



## **МЧС РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования

«Уральский институт Государственной противопожарной службы  
Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны,  
чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий»

## **ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**

Лабораторный практикум

Специальность 40.05.03 Судебная экспертиза  
(квалификация специалист)

Екатеринбург

2021

**Термодинамика и теплопередача:** лабораторный практикум. Специальность 40.05.03 Судебная экспертиза (квалификация специалист): учебное пособие/ Екатеринбург: ФГБОУ ВО Уральский институт ГПС МЧС России, 2021. – 59 с.

***Авторы-составители:***

Баранова О.Ю., доцент кафедры физико-технических основ безопасности Уральского института ГПС МЧС России, к.т.н., доцент

Лабораторный практикум включает в себя описание семи лабораторных работ, включая теоретические основы, описание лабораторной установки и методики измерений, порядок проведения лабораторных работ, в том числе последовательность измерений, параметры лабораторных установок, фотографии их внешнего вида, а также расчетные соотношения и контрольные вопросы. Предназначен для оказания помощи слушателям, обучающимся по специальности 40.05.03 Судебная экспертиза (квалификация специалист), в процессе подготовки к лабораторным работам и их выполнении.

© ФГБОУ ВО УрИ ГПС МЧС России, 2021 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ИНСТРУКЦИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ В ЛАБОРАТОРИИ	6
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1	
Определение коэффициента теплопроводности твердых тел методом цилиндрического слоя	8
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2	
Определение коэффициента теплопередачи от горячего теплоносителя к холодному	13
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3	
Определение коэффициента температуропроводности и коэффициента теплоотдачи металлического образца методом регулярного режима	22
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4	
Определение коэффициента теплоотдачи при естественной конвекции воздуха на обогреваемом цилиндре	29
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5	
Определение коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении	35
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6	
Исследование теплоотдачи при пленочном режиме кипения	40
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7	
Определение интегрального коэффициента излучения тонкой вольфрамовой проволоочки, нагреваемой электрическим током	50
ПРИЛОЖЕНИЯ	55
ЛИТЕРАТУРА	59

## ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы являются составной частью учебного процесса и преследуют цель усвоения материала путем экспериментальной проверки теоретических положений, изучаемых в курсе дисциплины «Термодинамика и теплопередача», а также прививают навыки исследовательской работы, знакомят с техникой и методами исследований, измерений и расчетов.

Законы термодинамики и тепломассообмена, являющиеся базой курса дисциплины «Термодинамика и теплопередача», широко используются для научных обоснований требований правил пожарной безопасности, позволяют анализировать поведение газов при развитии пожара, причин возникновения и пути распространения горения, решения практических задач, стоящих перед пожарной охраной.

На законах термодинамики и тепломассообмена основаны: определение величины противопожарных разрывов между зданиями и сооружениями; изучение поведения строительных конструкций в условиях пожара и обоснование требований строительных норм и правил к их огнестойкости; разработка эффективных средств обнаружения и тушения пожаров, защиты личного состава пожарных подразделений от воздействия тепловой энергии при работе на пожарах и др.

В данном пособии дано описание семи лабораторных работ:

- № 1 «Определение коэффициента теплопроводности твердых тел методом цилиндрического слоя»;
- № 2 «Определение коэффициента теплопередачи от горячего теплоносителя к холодному»;
- № 3 «Определение коэффициента температуропроводности и коэффициента теплоотдачи металлического образца методом регулярного режима»;
- № 4 «Определение коэффициента теплоотдачи при естественной конвекции на обогреваемом цилиндре»;
- № 5 «Определение коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении»;
- № 6 «Исследование теплоотдачи при пленочном режиме кипения»;
- № 7 «Определение интегрального коэффициента излучения тонкой вольфрамовой проволоки нагреваемой электрическим током».

До проведения лабораторных работ слушатели должны изучить инструкцию по технике безопасности и соблюдению правил пожарной безопасности при проведении лабораторных работ и сдать по ней зачет.

### **Выполнение лабораторных работ включает следующие этапы:**

- подготовка к выполнению работы;
- проведение работы;
- составление отчета и обработка результатов проведенного эксперимента;
- сдача зачета по выполненной работе.

### **В каждой лабораторной работе должно быть изложено:**

- цель работы;
- теоретические основы работы;
- описание лабораторной установки и ее схема;
- порядок проведения работы;
- обработка результатов опыта;
- сравнение результатов опыта с имеющимися табличными данными;
- выводы;
- контрольные вопросы;
- используемая литература.

### **Подготовка к выполнению работы**

Для подготовки к выполнению лабораторных работ обучаемые обязаны повторить теоретический материал, изучить порядок выполнения работы и ознакомиться с примерным планом составления отчета. После этого необходимо подготовить тетрадь для лабораторных работ. Она должна быть подписана и содержать заготовку отчетов по лабораторным работам.

При подготовке к выполнению лабораторной работы каждый обучающийся должен вычертить схемы, таблицы, предусмотренные данной работой, и ознакомиться с оборудованием и приборами, которые будут применяться при ее выполнении.

### **Проведение работы**

При проведении лабораторной работы записи измерений и предварительных расчетов показываются преподавателю. В случае удовлетворительного выполнения работы преподаватель разрешает включить установку. По окончании работы рабочее место приводится в порядок.

### **Составление отчета**

Отчеты по лабораторным работам составляются каждым обучающимся по примерному плану, приведенному в конце описания каждой работы, в отдельной тетради.

Отчет должен содержать номер, название и цель лабораторной работы; перечень приборов и аппаратуры, используемых при выполнении работы; схему лабораторной установки; результаты измерений, сведенные

в таблицы; краткие теоретические положения; выводы и ответы на контрольные вопросы.

Отчет по лабораторным работам отдается на проверку преподавателю.

### **Простейшие методы обработки полученных данных и правила проведения расчетов**

При округлении чисел степень приближения определяется тем количеством десятичных знаков, которые используются при записи.

При расчетах округление величин, входящих в формулу, следует проводить таким образом, чтобы более точные величины имели на порядок больше значащих цифр, чем самая неточная величина.

При оценке точности измерений следует учитывать ошибку шкалы прибора.

При расчетах производить действия над единицами измерения.

Полученные результаты обработки опытных данных сравнивать с справочными данными. Критически оценивать отклонения полученных результатов от табличных данных. Для ускорения расчетов применять калькуляторы (желательно инженерные).

## **ИНСТРУКЦИЯ**

### **по технике безопасности при работе в лаборатории**

1. При работе в лаборатории необходимо быть внимательными и соблюдать исключительную осторожность, так как неаккуратность и отступление от правил техники безопасности, пожарной безопасности и порядка проведения работы может повлечь за собой тяжелые последствия.
2. Включение установок в работу разрешается только преподавателем.
3. В лаборатории категорически запрещается:
  - 3.1. пуск оборудования в работу без разрешения преподавателя;
  - 3.2. оставлять без наблюдения приборы и оборудование, находящиеся под напряжением;
  - 3.3. касаться руками незаизолированных частей ЛАТров, электрических проводов, приборов;
  - 3.4. повышать мощность электрического нагревателя выше нормы, установленной инструкцией или преподавателем;
  - 3.5. производить какие-либо переключения в схеме, находящейся под напряжением;
  - 3.6. устанавливать и заменять предохранители на щитках без разрешения преподавателя и при включенном рубильнике;

- 3.7. после начала выполнения лабораторной работы переходить из одной бригады в другую.
4. При обнаружении повреждения немедленно отключить установку и сообщить преподавателю.
  5. Во время проведения лабораторной работы из числа слушателей в каждой бригаде назначается старший, который обязан следить за порядком на своем участке работы, отвечать за состояние приборов и чистоту рабочих мест по окончании работы.
  6. На рабочем месте не должно быть никаких посторонних предметов.
  7. Слушатели должны бережно и аккуратно обращаться с аппаратурой и приборами.
  8. После окончания лабораторной работы необходимо выключить лабораторные установки.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.**  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ**  
**ТВЁРДЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СЛОЯ**

**Цель работы:** определение коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов.

**1. Теоретические основы лабораторной работы**

Рассмотрим стационарный процесс теплопроводности в цилиндрической стенке с внутренним радиусом  $r = r_1$  и внешним радиусом  $r = r_2$ . На поверхностях стенки заданы постоянные температуры  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$ . В заданном интервале температур теплопроводность материала стенки постоянна. Температура стенки изменяется только в радиальном направлении. Процесс стационарный. При данных допущениях уравнение теплопроводности выглядит так:

$$\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dt}{dr} = 0; \quad (1)$$

граничные условия: при  $r = r_1$   $t = t_{c1}$  и при  $r = r_2$   $t = t_{c2}$ .

Для нахождения распределения температур в цилиндрической стенке и теплового потока через неё необходимо найти решение уравнения (1):

$$t = t_{c1} - (t_{c1} - t_{c2}) \frac{\ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)}. \quad (2)$$

Для нахождения количества тепла, проходящего через цилиндрическую поверхность в единицу времени, воспользуемся законом Фурье:

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dr} F, \quad (3)$$

где  $F = 2\pi r l$ . Следовательно:

$$Q = \frac{2\pi l \lambda (t_{c1} - t_{c2})}{\ln(r_2/r_1)}, \text{ Вт.} \quad (4)$$

Из (4) следует:

удельный тепловой поток через внутреннюю поверхность –

$$\frac{Q}{\pi d_1 l} = q_1 = \frac{2\lambda(t_{c1} - t_{c2})}{d_1 \ln(r_2/r_1)}; \quad (5)$$

удельный тепловой поток через внешнюю поверхность –

$$\frac{Q}{\pi d_2 l} = q_2 = \frac{2\lambda(t_{c1} - t_{c2})}{d_2 \ln(r_2/r_1)}; \quad (6)$$



линейная плотность теплового потока –

$$\frac{Q}{l} = q_l = \frac{2\pi\lambda(t_{c1} - t_{c2})}{\ln(r_2/r_1)}. \quad (7)$$

## 2. Схема лабораторной установки и методика измерений

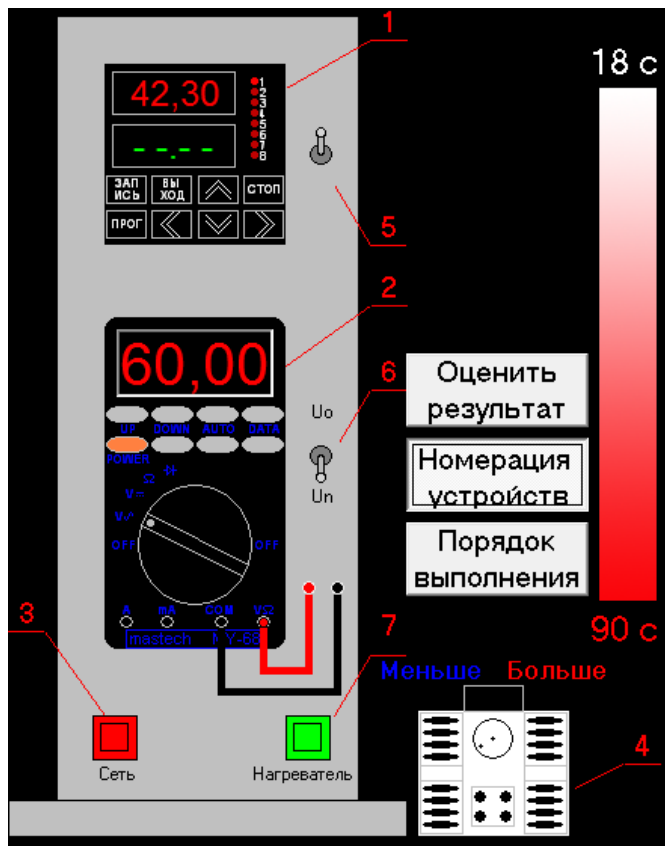


Рис. 1. Общий вид установки

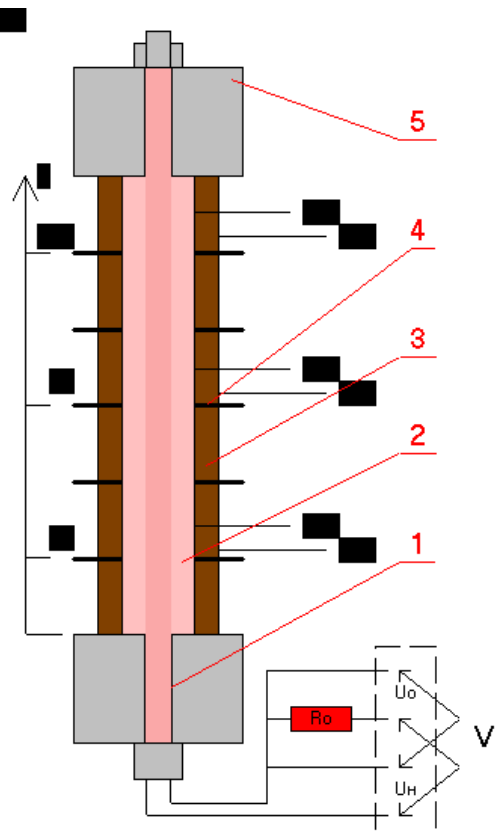


Рис. 2. Схема установки

Схема экспериментальной установки приведена на рисунках 1 и 2. На передней панели находится восьмиканальный измеритель температуры 1 типа УКТ-38, подключённый к шести хромель-копелевым термопарам, тумблер 5 включения УКТ-38, универсальный вольтметр 2 типа МУ-68 с автоматическим переключением пределов измерений, тумблер электропитания установки 3, разъёмы V для подключения мультиметра 2, тумблер 6 для переключения вольтметра на измерение падения напряжения на образцовом сопротивлении ( $U_0$ ) и напряжения на цилиндрическом нагревателе ( $U_n$ ). Регулируемый источник питания ЛАТР 4 включается тумблером 7.

