p$  – теплоёмкость воздуха, Дж/(кг·°C);

$t'_g$  и  $t''_g$  – температура воздуха соответственно на входе в рабочий участок и на выходе из него, °C.

Массовый расход воздуха

$$G = V \cdot \rho, \text{ кг/с,}$$

где  $V$  – объёмный расход воздуха, м<sup>3</sup>/с;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Физические параметры воздуха определяются по его средней температуре

$$t_g^{cp} = 0,5 \cdot (t'_g + t''_g), \text{ } ^\circ\text{C} \quad .$$

Средний температурный напор

$$\Delta t_{cp} = \frac{t''_g - t'_g}{\ln \frac{t_{cm}^{cp} - t'_g}{t_{cm}^{cp} - t''_g}},$$

$$\text{где } t_{cm}^{cp} = \sum_{i=2}^{i=11} \frac{t_{cm_i}}{10} - \text{средняя температура стенки, } ^\circ\text{C} \quad .$$

Определяющим геометрическим размером в критериях подобия является внутренний диаметр трубы  $d_{\text{вн}}$ , определяющей температурой средняя температура воздуха

$$t_g^{cp} = 0,5 \cdot (t'_g + t''_g), \text{ } ^\circ\text{C} \quad .$$

Скорость воздуха в трубе рассчитывается из уравнения расхода

$$W = \frac{4V}{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2 \cdot 3600}, \text{ м/с.}$$

Результаты опытов по исследованию конвективного теплообмена внутри трубы обрабатываются на основе критериальной зависимости  $\lg Nu = f(\lg Re)$  в виде графика (рис. 2.10). Для оценки достоверности полученные результаты опытов сравниваются с литературными данными [1] и формулой (2.16).

Рис. 2.10. Сравнение экспериментальных данных по исследованию конвективного теплообмена с критериальной зависимостью

Коэффициент сопротивления трению

$$\zeta = \frac{2d_{\text{вн}}}{l} \cdot \frac{\Delta P}{W^2},$$

где  $\Delta P$  – падение давления на рабочем участке, Па.

Результаты опытов по исследованию гидравлического сопротивления обрабатываются на основе зависимости  $\lg(100\zeta) = f(\lg Re)$  в виде графика (рис. 2.11) и сопоставляются с литературными данными [1] (и формулами 2.19, 2.20).