На рис. 2 приведена принципиальная схема рабочего участка, электрическая схема питания и измерений. На цилиндрическом нагревателе 1 расположена медная термостатирующая труба 2, на наружную поверхность которой надеты шесть исследуемых образцов 3 с одинаковыми размерами. Для уменьшения вертикальных конвективных

потоков образцы разделены тонкими пластинами 4. Для уменьшения тепловых потерь на концах нагревателя расположены теплоизолирующие втулки 5 из пенопласта. Электропитание к нагревателю подводится от источника питания ЛАТР 4 (рис. 1). Выход от ЛАТР соединяется с нагревателем электрическим кабелем через заднюю панель. Последовательно с нагревателем включено образцовое сопротивление  $R_0$  (рис. 2) для определения величины электрического тока в цепи по измеренному значению падения напряжения на нем.

На внутренней и наружной поверхности исследуемых образцов расположены шесть хромель-копелевых термопар (по три термопары на каждой поверхности), которые измеряют температуры в точках сечений:  $L/6$ ,  $L/2$ ,  $5L/6$  ( где  $L$  – длина рабочего участка ). Термопары подключены к измерителю температур УКТ-38, который их опрашивает и показывает измеренные величины в следующей последовательности:

$t_{11}$  – температура внутренней поверхности в сечении  $5L/6$ ;

$t_{21}$  – температура внешней поверхности в сечении  $5L/6$ ;

$t_{12}$  – температура внутренней поверхности в сечении  $L/2$ ;

$t_{22}$  – температура внешней поверхности в сечении  $L/2$ ;

$t_{13}$  – температура внутренней поверхности в сечении  $L/6$ ;

$t_{23}$  – температура внешней поверхности в сечении  $L/6$ .

Порядок опроса термопар можно изменить при их подключении к УКТ-38.

### 3. Порядок проведения лабораторной работы

Измеряемые величины:

$U_n$  – напряжение на нагревателе;

$U_0$  – напряжение на образцовом сопротивлении;

$t_{ij}$  – температура внутренней ( $i = 1$ ) и внешней ( $i = 2$ ) поверхности в трех  $j = 1, 2, 3$ ) сечениях цилиндрического слоя.

$Q = U_n U_0 / R_0$  – тепловой поток через цилиндрическую поверхность в единицу времени.

#### Проведение измерений

1. Получить доступ к проведению работы, ответив на вопросы тестирования.
2. Включить тумблер 3 питания установки, тумблер 7 питания нагревателя, кнопку «Power» мультиметра 2 и тумблер 5 питания УКТ-38.
3. Установить напряжение на нагревателе  $U_n = 60$  В регулятором напряжения «больше», «меньше».
4. Подождать 4-5 минут для получения стационарного режима.
5. Снять показания  $U_n$  и  $U_0$ , установив переключатель в соответствующее положение.

6. Снять показания  $t_{ij}$ . При этом измеритель температуры УКТ-38 автоматически и последовательно переключается с одной термопары на другую.
7. Занести полученные данные в таблицу измерений.
8. Повторить пункты 3-6, устанавливая на нагревателе другие значения напряжения.

### Данные лабораторной установки

Длина рабочего участка:	$l = 384$ мм.
Внутренний диаметр образца:	$d_1 = 22$ мм.
Внешний диаметр образца:	$d_2 = 34$ мм.
Величина образцового сопротивления:	$R_0 = 0,1$ Ом.

### Таблица результатов измерений

№ опыта	$t_{11},$ °C	$t_{21},$ °C	$t_{12},$ °C	$t_{22},$ °C	$t_{13},$ °C	$t_{23},$ °C	$U_n,$ В	$U_0,$ В
1								
2								
3								

### Расчётные соотношения

$$q_l = \frac{Q}{l}. \quad (8)$$

где:

$$Q = U_n I_n; \quad I_n = \frac{U_0}{R_0}; \quad (9)$$

$$t_{c1} = \frac{t_{11} + t_{12} + t_{13}}{3}; \quad t_{c2} = \frac{t_{21} + t_{22} + t_{23}}{3} \quad (10)$$

Тогда

$$\lambda = \frac{q_l \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi(t_{c1} - t_{c2})}.$$

**Таблица расчетов**

№ опыта	$Q$ , Вт	$t_{c1}$ , °C	$t_{c2}$ , °C	$\lambda$ , Вт/(м·К)
1				
2				
3				

$t_{c2}$  и  $t_{c1}$  – усредненные по трем сечениям значения температуры на внешней и внутренней поверхности цилиндрического слоя;

$\lambda$  – среднее по результатам измерений значение теплопроводности материала цилиндрического слоя.

Исходя из опытного значения коэффициента теплопроводности, определить материал исследуемых образцов (приложение 1).

### Контрольные вопросы

1. Уравнение стационарной теплопроводности в цилиндрической стенке.
2. Решение уравнения стационарной теплопроводности в цилиндрической стенке.
3. Закон Фурье.
4. Удельный тепловой поток через внутреннюю поверхность цилиндрической стенки.
5. Удельный тепловой поток через внешнюю поверхность цилиндрической стенки.

### 4. План отчета

1. Название работы и цель.
2. Схема установки.
3. Краткое описание установки.
4. Таблица результатов измерений.
5. Обработка результатов опытов.
6. Выводы.
7. Ответы на контрольные вопросы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ОТ ГОРЯЧЕГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ К ХОЛОДНОМУ

**Цель работы:** экспериментальное определение коэффициента теплопередачи при движении жидкости в трубе; сравнение результатов опытов с расчетом, выполненным для условий эксперимента.

#### 1. Теоретические основы лабораторной работы

##### 1.1. Метод определения коэффициента теплопередачи

В данной работе изучается теплообменный аппарат, в котором теплоносители находятся в однофазном состоянии и не контактируют друг с другом непосредственно. Такие аппараты называют поверхностными (или рекуперативными) теплообменниками. Установка позволяет осуществить две простых схемы движения теплоносителей: прямоточная (теплоносители движутся в одном направлении) и противоточная (теплоносители движутся в противоположных направлениях). Целью лабораторной работы является экспериментальное определение коэффициента теплопередачи от «горячего» теплоносителя к «холодному» и сравнение его с расчетной величиной.

Тепловой поток, отдаваемый горячим теплоносителем, рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{отд}} = G_1 \cdot c_{p1} \cdot (t'_1 - t''_1). \quad (1)$$

Воспринимаемый тепловой поток холодным теплоносителем рассчитывается аналогично:

$$Q_{\text{воспр}} = G_2 \cdot c_{p2} \cdot (t'_2 - t''_2), \quad (2)$$

где:  $t_1$  и  $t_2$  – температуры горячего и холодного теплоносителей соответственно. Индексы «штрих» и «два штриха» - соответствуют условиям на входе и выходе;  $c_{p1}$  и  $c_{p2}$  – удельные изобарные теплоемкости теплоносителей (в данном случае их величину можно принять равной 4180 Дж/(кг·К), поскольку теплоносителем является вода, а в рабочем интервале температур значение её теплоемкости слабо отличается от вышеприведенной величины);  $G_1$  и  $G_2$  – массовые расходы теплоносителей (кг/с):

$$G = V \cdot \rho, \quad (3)$$

где:  $V$  – объемный расход (м<sup>3</sup>/с);  $\rho$  – плотность воды (принять 999,8 кг/м<sup>3</sup>).  
Отношение (4) задает КПД теплообменника

$$\eta_{\text{то}} = \frac{Q_{\text{воспр}}}{Q_{\text{отд}}}. \quad (4)$$

Тепловой поток в окружающую среду (потери тепла) определяется разностью

$$Q_{\text{пот}} = Q_{\text{отд}} - Q_{\text{воспр}}. \quad (5)$$

Для точности дальнейшего расчета воспользуемся средней между ними величиной:

$$Q = \frac{Q_{\text{отд}} + Q_{\text{воспр}}}{2}. \quad (6)$$

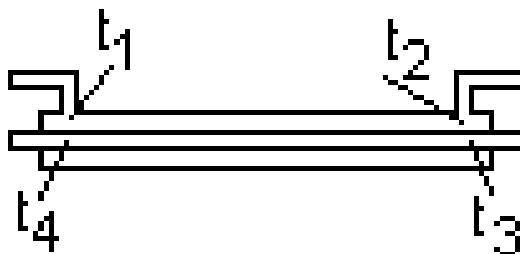


Рис. 1. Схема рекуперативного теплообменника

Уравнение теплопередачи для цилиндрического теплообменника будет выглядеть следующим образом:

$$Q = \pi \cdot l \cdot k_l \cdot \Delta T, \quad (7)$$

где:  $l$  – длина поверхности теплообмена,  $k_l$  – коэффициент теплопередачи. Среднелогарифмический температурный напор равен:

$$\Delta T = \frac{\Delta T_{\text{Б}} + \Delta T_{\text{М}}}{\ln \left( \frac{\Delta T_{\text{Б}}}{\Delta T_{\text{М}}} \right)}. \quad (8)$$

где:  $\Delta T_{\text{Б}}$  и  $\Delta T_{\text{М}}$  – большая и меньшая разница температур в концевых сечениях теплообменника, независимо от схемы движения теплоносителей, то есть,  $\Delta T_1 = t_4 - t_1$ ;  $\Delta T_2 = t_3 - t_2$ . Если  $\Delta T_1 > \Delta T_2$ , то  $\Delta T_{\text{Б}} = \Delta T_1$ , а  $\Delta T_{\text{М}} = \Delta T_2$ . Тогда коэффициент теплопередачи будет равен:

$$k_l = \frac{Q}{\pi \cdot l \cdot \Delta T}. \quad (9)$$

Формула (9) используется для экспериментального определения коэффициента теплопередачи.

## 1.2. Теоретическая оценка коэффициента теплопередачи

Для цилиндрической стенки коэффициент теплопередачи находится из уравнения:

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_{\text{ст}}} \ln \left( \frac{d_2}{d_1} \right) + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}. \quad (10)$$

Трубы сделаны из нержавеющей стали, коэффициент теплопроводности которой равен  $\lambda_{\text{ст}} = 14,4 + 0,016 \cdot t$ . Среднюю температуру стали  $t$  найдем следующим образом:  $t = (t'_1 + t''_1 + t'_2 + t''_2)/4$ . Поверхностью теплообмена между теплоносителями является внутренняя труба, у которой  $d_1$  и  $d_2$  – это внутренний и внешний диаметры

соответственно. Величины  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – это коэффициенты теплоотдачи внутри и снаружи трубы. Чтобы оценить их, необходимо вычислить число Рейнольдса – критерий режима течения

$$Re = \frac{w \cdot l_0}{\nu}. \quad (11)$$

Для труб значение  $Re > 4000$  соответствует турбулентному течению;  $w$  – скорость теплоносителя, м/с (её можно оценить как  $w = v/F$ , где  $F$  – площадь сечения канала);  $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с (её значение берется из таблицы (приложение 3 при средней температуре теплоносителя);  $l_0$  – характерный размер поверхности теплообмена. Для внутреннего контура  $l_0$  – это внутренний диаметр внутренней трубы. Для внешнего контура  $l_0$  – это разность между внутренним диаметром внешней трубы и внешним диаметром внутренней трубы  $l_0 = d_1 - d_2$ .

Тогда для внутреннего контура можно записать выражение:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \varepsilon_i, \quad (12)$$

а для внешнего контура:

$$Nu = 0,017 Re^{0,8} Pr^{0,4} \left( \frac{d_2}{d_1} \right) \varepsilon_i. \quad (13)$$

В нашем опыте предполагается, что течение теплоносителей ламинарное. В случае ламинарного течения для обеих труб справедливо выражение:

$$Nu = 1,55 \left( \frac{1}{Re Pr} \frac{l}{l_0} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (14)$$

Поскольку разница между теплофизическими свойствами теплоносителей в средних сечениях каналов и в пристеночных слоях невелика, поправку  $\varepsilon_i$  принимаем равной единице. В уравнении (14):  $Pr$  – число Прандтля, в нашем случае его значение берется при средней температуре теплоносителя из таблицы (приложение 3).

$Nu$  – безразмерный коэффициент теплоотдачи (число Нуссельта):

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l_0}{\lambda_{ж}}. \quad (15)$$

Здесь для внутреннего контура  $l_0 = d_1$  – внутренний диаметр внутренней трубы, а для внешнего контура  $l_0 = d_1 - d_2$ ;  $\lambda_{ж}$  – теплопроводность теплоносителя (воды), также берется из таблиц при средней температуре теплоносителя.

Из соотношения (15) определяются значения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ :

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{ж}}{l_0}. \quad (16)$$

Критериальные методы оценки весьма неточны, но полученные значения коэффициентов теплопередачи не должны расходиться более, чем на 15%.

## 2. Схема лабораторной установки

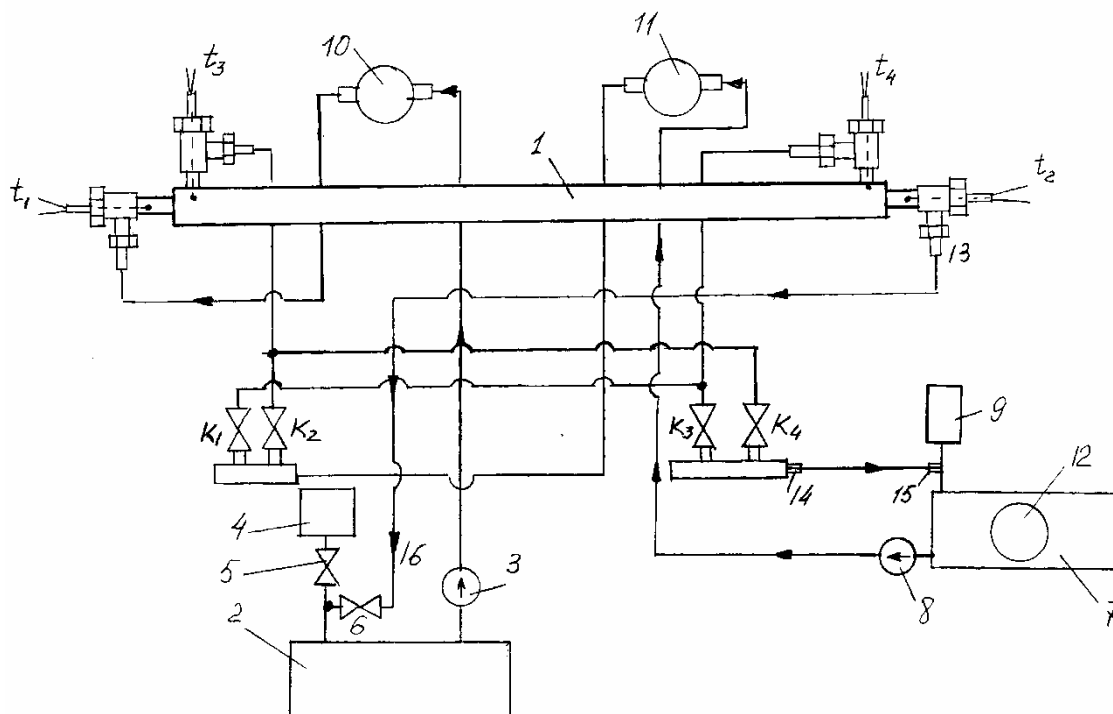


Рис. 2. Схема лабораторной установки

- 1 – рабочий участок (труба в трубе);
- 2 – водоподогреватель;
- 3 – насос водоподогревателя;
- 4 – расширительный бачок водоподогревателя;
- 5 – вентиль расширительного бачка;
- 6 – вентиль регулирования расхода горячей воды во внутренней трубе;
- 7 – радиатор (холодильник) для охлаждения воды, текущей в наружной трубе рабочего участка;
- 8 – насос холодильника;
- 9 – расширительный бачок радиатора;
- 10 – измеритель расхода воды, текущей во внутренней трубе рабочего участка;
- 11 – измеритель расхода воды, текущей во внешней трубе рабочего участка;
- 12 – вентилятор радиатора (холодильника) с источником питания;
- $K_1, K_2, K_3, K_4$  – вентили, регулирующие режимы течения (прямоток или противоток) и расход воды во внешней трубе рабочего участка;



*ВМ* – вентили Маевского, предназначенные для удаления воздуха из системы;

$t_1$  – температура воды на входе во внутреннюю трубу рабочего участка;

$t_2$  – температура воды на выходе из внутренней трубы рабочего участка;

$t_3$  – температура воды на входе во внешнюю трубу рабочего участка в условиях прямотока;

$t_4$  – температура воды на выходе из внешней трубы рабочего участка в условиях прямотока.

При включении противотока воды во внешней трубе,  $t_3$  и  $t_4$  следует поменять местами.

### **3. Порядок проведения лабораторной работы**

1. Соединить шлангом насос 3 и расходомер 10.
2. Соединить шлангом вентиль 6 и штуцер 13.
3. Соединить шлангом штуцеры 14 и 15 расширительного бачка 9.
4. Соединить шлангом штуцер насоса 8 и штуцер на входе расходомера 11.
5. Залить дистиллированную воду в водоподогреватель 2 через расширительный бачок 4 при открытых вентилях 5 и 6 (11 литров).
6. Залить дистиллированную воду в радиатор (холодильник) 7 через расширительный бачок 9 при открытых вентилях  $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$ ,  $K4$  и всех *ВМ*.
7. Подключить к розеткам, находящимся на задней панели установки, водоподогреватель, насос водоподогревателя, насос холодильника, источник питания вентилятора (разъёмы вентилятора должны быть соединены с разъёмами источника питания).
8. Заземлить корпус установки.
9. Включить установку в сеть.
10. Тумблером «СЕТЬ» включить питание установки.
11. При всех открытых вентилях проверить заполнение водой водоподогревателя и радиатора. При этом расширительные бачки должны быть заполнены наполовину.
12. Включить тумблер «НАСОС НАГРЕВАТЕЛЯ». Если расходомер 10 не работает (в системе имеется воздушная пробка), то необходимо несколько раз произвести включение и выключение насоса при открытых *ВМ*.
13. Вентилем 6 отрегулировать необходимый расход воды во внутренней трубе рабочего участка.
14. Для установки режима «прямоток» во внешней трубе рабочего участка закрыть вентили  $K1$ ,  $K4$  и открыть вентили  $K2$ ,  $K3$ .

15. Тумблером «НАСОС ХОЛОДИЛЬНИКА» включить насос 8 радиатора (холодильника).
16. Включая и выключая насос 8 радиатора тумблером «НАСОС ХОЛОДИЛЬНИКА», достичь равномерного вращения «турбинки» расходомера 11, свидетельствующего о непрерывном потоке воды во внешней трубе рабочего участка.
17. Вентилем K3 отрегулировать необходимый расход воды во внешней трубе рабочего участка в режиме «прямоток».
18. Для установки режима «противоток» во внешней трубе рабочего участка закрыть вентили K2, K3 и открыть вентили K1, K4.
19. Вентилем K4 отрегулировать необходимый расход воды во внешней трубе рабочего участка в режиме «противоток».

### Проведение измерений

1. После установки нужного режима течения воды во внешней трубе рабочего участка и требуемых расходов (15-20 см<sup>3</sup> в секунду) (см. паспорт расходомера), включить водоподогреватель 2 тумблером «НАГРЕВ».
2. Включить измеритель температуры 20 тумблером 17.
3. Включить вентилятор холодильника тумблером 18 «ВЕНТИЛЯТОР ХОЛОДИЛЬНИКА».
4. При достижении температуры на входе во внутреннюю трубу  $t_1 = 45-50^{\circ}\text{C}$ , произвести отсчёт температур  $t_1, t_2, t_3, t_4$  с помощью переключателя термопар 19.
5. Включить секундомер и произвести отсчёт показаний расходомеров.
6. Выключить секундомер и произвести отсчёт показаний расходомеров. При этом определить промежуток времени, за который через сечения труб прошли соответствующие объёмы воды.