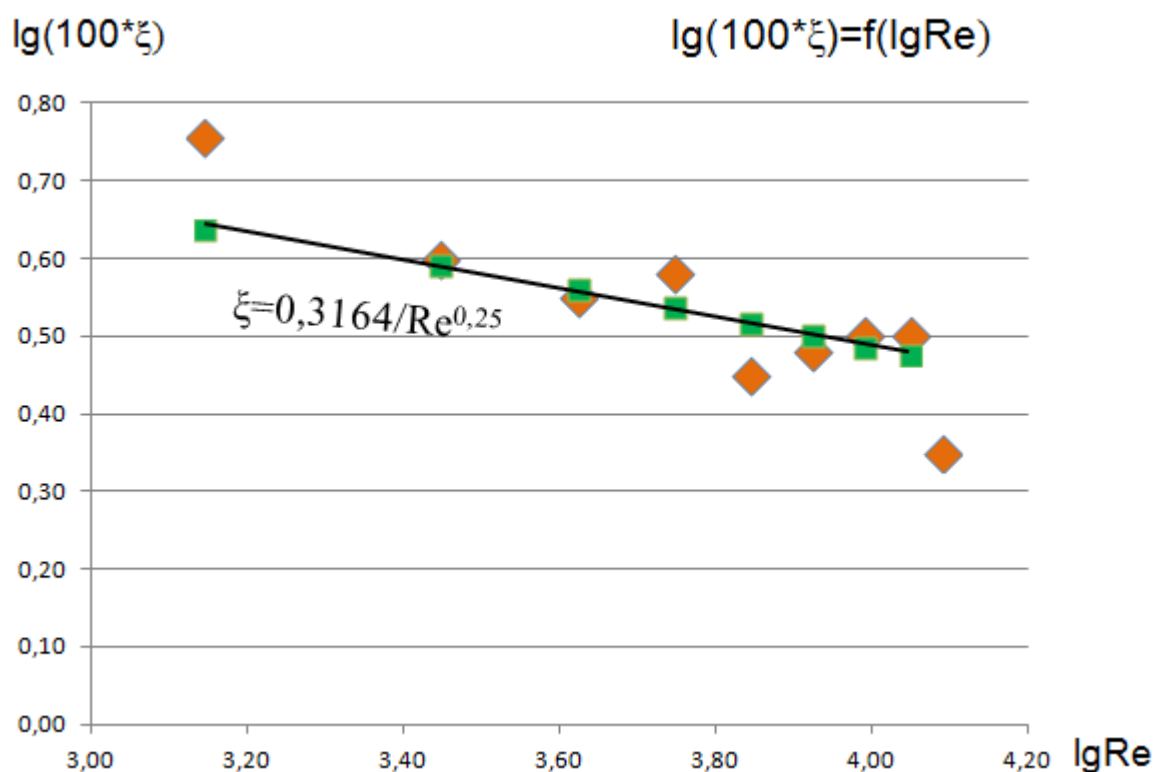


Рис. 2.11. Сравнение экспериментальных данных по исследованию гидравлического сопротивления с критериальной зависимостью

### 3. Тепловое излучение

Тепловое излучение представляет собой процесс распространения внутренней энергии излучающего тела путем электромагнитных волн, скорость которых в вакууме равна скорости света  $W = 300 \cdot 10^6$  м/с.

Различные тела при одинаковой температуре обладают разной излучательной и поглощающей способностью, зависящей от природы тела, их строения и формы, состояния поверхности, а также от среды, ограничивающей данное тело.

Большинство твердых и жидких тел имеет сплошной (непрерывный) спектр излучения, т.е. излучают и поглощают энергию в диапазоне всех длин волн от 0 до  $\infty$ . В зависимости от длины волны  $\lambda$  лучи обладают различными свойствами. Наибольший интерес с точки зрения теплообмена представляют лучи, возникновение которых определяется только температурой и оптическими свойствами излучающего тела. Такими свойствами обладают инфракрасные лучи с длиной волны  $0,8 \div 800$  мкм. Эти лучи называются тепловыми, а процесс их распространения *тепловым излучением*.

Различные тела по-разному взаимодействуют с попадающей на тело энергией излучения. На рис.3.1 представлена общая схема распределения энергии  $E_{\text{пад}}$ : часть отражается телом ( $E_R$ ), часть поглощается ( $E_A$ ) и часть проходит сквозь тело ( $E_D$ ). Таким образом, уравнение баланса лучистой энергии

$$E_{\text{пад}} = E_R + E_A + E_D . \quad (3.1)$$

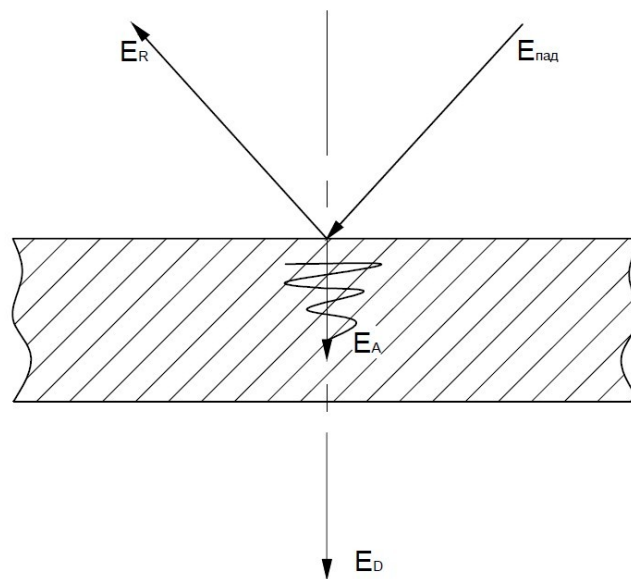


Рис. 3.1. Распределение энергии излучения, падающей на тело

Уравнение (3.1) можно записать в безразмерной форме

$$R + A + D = 1, \quad (3.2)$$

где  $R = E_R/E_{\text{пад}}$  – коэффициент отражения;

$A = E_A/E_{\text{пад}}$  – коэффициент поглощения;

$D = E_D/E_{\text{пад}}$  – коэффициент пропускания.