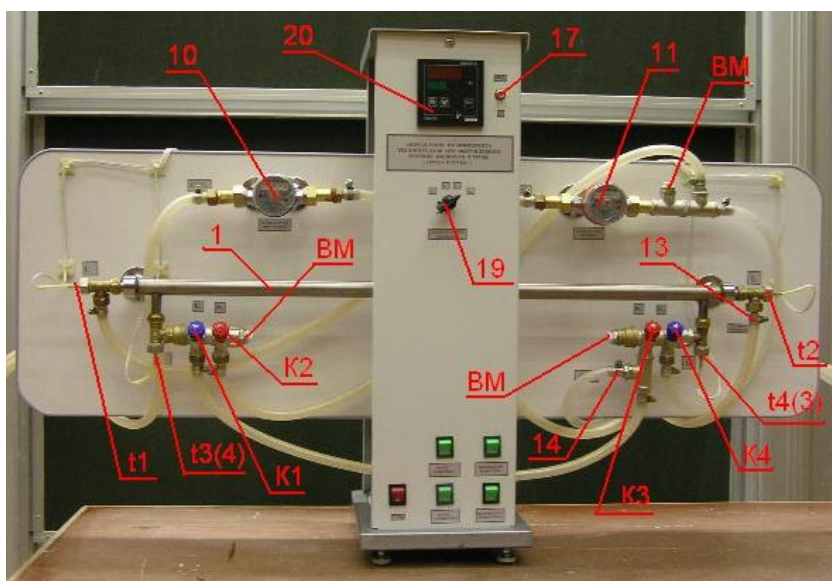


Рис. 3. Общий вид лабораторной установки

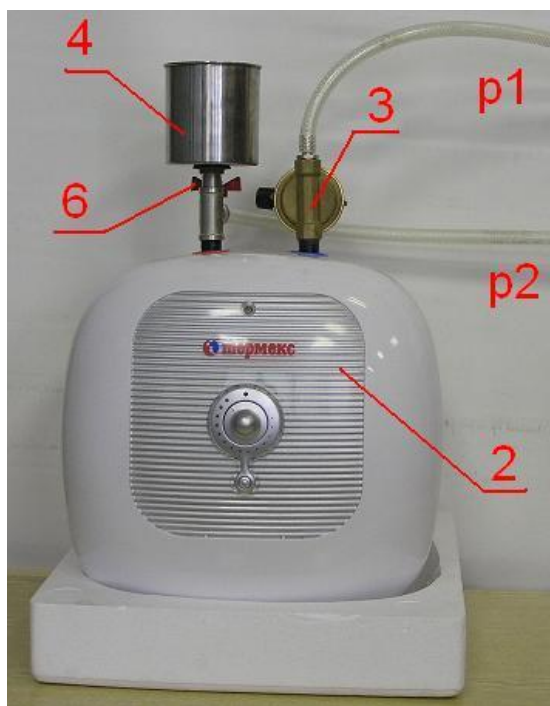


Рис. 4. Водоподогреватель

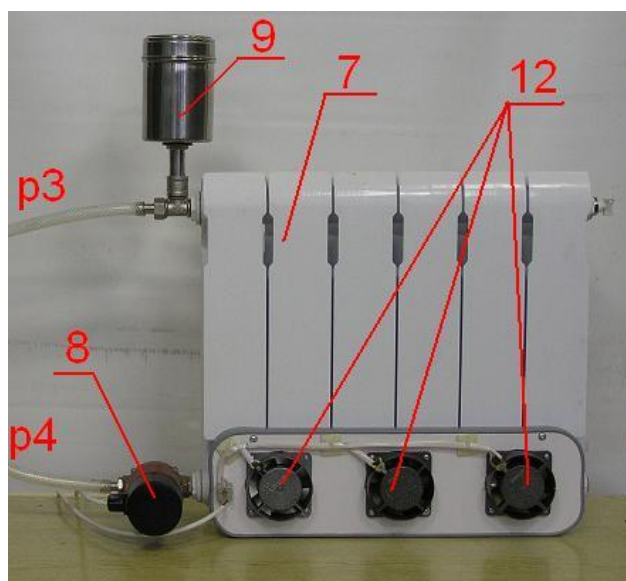


Рис. 5. Холодильник

### Данные лабораторной установки

1. Внутренний диаметр внутренней трубы, $d_1$	13 мм
2. Внешний диаметр внутренней трубы, $d_2$	15 мм
3. Внутренний диаметр внешней трубы	23 мм
4. Внешний диаметр внешней трубы	25 мм
5. Длина обогреваемого участка трубы, $L$	910 мм

**Таблица результатов измерений**

$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$	$t_4, ^\circ\text{C}$	$V_1, \text{м}^3/\text{с}$	$V_2, \text{м}^3/\text{с}$

### Расчетные соотношения

**Экспериментальное значение линейного коэффициента теплопередачи**

Среднелогарифмический температурный напор  $\Delta T$  ( $^\circ\text{C}$ ):

$$\Delta T = \frac{\Delta T_B - \Delta T_M}{\ln \frac{\Delta T_B}{\Delta T_M}}.$$

Температурные напоры при прямотоке на входе и выходе системы ( $^\circ\text{C}$ ):

$$\Delta T_B = t_1 - t_3; \quad \Delta T_M = t_2 - t_4. \quad (17)$$

При включении противотока воды во внешней трубе,  $t_3$  и  $t_4$  следует поменять местами.

Массовые расходы воды через внутреннюю и внешнюю трубы  $G$  ( $\text{кг}/\text{с}$ ):

$$G = V \cdot \rho_{\text{в,н}},$$

где:  $\rho_{\text{в,н}} = 999,8 \cdot \cos(t_{\text{в,н}} / 340)$  – плотность воды ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ), а  $t_{\text{в}} = 0,5(t_1 + t_2)$  и  $t_{\text{н}} = 0,5(t_3 + t_4)$  ( $^\circ\text{C}$ ) – определяющие значения температур во внутренней и внешней трубах.

Тепловые потоки: поток, отдаваемый внутренней трубой и воспринимаемый наружной трубой  $Q$  ( $\text{Вт}$ ):

$$Q_{\text{в}} = G_{\text{в}} \cdot c_p \cdot \Delta t_{\text{в}}; \quad Q_{\text{н}} = G_{\text{н}} \cdot c_p \cdot \Delta t_{\text{н}}, \quad (18)$$

здесь  $c_p$  – изобарная теплоемкость воды;  $\Delta t_{\text{в}} = t_1 - t_2$  и  $\Delta t_{\text{н}} = t_3 - t_4$  – разность температур на входе и выходе внутренней и внешней трубы.

Среднее значение теплового потока через систему  $Q$  ( $\text{Вт}$ ):

$$Q = \frac{Q_{\text{в}} + Q_{\text{н}}}{2}. \quad (19)$$

Экспериментальное значение линейного коэффициента теплопередачи  $k_3$  ( $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{K}$ ):

$$k_3 = \frac{Q}{\pi \cdot L \cdot \Delta T}, \quad (20)$$

здесь:  $L$  – длина обогреваемого участка трубы.

### **Теоретическое значение линейного коэффициента теплопередачи**

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega \cdot l_0}{\nu},$$

где для внутреннего контура  $l_0 = d_1$ , для внешнего контура  $l_0 = d_3 - d_2$ , скорость воды  $\omega = \frac{V}{F}$ .

В случае ламинарного течения для внутреннего и внешнего контура справедливо выражение:

$$Nu = 1,55 \left( \frac{1}{Re Pr} \frac{l}{l_0} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Число Прандтля  $Pr$  берется из таблицы (приложение 3) при средней температуре теплоносителя  $t = (t'_1 + t''_1 + t'_2 + t''_2)/4$ .

Коэффициенты теплоотдачи для внутреннего и внешнего контура –  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  определяются из соотношения:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{ж}}{l_0},$$

где  $\lambda_{ж}$  – теплопроводность теплоносителя (воды) берется из таблиц также при средней температуре теплоносителя  $t$ .

Теоретический коэффициент теплопередачи находится из уравнения:

$$k_{\tau} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_{ст}} \ln \left( \frac{d_2}{d_1} \right) + \frac{1}{\alpha_2 d_2}},$$

где  $\lambda_{ст} = 14,4 + 0,016 \cdot t$ .

### **Контрольные вопросы**

1. Типы теплообменников.
2. Критериальное уравнение для ламинарного течения жидкости в трубах.
3. Суть критерия Рейнольдса.
4. Суть критерия Нуссельта.
5. Счетчик расхода воды.

### **4. План отчета**

1. Название работы и цель.
2. Схема установки.
3. Краткое описание установки.
4. Таблица результатов измерений.
5. Обработка результатов опытов.
6. Выводы.
7. Ответы на контрольные вопросы.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.**  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ**  
**МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА И КОЭФФИЦИЕНТА**  
**ТЕПЛООТДАЧИ МЕТОДОМ РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМА**

**Цель работы:** определение коэффициент температуропроводности металлического образца при его охлаждении в термостате с постоянной температурой среды методом регулярного режима; определение коэффициент теплоотдачи методом регулярного режима.

**1. Теоретические основы работы**

Связь между временными и пространственными изменениями температуры в любой точке тела, в котором происходит теплообмен теплопроводностью, устанавливается дифференциальным уравнением теплопроводности. Для тела, в котором отсутствуют источники тепла, уравнение принимает вид:

$$\frac{dt}{d\tau} = a\nabla^2 t, \quad (1)$$

где:  $a$  – коэффициент температуропроводности ( $\text{м}^2/\text{с}$ ). Этот коэффициент является физическим параметром вещества и мерой теплоинерционных свойств тела. При прочих равных условиях выравнивание температуры во всех точках тела будет происходить тем быстрее, чем больше коэффициент  $a$ :

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad (2)$$

где:  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности ( $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ );  $c$  – удельная теплоёмкость вещества ( $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ );  $\rho$  – плотность вещества ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ).

Решение уравнения (1) производится с помощью рядов Фурье. Для различных краевых условий результаты получаются различными, но методология решения, в основном, одинакова. Искомая функция уравнения (1) зависит от большого числа переменных, но все переменные можно сгруппировать в три безразмерных комплекса. Эти комплексы являются критериями подобия:

$$\frac{\alpha l}{\lambda} = Bi \text{ – критерий Био;}$$

$$\frac{a\tau}{l^2} = Fo \text{ – критерий Фурье;}$$

$$\frac{x}{l} = L \text{ – критерий геометрического подобия.}$$

## **Методы регулярного режима для исследования тепловых свойств веществ**

При малых значениях  $Bi$  температура на поверхности тела незначительно отличается от температуры на его оси. Подобный тепловой режим типичен для металлов, у которых величина температуропроводности достаточно велика (медь, дюраль). В этом случае нагрев или охлаждение тела определяется интенсивностью теплоотдачи на его поверхности, а процесс выравнивания температуры в теле происходит существенно быстрее, чем подвод или отвод теплоты с поверхности тела.

Решение задачи о нагревании (охлаждении) тел приводит к понятию темпа нагрева (охлаждения)

$$\frac{1}{\vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = -m, \quad (3)$$

здесь:  $m$  – темп охлаждения;  $\vartheta$  – избыточная температура, равная  $(t - t_{cp})$ . Левая часть уравнения (3) определяет относительную скорость изменения температуры, которая при регулярном режиме не зависит от координат и времени и является постоянной величиной.

Лыковым А.В. было показано, что регулярный режим характеризуется не только определёнными температурными полями, возникающими в нагреваемом или охлаждаемом теле, но и потоками тепла через его поверхность. В качестве общего свойства теплового регулярного режима можно принять соотношение

$$-\frac{d\bar{t}}{d\tau} = m (t_{cp} - \bar{t}), \quad (4)$$

где:  $\bar{t}$  – средняя по объёму температура тела;  $t_{cp}$  – температура среды.

### **Применение метода регулярного теплового режима для определения коэффициента температуропроводности металлов**

Температуропроводность исследуемого образца рассчитывается из соотношения:

$$a = \frac{mK}{P^2}, \quad (5)$$

где:  $P$  – безразмерная величина:

$$P = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\infty}} \leq 1, \quad (6)$$

$K$  – коэффициент формы:

$$K = \frac{1}{\left(\frac{\varepsilon_{\infty}}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l}\right)^2}. \quad (7)$$

Здесь  $l = R$  – радиус цилиндра;  $\varepsilon$  – постоянная, определяемая из граничных условий при решении уравнения (1) для  $Bi < 10$ ;  $\varepsilon_{\infty}$  – постоянная, определяемая из граничных условий при решении уравнения (1) для  $Bi = \infty$

(практически  $\geq 100$ ). В формуле (5) величину  $P$  можно принять равной 1. Следовательно, соотношение (5) можно записать в виде:

$$a = m \cdot K. \quad (8)$$

Для расчёта темпа охлаждения из экспериментальных данных используется график зависимости  $\ln \vartheta = f(\tau)$

$$m = \frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (9)$$

а для расчёта коэффициента формы применяется соотношение:

$$K = \frac{1}{\left(\frac{2,4048}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l}\right)^2}. \quad (10)$$

Данный метод предполагает предварительное знание коэффициента формы образца.

Из приведенных выше соотношений следует, что коэффициент теплоотдачи

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{F \cdot \psi} \frac{C_{уд} \cdot M}{(\bar{t} - t_{ж})} \frac{d\bar{t}}{d\tau}, \quad (11)$$

где:  $C_{уд}$  – удельная теплоемкость исследуемого образца, а  $M$  – его масса.

## 2. Схема лабораторной установки и методика измерений

Схема экспериментальной установки приведена на рисунках 1 и 2. На передней панели расположены два двухканальных измерителя температуры 1, 2 типа ТРМ 200, подключённые к трём хромель-копелевым термопарам. Первый канал измерителя 1 подключён к термопаре 5, измеряющей температуру цилиндрического образца 11 в середине на его оси (в работе не используется). Второй канал этого же измерителя не задействован. Первый канал измерителя температуры 2 подключён к термопаре 3, измеряющей температуру внутри цилиндра 11 на расстоянии 16 мм от его оси. Второй канал измерителя 2 подключён к термопаре 4, измеряющей температуру воды в термостате 12 вблизи цилиндра. На передней панели также находятся тумблер 6 включения электропитания установки, тумблер 17 насоса термостата 25, тумблер 9 включения нагревателя термостата 26, тумблер 20 включения питания электропечи 19 и регулятора мощности 10 электропечи, устройство перемещения 18 образца из печи 19 в ёмкость 12 термостата, тумблер 7 включения вентилятора 8.

На задней панели находится преобразователь интерфейса АС-4 для подключения к компьютеру и создания графического и табличного протокола измеренных значений температур с последующей обработкой экспериментальных данных.



### 3. Порядок проведения лабораторной работы

1. Открыть вентиль 22 и закрыть вентиль 23 термостата 25. Заполнить полностью термостат дистиллированной водой через расширительный бачок 24. В термостате не должно оставаться воздуха.
2. **Внимание! Термостат должен быть заполнен дистиллированной водой.**
3. Закрыть вентиль 22.
4. Заполнить дистиллированной водой ёмкость 12 примерно на 5/6 её высоты.
5. Соединить виниловую трубку 16 со штуцером вентиля 23 термостата 25, виниловую трубку 15 со штуцером насоса 21 термостата.
6. Открыть вентиль 23.
7. Заземлить корпус установки и подключить её к лабораторной сетевой розетке.
8. Подключить циркуляционный насос 21 и нагреватель 26 термостата 25 к соответствующим сетевым розеткам электропитания на задней панели установки.
9. Отключить регулятор температуры 10, повернув диск регулирования против часовой стрелки до щелчка. Включить электропитание установки тумблером 6, измерители температуры – тумблерами 13 и 14.
10. Тумблером 17 включить циркуляционный насос 21. Циркуляция воды в контуре с ёмкостью 12 происходит в том случае, если виниловые шланги 15 и 16 полностью заполнятся водой. **При этом вентиль 22 должен быть закрыт.**
11. Если циркуляции воды в контуре не происходит, то следует удалить воздух из насоса 21. Для этого необходимо несколько раз повторить включение насоса или, открыв кран 22, добавить воды в термостат 25 через расширительный бачок 24 и удалить находящийся в термостате воздух, затем закрыть кран 22.

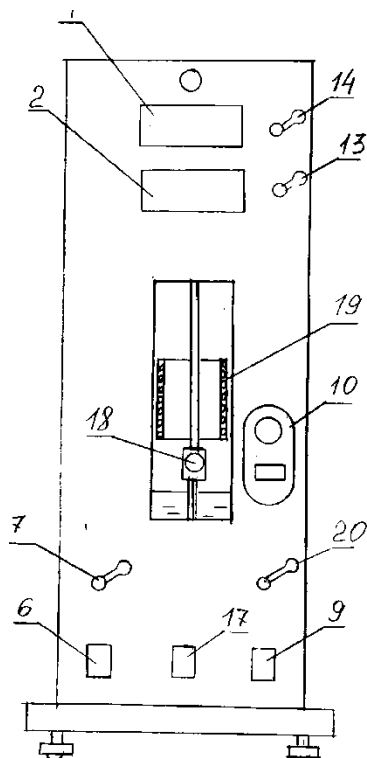


Рис. 1. Передняя панель установки

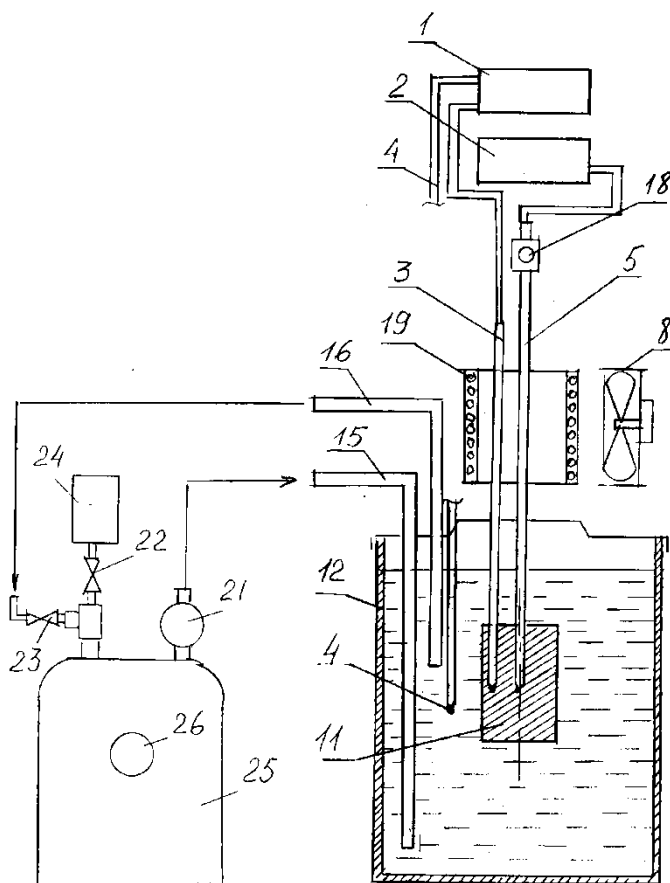


Рис. 2. Общая схема установки

### Проведение измерений

1. С помощью подъёмного устройства 18 осторожно поместить в электропечь 19 образец 11.
2. Включить регулятор температуры клавишей 10 и повернуть диск регулирования по часовой стрелке на четверть оборота.
3. Произвести плавный нагрев образца до температуры 60-70°C.
4. С помощью подъёмного устройства 18 переместить образец из печи в ёмкость 12 с циркулирующей в ней водой.
5. Включить секундомер.
6. Через каждые 10 секунд произвести отсчёт показаний измерителей температуры.

### Данные лабораторной установки

Материал	нержавеющая сталь AISI304.
Диаметр образцов	$d = 18 \text{ мм}$
Длина образцов	$l = 70 \text{ мм}$
Масса медного образца	$m_{\text{м}} = 180 \text{ г}$
Масса дюралевого образца	$m_{\text{д}} = 55 \text{ г}$

**Таблица результатов измерений**

№ п/п	$\tau$ , с	$t$ , °C	$t_{\text{ср}}$ , °C
1			
2			
3			
....			

### Расчетные соотношения

Коэффициент температуропроводности исследуемого материала вычисляют по формуле (8)  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – отрезки времени, которым соответствуют избыточные температуры  $\vartheta_1 = (t_1 - t_{\text{ср}})$  и  $\vartheta_2 = (t_2 - t_{\text{ср}})$ . Чтобы определить  $m$ , по данным охлаждения калориметра строят график  $\ln \vartheta = f(\tau)$  (рис. 3), на котором по оси ординат откладывают логарифм избыточной температуры, а по оси абсцисс – время в секундах. Затем на этом графике выбирают прямолинейный участок, характеризующий регулярный режим охлаждения (А, В).

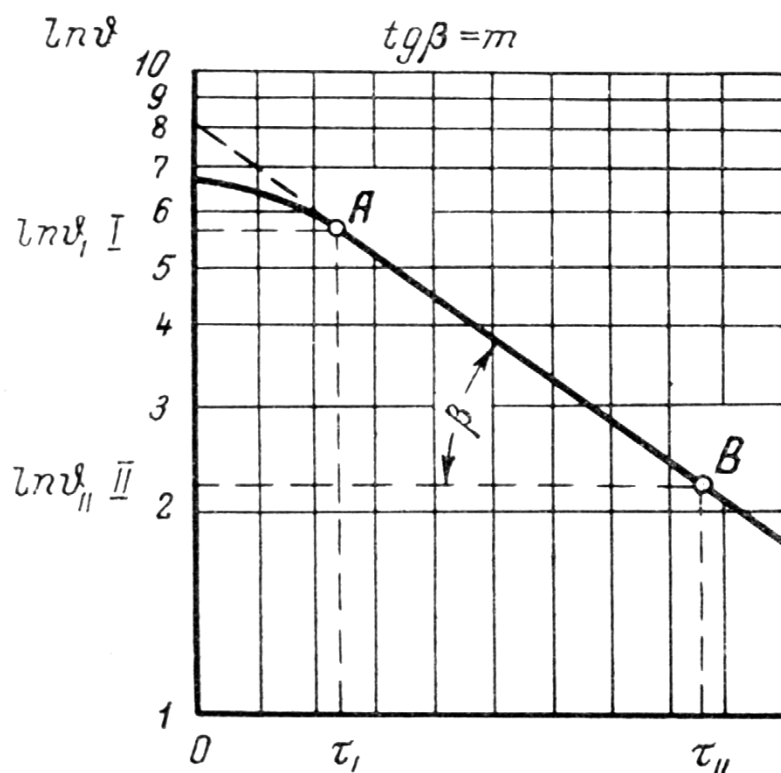


Рис. 3. Зависимость логарифма избыточной температуры от времени

Значение  $m$  равно тангенсу угла наклона этой прямой к оси абсцисс. Если взять из графика два каких-либо момента времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$  и соответствующие им избыточные температуры  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$ , то темп охлаждения

определился из уравнения (9). Коэффициент формы  $K$  вычисляется по формуле (10). Полученное значение коэффициента температуропроводности  $a$  должно быть отнесено к средней температуре исследуемого материала при его охлаждении:  $\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2}$ . Полученные значения коэффициентов  $a$  сравниваются с табличными значениями, приводимыми в справочной литературе (например, табл. 1 приложений). После обработки результатов опытов, сделать выводы о качестве проведенного эксперимента и возможных причинах расхождений со справочными данными.

Для расчета коэффициента теплоотдачи предварительно нужно посчитать площадь теплообмена образцов

$$F = 2 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot d^2 + \pi \cdot d \cdot l.$$

Коэффициент теплоотдачи образцов

$$\bar{\alpha} = \frac{m \cdot M \cdot C_p}{F \cdot \psi},$$

(принять  $\psi = 1$ ).

### Контрольные вопросы

1. Уравнение теплопроводности в отсутствии источников тепла.
2. Коэффициент температуропроводности.
3. Критерий Био.
4. Темп охлаждения.
5. Критерии подобия при решении задач нестационарной теплопроводности.
6. Определение понятия темп охлаждения (нагрева).
7. Что такое регулярный режим охлаждения (нагрева)?

### 4. План отчета

1. Название работы и цель.
2. Схема установки.
3. Краткое описание установки.
4. Таблица результатов измерений.
5. Обработка результатов опытов.
6. Выводы.
7. Ответы на контрольные вопросы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.

### *ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ НА ОБОГРЕВАЕМОМ ЦИЛИНДРЕ*

**Цель работы:** определение коэффициента теплоотдачи трубы при свободной конвекции воздуха при различных температурах поверхности трубы. Используются два метода расчета коэффициента: прямой метод основан на опытных данных по тепловому потоку и температурному напору, косвенный метод основан на решении уравнения теплопроводности с помощью теории подобия.

#### 1. Теоретические основы работы

Причиной возникновения свободной конвекции является наличие неустойчивого распределения плотности жидкости (газа), обусловленного неравномерностью нагрева объемного образца. При этом температурный напор определяет разность плотностей и величину подъемной силы, а площадь поверхности – зону распространения процесса.

Обобщение результатов различных опытов по теплообмену в свободном потоке для тел различной формы и размеров, омываемых различными жидкостями или газами, позволило найти общую зависимость между критериями подобия. Эту зависимость для горизонтальных труб можно представить в форме:

$$10^4 < Gr \cdot Pr < 10^7: Nu = 0,5(Gr \cdot Pr)^{0,25}, \quad (1)$$

где:

критерий Нуссельта:  $Nu = \alpha \cdot d / \lambda$ ;

критерий Грасгофа:  $Gr = \beta \cdot g \cdot d^3 \cdot \Delta T / \nu^2$ ;

критерий Прандтля:  $Pr = \mu \cdot c / \lambda$ ,

в которых:

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи (характеризует условия теплообмена между жидкостью и поверхностью твердого тела ( $Вт / м^2 \cdot К$ ));

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности ( $Вт / м \cdot К$ );

$d$  – характерный размер (диаметр трубы ( $м$ ));

$\beta$  – коэффициент объемного расширения газа ( $\beta = 1 / T, К^{-1}$ );

$g$  – ускорение свободного падения ( $9,8 м / с^2$ );

$\nu = \mu / \rho$  – кинематическая вязкость жидкости ( $м^2 / с$ );

$\mu$  – динамическая вязкость ( $Па \cdot с$ );

$\rho$  – плотность ( $кг / м^3$ );

$c$  – удельная массовая теплоемкость ( $Дж / кг \cdot К$ ).