При  $R = 1$  вся энергия, падающая на тело, отражается, и такие тела называются *зеркальными (абсолютно белыми)*. При  $A = 1$  вся энергия, падающая на тело, поглощается, и такие тела называются *абсолютно черными*. При  $D = 1$  вся энергия, падающая на тело, проходит сквозь него, и такие тела называются *прозрачными (диатермичными)*.

Законы теплового излучения получены применительно к идеальному абсолютно черному телу и термодинамическому равновесию. В соответствии с законом Стефана-Больцмана, устанавливающим взаимосвязь интегральной плотности теплового излучения и температуры тела, полное количество энергии, излучаемое или поглощаемое в единицу времени единицей поверхности абсолютно черного тела, имеющего абсолютную температуру  $T$ , определяется:

$$E_o = \sigma_o \cdot T^4, \text{ Вт/м}^2 \quad (3.3)$$

где  $\sigma_o = 5,67 \cdot 10^{-8}$  – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

В технических расчетах удобнее пользоваться уравнением (3.3), представленным в виде

$$E_o = C_o \cdot \frac{T}{100}{}^4, \quad (3.4)$$

где  $C_o = \sigma_o \cdot 10^8 = 5,67$  – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Реальные тела, существующие в природе и используемые в технике, не являются абсолютно черными. Обычно реальные тела при одной и той же температуре поглощают или излучают меньше энергии, чем абсолютно черные и называются *серыми телами*.

Для серых тел выражение (3.4) принимает вид



$$E = \varepsilon \cdot C_o \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 = C \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4, \text{ Вт/м}^2, (3.5)$$

где  $\varepsilon = \frac{C}{C_o}$  – степень черноты тела;  $C$  – коэффициент излучения серого тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Опытное исследование излучательной способности твёрдых тел может проводиться следующими методами: радиационным, калориметрическим, методом регулярного теплового режима и методом непрерывного нагревания с постоянной скоростью.

Радиационный метод является относительным методом. Он основан на сравнении излучения исследуемого тела с излучением абсолютно чёрного тела или другого тела с известной излучательной способностью (эталона). Другие, упомянутые выше методы, относятся к абсолютным методам и основаны на непосредственном измерении потока результирующего излучения.

В работе 5 используется калориметрический метод исследования излучательной способности тела. Сущность метода заключается в определении результирующего потока излучения между твёрдым телом и его оболочкой, выполненной в виде цилиндрической колбы. В этом случае тепловой поток рассчитывается из выражения

$$Q_{1,2} = C_{1,2} \cdot \left[ \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right] \cdot F_1, \text{ Вт}, (3.6)$$

где  $C_{1,2}$  – приведенный коэффициент излучения рассматриваемой системы тел;  $T_1, T_2$  – соответственно абсолютная температура тела и его оболочки, К;  $F_1$  – поверхность излучающего тела.

Приведенный коэффициент излучения определяется по формуле

$$C_{1,2} = \frac{1}{\left[ \frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2} \cdot \left(\frac{1}{C_1} - \frac{1}{C_2}\right) \right]} \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}, (3.7)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – соответственно коэффициенты излучения тела и оболочки, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $F_2$  – поверхность оболочки, м<sup>2</sup>.

При  $F_1 \ll F_2$   $F_1/F_2 \rightarrow 0$ , следовательно

$$C_{1,2} = C_1. \quad (3.8)$$

Таким образом, коэффициент излучения исследуемого тела на основании выражений (3.6) и (3.8)

$$C_1 = \frac{Q_{1,2}}{\left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F_1}, \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4} \quad (3.9)$$

Степень черноты исследуемого тела определяется из соотношения

$$\varepsilon = \frac{C_1}{C_0} = \frac{C_1}{5,67}. \quad (3.10)$$

## Лабораторная работа №5

### Определение коэффициента излучения твердого тела калориметрическим методом

#### Описание экспериментальной установки

Схема установки приведена на рис. 3.2.

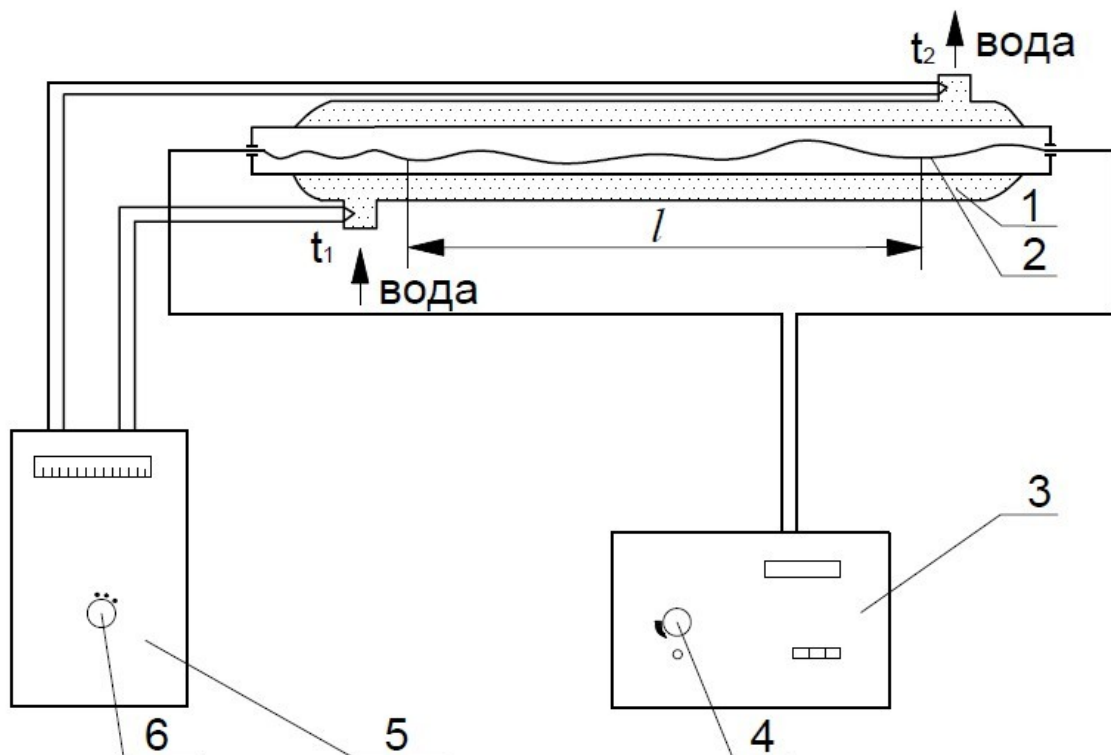


Рис. 3.2. Схема экспериментальной установки для определения коэффициента излучения твердого тела

Экспериментальный участок установки представляет собой стеклянную колбу 1 с впаянной в неё вольфрамовой проволокой 2. Колба выполнена с двойными стенками для охлаждения водой.

Исследуемое тело (проволока) нагревается электрическим током, сила которого задаётся регулятором 4 на блоке мощности 3.

Поверхность проволоки может передавать теплоту не только излучением, но и конвекцией. Для исключения влияния конвективной составляющей из внутренней полости колбы откачан воздух (до состояния вакуума  $\sim 7,5 \cdot 10^{-8}$  Па). Поэтому с достаточной точностью можно сказать, что выделенная проволокой теплота будет отдана внутренней поверхности колбы излучением и снята охлаждающей водой.

Температура воды на входе в колбу  $t_1$  и на выходе  $t_2$  измеряется хромель-копелевыми термопарами, выведенными через переключатель 6 на блок температур 5.

Измерение показаний падения напряжения и силы тока осуществляется на цифровом приборе блока мощности.

### **Порядок проведения опыта**

Перед началом работы необходимо ознакомиться с инструкцией по эксплуатации.

Первый тепловой режим устанавливается регулятором блока мощности по показанию падения напряжения на цифровом приборе. После выхода установки на стационарный режим производится измерение силы тока и температуры воды на входе и выходе колбы. Контроль над установлением стационарного режима осуществляется по температуре воды на выходе из колбы  $t_2$ . Рекомендуется проводить опыты при 4-5 стационарных режимах. Форма журнала наблюдений приведена в табл. 3.1.

Таблица 3.1

#### **Журнал наблюдений**

№	Измерения	Результаты расчета
---	-----------	--------------------

П/ П	$\Delta U$	I	$t'_B$	$t''_B$	$Q_{1,2}$	R	$T_1$	$T_2$	$\left(\frac{T_1}{100}\right)^4$	$\left(\frac{T_2}{100}\right)^4$	$C_1$	$\epsilon_1$
	В	А	°С	°С	Вт	Ом	К	К	К <sup>4</sup>	К <sup>4</sup>	$\frac{Вт}{(м^2К^4)}$	-
1												
2												
3												
...												