Применяя эти уравнения для инженерных расчетов средних значений коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$ , нужно иметь ввиду следующие условия:

1. Число  $Pr$ ,  $\lambda$ ,  $\nu$  в диапазоне температур от 20 до 100°C изменяются существенно, поэтому для точности расчета следует пользоваться написанными ниже эмпирическими соотношениями или таблицами физических свойств воздуха (приложение 2):

$$\begin{aligned} Pr &= -0,0002 t + 0,7068; \\ \lambda &= 8 t \cdot 10^{-5} + 0,0244, \text{ Вт/м}\cdot\text{К}; \\ \nu &= (0,1015 t + 12,94)10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}. \end{aligned}$$

2. Все физические константы, входящие в состав критериев, берутся при средней температуре жидкости  $t^\circ\text{C}$ .

3. В качестве определяющего размера в критериях для горизонтальных труб принимают их диаметр, а для вертикальных поверхностей (труб, пластин) – их высоту. Итак, для трубы, находящейся в воздухе, уравнение (1) имеет вид:

$$Nu = 0,5 (Gr \cdot Pr)^{0,25}, \quad Gr = (gd^3 \Delta T) / (\nu^2 T).$$

Здесь  $\Delta T$  – разница температур между окружающей средой и поверхностью трубы,  $T$  – определяющая температура:

$$T = \frac{\bar{T}_{ст} + T_B}{2},$$

где  $\bar{T}_{ст}$  – средняя температура стенки,  $T_B$  – температура окружающего воздуха. Тогда для коэффициента теплоотдачи имеем

$$\alpha = Nu \lambda / d. \quad (2)$$

С другой стороны, средний коэффициент теплоотдачи от поверхности трубы можно рассчитать по закону Ньютона-Рихмана:

$$q = \alpha \Delta T; \quad (3)$$

$$\alpha = q / \Delta T, \quad (4)$$

где:  $q$  – плотность теплового потока через наружную стенку трубы (Вт/м<sup>2</sup>). Если считать, что теплоотдача осуществляется преимущественно путем конвекции (без учета излучения), то плотность теплового потока определяется по формуле

$$q = Q/F = (U_n \cdot I_n) / (d \cdot l \cdot \pi), \quad (5)$$

где:  $I_n = U_0 / R_0$ , (А);

$R_0$  – образцовое сопротивление (Ом);

$U$  – перепад напряжения на образцовом сопротивлении (В);

$U_n$  – перепад напряжения на нагревателе (В);

$Q$  – теплота, выделяемая нагревателем (Вт);

$F$  – площадь образующей цилиндрической поверхности трубы (м<sup>2</sup>);

Для расчета средней температуры поверхности трубы  $t_{ст}$  используется формула

$$t_{ст} = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5) / 5. \quad (6)$$

## 2. Схема лабораторной установки и методика измерений

Лабораторная установка (рис. 1, 2) состоит из отрезка медной тонкостенной трубы 1, внешний диаметр которой равен 28 мм. На поверхности трубы по её длине расположены пять термопар  $t_1 \dots t_5$  с интервалом 100 мм. Третья термопара  $t_3$  находится в центре трубы. Термопары  $t_1$  и  $t_5$  находятся на расстоянии 10 мм от концов трубы. Указанные термопары монтируются на внутренней поверхности трубы. Труба устанавливается так, что спаи термопар находятся в верхних точках цилиндрической поверхности трубы. Термопара  $t_6$  находится снизу на середине трубы. На концах трубы находятся заглушки 2 из теплоизолирующего материала. Термопара  $t_7$  измеряет температуру воздуха вблизи трубы. В центре трубы находится электрический нагреватель 3, подключённый через образцовое сопротивление  $R_0$  к источнику переменного напряжения 12 ЛАТР. Напряжение на нагревателе  $U_n$  и падение напряжения на образцовом сопротивлении  $U_0$  измеряется вольтметром 5. Нагреватель 3 размещается в медном цилиндрическом термостате 11.

На передней панели модуля расположены гнезда для подключения вольтметра, а также тумблер 6 для переключения вольтметра на измерение напряжения на нагревателе  $U_n$  и падения напряжения на образцовом сопротивлении  $U_0$ . Термопары с 1 по 6 через переключатель 8 подключены к первому каналу (красный дисплей) измерителя температуры ТРМ 200. Термопара 7 подключена ко второму каналу (зелёный дисплей) измерителя температуры. Она показывает температуру окружающего воздуха. Включение установки производится тумблером 9, включение нагревателя – тумблером 10. Установление необходимого напряжения на нагревателе и его регулирование производится ручкой 4 ЛАТРа.

## 3. Порядок проведения работы

1. Заземлить лабораторную установку (см. разъём на задней панели).
2. Подключить установку к сети 220 В и включить тумблер 9.
3. Включить измеритель температуры 7 и мультиметр 5; установить мультиметр на измерение переменного напряжения.
4. Включить ЛАТР тумблером 10 и установить ручкой 4 ЛАТРа напряжение на нагревателе примерно 50 В (использовать мультиметр).
5. При достижении температуры поверхности цилиндра 50-65°C уменьшить напряжение на нагревателе до 15-25 В и выйти на стационарный режим, подождав некоторое время (показания температуры на термопаре 3 – середина трубы, верх – не должны значительно изменяться).

**Внимание! Категорически запрещается нагревать цилиндрическую поверхность выше 70°C.**

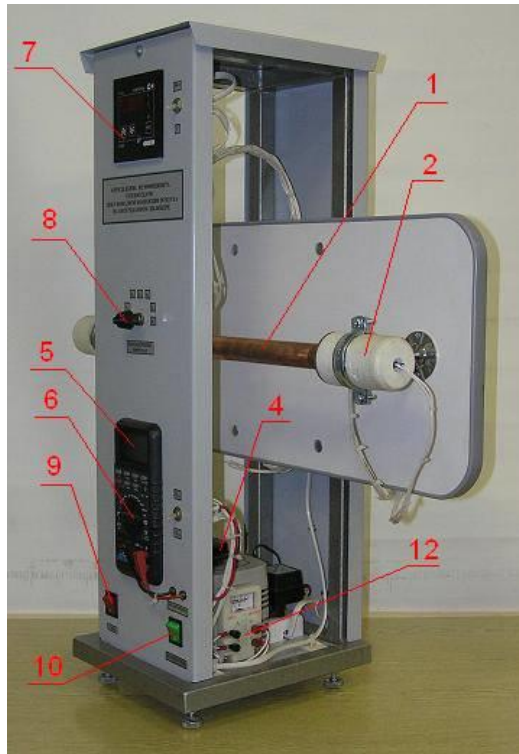


Рис. 1. Общий вид установки

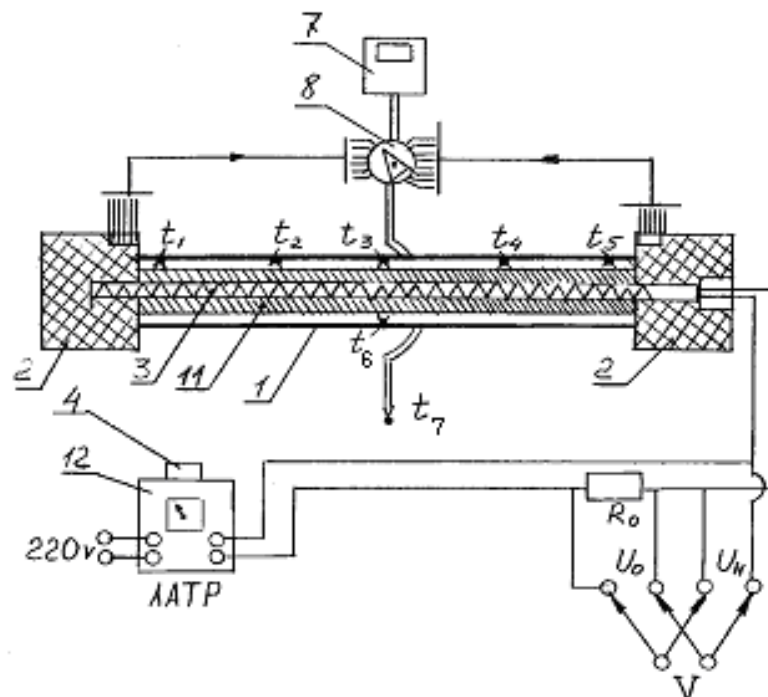


Рис. 2. Схема лабораторной установки



### Проведение измерений

1. Провести измерения температур  $t_1 \dots t_6$ .
2. Измерить напряжение на образцовом сопротивлении, переключив тумблер  $\delta$  в соответствующее положение.
3. Повторить пункты 1-2, установив заданное преподавателем следующее значение напряжения на нагревателе. Полученные данные занести в таблицу результатов измерений.

### Данные установки

Внешний диаметр трубы	$d = 28 \text{ мм}$
Длина трубы	$l = 420 \text{ мм}$
Величина образцового сопротивления	$R_0 = 1 \text{ Ом}$
Запасные образцовые сопротивления 1 и 0,1 Ом	

### Таблица результатов измерений

№ п/п	$t_1$ , °C	$t_2$ , °C	$t_3$ , °C	$t_4$ , °C	$t_5$ , °C	$t_6$ , °C	$t_0$ , °C	$U_H$ , В	$U_0$ , мВ	$Q$ , Вт
1										
2										
3										

### Расчетные соотношения

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{Q}{\pi d l}$$

$$\alpha_{\text{эсн}} = \frac{Q}{t_{cm} - t_0}$$

$$t_{cm} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6}{6}$$

$$\text{Pr} = -0,0002 \cdot t + 0,7068;$$

$$\lambda = 8 \cdot 10^{-5} \cdot t + 0,0244, \text{ Вт /м} \cdot \text{К};$$

$$\nu = (0,1015 \cdot t + 12,94) \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

$$t = \frac{t_{cm} + t_0}{2}$$

$$\Delta T = t_{cm} - t_0$$

$$\text{Gr} = \frac{g d^3 \Delta T}{\nu^2 T}$$

$$Nu = 0,5(Gr \cdot Pr)^{0,25}$$

$$\alpha_{теор} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}$$

### **Контрольные вопросы**

1. Критерии подобия в теории конвективного теплообмена.
2. Критериальные уравнения для горизонтальных труб, омываемых жидкостями или газами.
3. Закон Ньютона - Рихмана.
4. Устройство лабораторного автотрансформатора.

### **4. План отчета**

1. Название работы и цель.
2. Схема установки.
3. Краткое описание установки.
4. Таблица результатов измерений.
5. Обработка результатов опытов.
6. Выводы.
7. Ответы на контрольные вопросы.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5.**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ПУЗЫРЬКОВОМ РЕЖИМЕ КИПЕНИЯ**

**Цель работы:** экспериментальное определение среднего коэффициента теплоотдачи между поверхностью медного цилиндра и водой.

#### **1. Теоретические основы работы**

При пузырьковом кипении воды в атмосферных условиях различают две области кипения. В первой области при малых температурных напорах ( $\Delta t \leq 5^\circ\text{C}$ ) значения коэффициента теплоотдачи невелики и определяются условиями свободной конвекции однофазной жидкости. Во второй области при повышенных температурных напорах ( $5^\circ\text{C} \leq \Delta t \leq 25^\circ\text{C}$ ) коэффициент теплоотдачи значительно возрастает. Это связано с интенсивной конвекцией жидкости вследствие роста и движения паровых пузырей. Для воды в диапазоне давлений  $p/p_{\text{кр}} \leq 0,18$  применяются зависимости, полученные из опытных данных:

$$\alpha = 3,0 q^{0,7} p^{0,15}; \quad (1)$$

$$\alpha = 38,7 \Delta t^{2,33} p^{0,5}, \quad (2)$$

где  $q$  измеряется в Вт/м, а  $p$  – в бар.

Экспериментально средний коэффициент теплоотдачи между поверхностью обогреваемой пластины и кипящей водой определяется из соотношения:

$$\alpha = Q / F (t_c - t_{жс}), \quad (3)$$

где:  $Q$  – тепловой поток, передаваемый от поверхности пластины к воде, (Вт);  $F$  – площадь поверхности пластины, ( $\text{м}^2$ );  $t_c$  – средняя температура этой поверхности;  $t_{жс}$  – температура жидкости. Тепловой поток определяется по мощности, потребляемой нагреваемой пластиной:

$$Q = U_R (U_0 / R_0), \quad (4)$$

где:  $U_R$  – падение напряжения на нагревателе пластины;  $U_0$  – падение напряжения на образцовом сопротивлении  $R_0$ .

#### **2. Схема лабораторной установки**

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. На передней панели находятся два двухканальных измерителя температуры типа ТРМ-200, один из которых – 1 подключён к хромель-копелевой термопаре 3, измеряющей температуру поверхности цилиндра  $t_1$  в верхней

точке, а другой – 2 подключён к термопаре, измеряющей температуру поверхности медного цилиндра 7 в нижней точке  $t_2$  и температуру среды  $t_3$ . На передней панели установки находится тумблер электропитания установки 5, гнезда  $V$  для подключения вольтметра, тумблер 6 для переключения вольтметра на измерение падения напряжения на образцовом сопротивлении  $U_0$  и падения напряжения на нагревателе цилиндра  $U_H$ . На рис. 2 приведена принципиальная схема рабочего участка, электрическая схема питания и измерений. Нагреваемый медный цилиндр 7 находится в стеклянной ёмкости 8, в которую также помещен электрический водоподогреватель 9, питающийся от регулятора мощности 10. Внутри медного цилиндра находится нагревательный элемент, соединённый с лабораторным автотрансформатором 12 через кабель 11. В цепь, последовательно с элементом, включено образцовое сопротивление  $R_0$  для определения величины электрического тока в цепи по измеренному значению падения напряжения на образцовом сопротивлении. Предварительный подогрев воды до 80-95°C в ёмкости 8 производится водонагревателем 9.



Рис. 1. Внешний вид установки

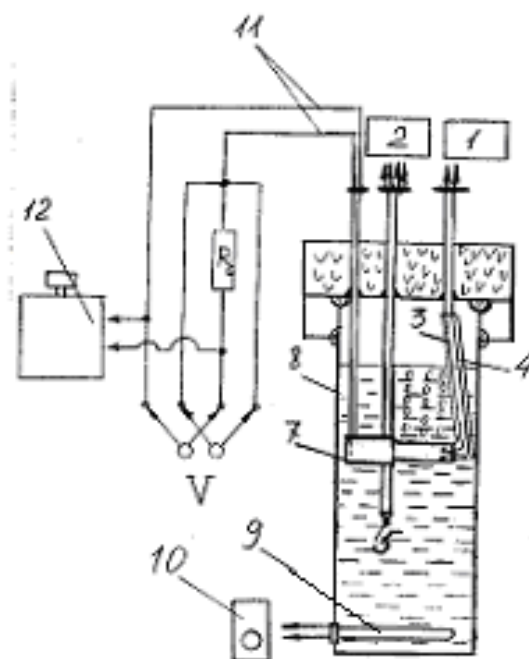


Рис. 2. Схема установки

### 3. Порядок проведения работы

1. Убедиться в том, что термоэлектроды термопар подсоединены к измерителю температуры, а электроподводы к нагревателю надёжно изолированы. Поставить боковое защитное стекло и верхнюю крышку установки 13.
2. Пополнение уровня воды в ёмкости производится резиновой «грушей» через дренажную трубку, расположенную на задней панели установки. Уровень воды в стеклянной ёмкости должен находиться на расстоянии 3-4 см от верхней крышки ёмкости.
3. Подключить ВХОД на ЛАТРе к розетке 220 В, находящейся на задней панели установки.
4. Подсоединить к РЕГУЛИРУЕМОМУ ВЫХОДУ ЛАТРа токоподводы нагревателя медного цилиндра (на задней панели установки). Заземлить установку и ЛАТР.
5. Подключить мультиметр к разъёмам «МУЛЬТИМЕТР», расположенным на передней панели установки.

### Проведение измерений

1. Включить стенд тумблером 5 и измерители температуры 1 и 2.
2. Включить нагреватель ёмкости тумблером «НАГРЕВ ВОДЫ».
3. Через 5-6 минут вода в стеклянной ёмкости должна нагреться выше  $80^{\circ}\text{C}$ . Процесс нагрева воды в стеклянной ёмкости контролировать по измерителю температуры 2, 3-я термопара. При показаниях температуры воды  $t_3 > 80^{\circ}\text{C}$  включить вентилятор, расположенный на задней панели установки, тумблером с подписью «ВЕНТИЛЯТОР».  
**Не доводить до кипения воду. Следить за тем, чтобы уровень воды в стеклянной ёмкости не уменьшался.**
4. Отключить нагреватель тумблером «НАГРЕВ ВОДЫ». При необходимости для достижения заданной температуры воды в ёмкости можно периодически включать нагреватель тумблером «НАГРЕВ ВОДЫ».
5. Переключателем мультиметра установить его на измерение переменного напряжения (см. инструкцию). Переключить тумблер 6 на измерение  $U_H$  – напряжения на нагревательном элементе.
6. Установить выходное напряжение на ЛАТРе 100 В и постепенно его увеличивая (но не более 140 В) довести до режима пузырькового кипения воду на поверхности медного цилиндра.
7. Выйти на режим пузырькового кипения, наблюдая этот процесс визуально и следя за показаниями измерителя температур.
8. Установить температурный напор  $\Delta t \leq 5^{\circ}\text{C}$ , отрегулировав выходное напряжение ЛАТРоМ.
9. Произвести отсчёт температуры жидкости  $t_{\text{ж}}$  по измерителю температуры 2 и температуры стенки медного цилиндра по

измерителям температуры 1 и 2. Первый канал измерителя 1 измеряет температуру в верхней точке боковой поверхности цилиндра –  $t_1$ . Второй канал не задействован. Первый канал измерителя 2 измеряет температуру в нижней точке поверхности цилиндра –  $t_2$ , а второй канал этого же прибора определяет температуру среды  $t_3$ .

10. Произвести отсчёт напряжения на нагревательном элементе  $U_H$  по мультиметру.

11. Переключить тумблер 6 в положение  $U_0$ . Произвести отсчёт напряжения на образцовом сопротивлении  $U_0$ .

### Данные установки

Диаметр цилиндра	$d = 29$ мм
Длина цилиндра	$l = 70$ мм
Образцовое сопротивление	$R_0 = 0,1$ Ом

### Таблица результатов измерений

№ п/п	$U_H$ , В	$U_0$ , В	$I_H$ , А	$t_{ст}$ , °С	$t_{ж}$ , °С	$Q$ , Вт
1						
2						
3						
.....						

### Расчетные соотношения

Площадь поверхности теплообмена

$$F = 2 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot d^2 + \pi \cdot d \cdot l .$$

Поверхностная плотность теплового потока (Вт/м<sup>2</sup>)

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{U_H \cdot U_0}{R_0 \cdot F} .$$

Экспериментальное значение коэффициента теплоотдачи (Вт/м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_{эксн} = \frac{q}{t_{ст} - t_{ж}} .$$

Теоретическое значение коэффициента теплоотдачи при давлении  $p$  (бар)

$$\alpha_T = \frac{3,4 \cdot p^{0,18}}{1 - 0,0045 \cdot p} \cdot q^{0,66} .$$

### **Контрольные вопросы**

1. Понятия температуры насыщения, температуры кипения и центров парообразования.
2. Режим пузырькового кипения.
3. Что такое температурный напор?
4. Что такое критический режим кипения?

### **4. План отчета**

1. Название работы и цель.
2. Схема установки.
3. Краткое описание установки.
4. Таблица результатов измерений.
5. Обработка результатов опытов.
6. Выводы.
7. Ответы на контрольные вопросы.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6.**  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ПЛЁНОЧНОМ РЕЖИМЕ**  
**КИПЕНИЯ**

**Цели работы:**

1. Определение коэффициента теплоотдачи при охлаждении нагретого до  $450^{\circ}\text{C}$  медного цилиндра в кипящей при атмосферном давлении воде в условиях плёночного кипения.
2. Определение температуры предельного перегрева воды при втором кризисе кипения.
3. Определение второй критической плотности теплового потока.

**1. Теоретические основы работы**

Существует два характерных вида кипения: кипение в большом объеме и кипение при вынужденном движении (кипение жидкости в трубах). В данной работе мы рассматриваем первый случай кипения. Принято рассматривать два режима кипения: пузырьковое и пленочное кипение.

На практике пузырьковое кипение встречается намного чаще, чем пленочное. Пузырьковый режим характеризуется высокими значениями коэффициента теплоотдачи и соответственно высокой способностью к отводу тепла при малой разнице температуры жидкости и стенки. Однако при высоких значениях теплового потока поверхность нагрева уже не способна обеспечивать столь же эффективный отвод тепла, что приводит к отрыву поверхности парообразования от поверхности нагрева и между ними образуется слой пара, который и называется паровой пленкой. Теплопроводность пара намного меньше, чем теплопроводность жидкости, потому что при не слишком высоких давлениях и одинаковой температуре у этих двух фаз существенно различаются значения плотности. Резкий рост термического сопротивления системы ведет к резкому повышению температуры поверхности нагрева при том же отводимом тепловом потоке.

В данной работе наблюдение за пленочным режимом кипения происходит следующим образом: медная болванка, заключенная в оболочку из нержавеющей стали, помещается в печь и нагревается там до  $450\text{-}500^{\circ}\text{C}$ . Высокое значение температуры поверхности тела способствует, при погружении в воду, «мгновенному» образованию вокруг нее паровой пленки. Чтобы тепло не расходовалось на догрев воды до температуры насыщения, воду, в которую погружают исследуемый образец, предварительно доводят до кипения.

Процесс остывания образца в кипящей жидкости характеризуется тем, что он происходит при постоянной температуре охлаждающей среды, а режим пленочного кипения характеризуется постоянным значением



коэффициента теплоотдачи. Эти факты служат граничными условиями для регулярного режима охлаждения первого рода.

В охлаждаемом теле связь между временными и пространственными изменениями температуры в любой точке, где происходит теплообмен, устанавливается уравнением теплопроводности. Для тела, в котором отсутствуют источники тепла, уравнение принимает вид:

$$\frac{dt}{d\tau} = a \nabla^2 t, \quad (1)$$

Решение задачи об охлаждении тел приводит к понятию темпа охлаждения:

$$\frac{1}{\vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = -m, \quad (2)$$

где  $\vartheta = \bar{t} - t_{жс}$ ;  $\bar{t}$  – средняя температура тела в момент времени  $\tau$ ;  $t_{жс}$  – температура окружающей среды;  $m$  – темп охлаждения.

Левая часть (2) определяет относительную скорость изменения температуры, которая при регулярном режиме не зависит от координат и времени и является постоянной величиной. Можно показать, что:

$$m = \psi \frac{\bar{\alpha} F}{C}. \quad (3)$$

Уравнение (3) выражает закон сохранения энергии для системы, состоящей из охлаждаемого тела и окружающей среды с постоянной температурой  $t_{жс}$ . Это есть формулировка первой теоремы Кондратьева. Множитель  $\psi$  называется коэффициентом неравномерности распределения температуры. Смысл величины  $\psi$  состоит в отношении средней температуры поверхности тела к температуре тела, усреднённой по всему объёму,  $\psi = \frac{t_C}{\bar{t}}$ .

Процесс охлаждения нагретого до 450-500°C медного образца в нагретой до 100°C воде происходит при плёночном кипении воды на его поверхности с постоянным и относительно невысоким коэффициентом теплоотдачи (рис. 2 и рис. 3). Поэтому величина  $\psi$  близка к 1. При переходном режиме кипения коэффициент теплоотдачи значительно возрастает, что приводит к резкому уменьшению температуры стенки  $t_C$  образца и, следовательно, к увеличению неравномерности температурного поля в образце. При этом  $\psi < 1$ .