### Обработка результатов опыта

В процессе лучистого теплообмена участвуют поверхность проволоки  $F_1$  и поверхность внутренней колбы  $F_2$ . При соотношении поверхностей  $F_1 \ll F_2$  коэффициент излучения  $C_1$  определяется из выражения (3.9).

Лучистый тепловой поток рассчитывается по формуле

$$Q_{1,2} = I \cdot \Delta U, \text{ Вт},$$

где  $I$  – сила тока, А;  $\Delta U$  – падение напряжения, В.

Температура поверхности проволоки  $T_1$  определяется из градуировочного графика  $T_1 = f(R)$ , где  $R = \Delta U / I$  – сопротивление электрической сети, Ом.

Средняя температура охлаждающей воды

$$T_2 = 0,5(t'_B + t''_B) + 273, \text{ К}.$$

Поверхность проволоки

$$F_1 = \pi d l, \text{ м}^2,$$

где  $d = 2 \cdot 10^{-4}$  м – диаметр проволоки;  $l = 0,2$  м – длина проволоки.

Степень черноты проволоки  $\epsilon_1$  определяется из выражения (3.10).

По результатам работы строится графическая зависимость  $\epsilon_1 = f(T_1)$ .

## Приложение

Физические параметры для сухого воздуха при  $B = 760$  мм рт.ст.

$t$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_p$ , кДж/ (кг·°C)	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·°C)	$a \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\mu \cdot 10^6$ , Па	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28
10	1,247	1,005	2,52	20,0	17,6	14,16
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09
90	0,972	1,009	3,13	31,9	20,5	22,10
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85

### Библиографический список

1. Исаченко В.П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. - М.: Энергия, 1981.
2. Мурзич А.Ф., Иванов А.Н. Теплообменное оборудование предприятий: учеб. пособие/ СПб ГТУРП. - СПб., 2008.

3. Суслов В.А. Тепломассообмен: учеб. пособие/ СПб ГТУРП. - СПб., 2008.
4. Михеев М. А. Основы теплопередачи. - М.: Госэнергоиздат, 1956.
5. Белоусов В. Н. и др. Тепломассообмен: метод. указания / СПб ГТУРП., - СПб., 1993.
6. Исаев С. И., Кожин И. А., Кофанов В. И. Теория тепломассообмена: учебник для технических университетов и вузов / МГТУ. - М., 1997.
7. Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче: учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. - М.: Энергия, 1980.
8. Кунтыш В.Б., Сухоцкий А.Б., Миннигалеев А.Ш. Кожухотрубные теплообменные аппараты (расчёт и конструирование): справочное пособие/ под ред. В.Б.Кунтыша. - СПб.: Недра, 2014.

## Содержание

Введение.....	3
<b>I. Теплопроводность.....</b>	<b>4</b>
Лабораторная работа №1.	
Определение коэффициента теплопроводности изоляционных материалов методом пластины .....	11
<b>2. Конвективный теплообмен .....</b>	<b>17</b>
Лабораторная работа №2.	
Определение коэффициента теплоотдачи при свободном движении от стенки вертикальной трубы к воздуху .....	29
Лабораторная работа №3.	
Определение коэффициента теплоотдачи при свободном движении от стенки горизонтальной трубы к воздуху .....	35
Лабораторная работа №4.	
Определение коэффициента теплоотдачи и гидравлического сопротивления при вынужденном движении воздуха внутри трубы.....	40
<b>3. Тепловое излучение.....</b>	<b>46</b>
Лабораторная работа №5.	
Определение коэффициента излучения твердого тела калориметрическим методом .....	50
Приложение.....	53
Библиографический список.....	53

Редактор и корректор Т.А.Смирнова  
Техн. редактор Л.Я.Титова

Темплан 2014 г., поз. 73

---

Подп. к печати 09.06.2014. Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага тип. №1.  
Печать офсетная. Печ.л. 3,5. Уч.- изд. л. 3,5.  
Тираж 100 экз. Изд. №73. Цена "С". Заказ

---

Ризограф Санкт-Петербургского государственного технологического университета  
растительных полимеров, 198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4