Было показано, что регулярный режим определяется не только температурными полями, возникающими в нагреваемом или охлаждаемом теле, но и потоками тепла через его поверхность. В качестве общего свойства теплового регулярного режима можно принять соотношение:

$$\frac{d\bar{t}}{d\tau} = m (\bar{t} - t_{ж}), \quad (4)$$

где:  $\bar{t}$  – средняя по объёму температура тела;  $t_{ж}$  – температура среды.

Для режима плёночного кипения из соотношений (3) и (4) следует, что коэффициент теплоотдачи можно найти по формуле

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{F \cdot \psi} \frac{C_{уд} \cdot M}{(\bar{t} - t_{ж})} \frac{d\bar{t}}{d\tau}, \quad (5)$$

где:  $C_{уд}$  – удельная теплоёмкость металла;  $M$  – масса образца;  $\psi = 1$ .

При переходе от плёночного кипения к пузырьковому возрастает средний коэффициент теплоотдачи. Это приводит к понижению температуры поверхности образца и, следовательно, коэффициента неравномерности распределения температуры в образце.

Для переходной области из соотношений (3) и (4) следует:

$$m = \psi \frac{\bar{\alpha} F}{C} = \psi \bar{\alpha} const \quad (6)$$

Если функция  $\bar{t} = f(\tau)$  непрерывно убывает, а её производная является также непрерывной функцией, то в точке перегиба кривой  $\bar{t} = f(\tau)$  темп охлаждения равен:

$$m = \psi \bar{\alpha} const = \max. \quad (7)$$

Переход от плёночного режима кипения к пузырьковому называют вторым кризисом теплоотдачи при кипении. Минимальная плотность теплового потока при плёночном кипении называется второй критической плотностью теплового потока  $q_{KP2}$ . Соответствующий этой величине температурный напор (точка Б на кривой кипения, рис. 2) называется вторым критическим температурным напором  $\Delta t_{KP2}$ .

Соотношение (7) можно использовать для определения второй критической плотности теплового потока  $q_{KP2}$  и второго критического температурного напора  $\Delta t_{KP2}$  на основе экспериментальных данных  $\bar{t} = f(\tau)$ . Температура, соответствующая точке перегиба функции  $\bar{t} = f(\tau)$ , определяет второй критический температурный напор  $\Delta t_{KP2}$ .

## 2. Схема лабораторной установки

На рис. 1 представлена передняя панель установки, на которой находится тумблер включения сети 1, тумблер включения нагревателей 2, тумблеры 3, 4 включения измерителей температуры ТРМ-200 5, 6. Нагрев цилиндрического образца 11 в печи 7 производится включением диммера 8. Нагрев воды в стеклянной емкости 9 производится включением диммера 10. Перемещение образца 11 из печи в воду производится ползунком 12. Измерители температуры соединены с хромель-копелевыми термопарами 13 и 14, размещенными, соответственно, в центре цилиндрического образца и на его образующей.

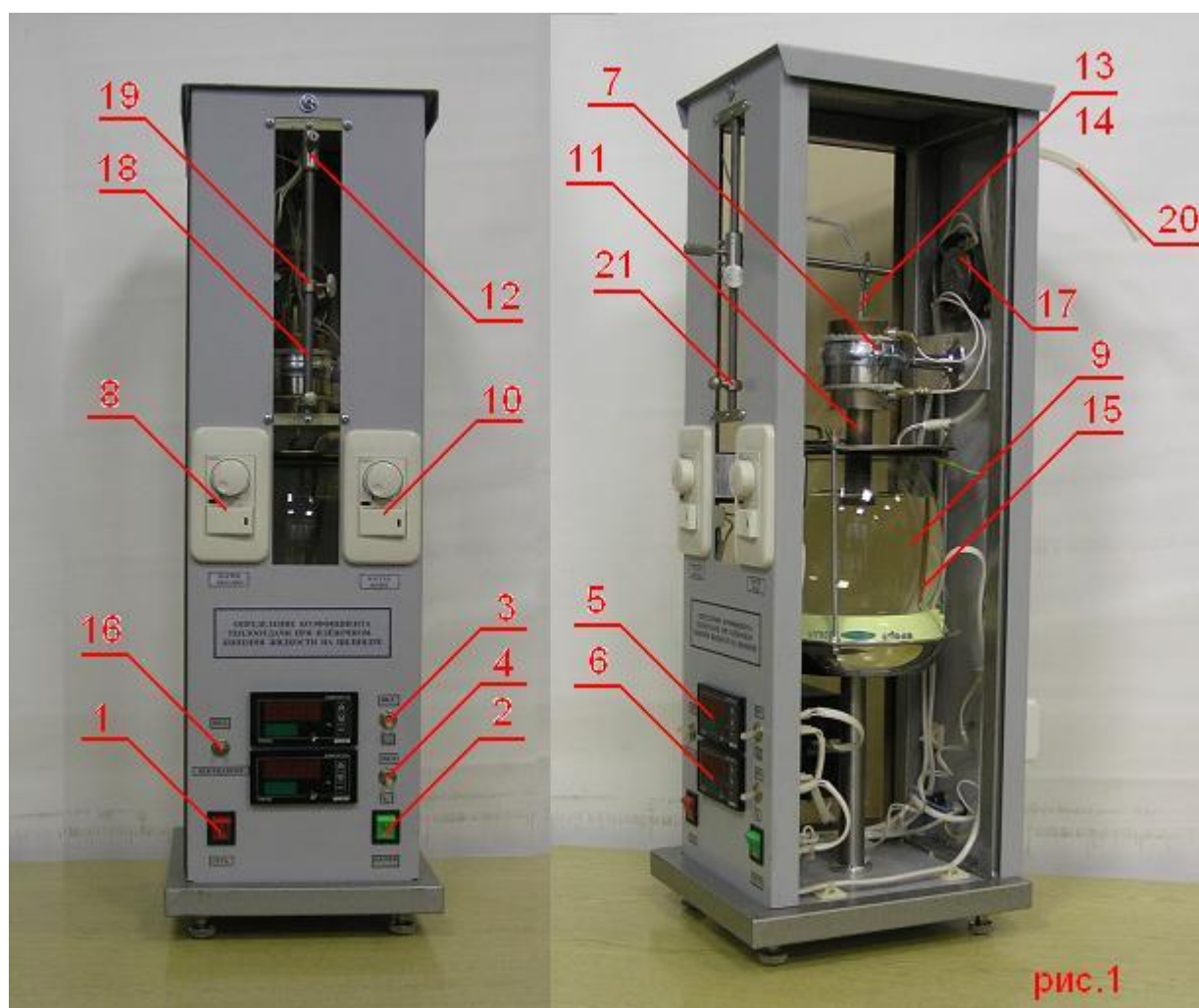


Рис. 1. Общий вид лабораторной установки

Первый канал измерителя температуры 5 подключен к термопаре 13. Первый канал измерителя температуры 6 подключен к термопаре 14. Температура воды в стеклянной емкости измеряется термопарой 15, подключенной ко второму каналу измерителя температуры 6. Тумблер 16 включает вентилятор 17, расположенный на задней панели установки. Вентилятор служит для вытягивания влажного воздуха из корпуса установки. На направляющей 18 расположен фиксирующий зажим 19 для фиксации положения цилиндра в стеклянной емкости. В опыте цилиндр должен быть погружен в воду на 15-35 мм. Глубина погружения влияет на продолжительность пленочного кипения воды на стенках цилиндра. На задней панели установки находится виниловая трубка 20, через которую производится заполнение дистиллированной водой стеклянной емкости 9 до уровня, не превышающего отметки на стенке емкости. В процессе нагрева воды в емкости 9 отверстие в крышке емкости закрывается задвижкой 21. Цилиндрический образец 11 представляет собой тонкостенную оболочку из нержавеющей стали, внутри которой запрессован медный цилиндр.

### **Подготовка установки к работе**

1. Заземлить установку с помощью винта заземления, находящегося на задней панели установки.

2. Залить дистиллированную воду в стеклянную емкость 9 до отметки, обозначенной на стенке емкости, через виниловую трубку 20. Уровень воды в стеклянной емкости должен находиться на расстоянии 4-5 см от верхней крышки емкости.

3. Подключить установку. Проверить заземление установки с помощью тестера.

### **3. Порядок проведения работы**

1. Включить установку тумблером «Сеть» 1.
2. Включить тумблером 2 электропитание диммеров установки.
3. Поместить в электрическую печь 7 образец 11 с помощью ползунка 12. Нижнее основание цилиндрического образца должно находиться на уровне нижнего основания печи.
4. Включить диммером 10 «нагрев воды» нагреватель стеклянной емкости 9. Включение диммера производить в следующем порядке: нажать правую сторону клавиши диммера, при этом должна отключиться неоновая лампочка клавиши; повернуть, с щелчком, круглый регулятор мощности диммера по часовой стрелке.
5. Включить вентилятор 17 с помощью тумблера 16.
6. Включить электропитание печи 7 с помощью диммера 8 «нагрев образца». Включение диммера производить в следующем порядке: нажать правую сторону клавиши диммера, при этом должна отключиться неоновая лампочка клавиши, повернуть, со щелчком, круглый регулятор мощности диммера по часовой стрелке.
7. Установить регулятор мощности диммера 10 в среднее положение.
8. Включить измерители температуры 5 и 6 с помощью тумблеров 3, 4.
9. Нагреть воду в емкости 9 до кипения, контролируя её температуру с помощью измерителя 6. При вскипании жидкости в емкости, уменьшить мощность нагревателя с помощью диммера 10 поворотом его круглой ручки против часовой стрелки до щелчка. В дальнейшем необходимо поддерживать температуру воды в емкости на уровне 95-98°C периодическим включением диммера поворотом его ручки.
10. Нагреть образец 11 до температуры 450°C, контролируя температуру по измерителю температуры 5. При достижении данной температуры выключить нагреватель печи с помощью диммера 8 поворотом его круглой ручки против часовой стрелки до щелчка.
11. С помощью ползунка 12 опустить образец 11 в воду на глубину 15-35 мм, установленную с помощью фиксатора 19.
12. Произвести отсчет показаний термодатчиков 13 и 14 с помощью измерителя температуры 5 через равные промежутки времени секунд 2-5.

13. Охладить образец 11 до температуры жидкости в емкости 9.
14. С помощью клавиш диммеров 8 и 10 отключить нагреватели печи и емкости.
15. С помощью тумблера 2 отключить электропитание диммеров 8 и 10.
16. С помощью тумблеров 3 и 4 отключить электропитание измерителей температуры 5 и 6.
17. С помощью тумблера 1 отключить электропитание установки.

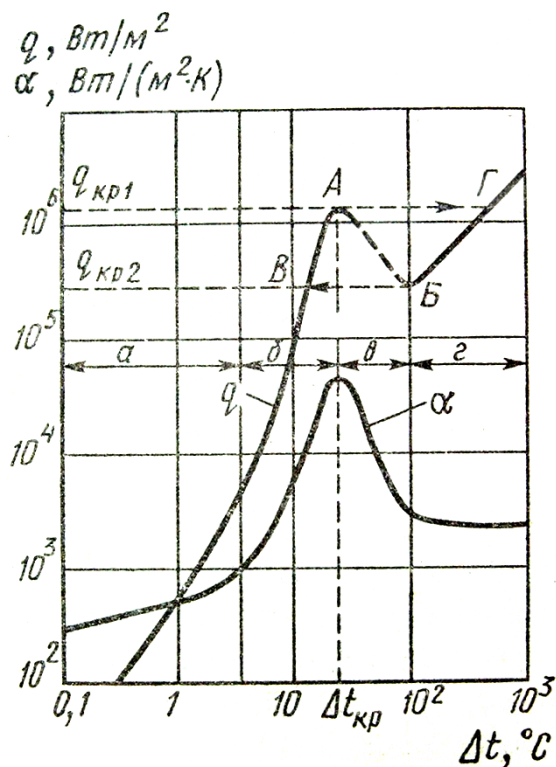


Рис. 2. Зависимость плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи от перепада температур поверхности образца и жидкости

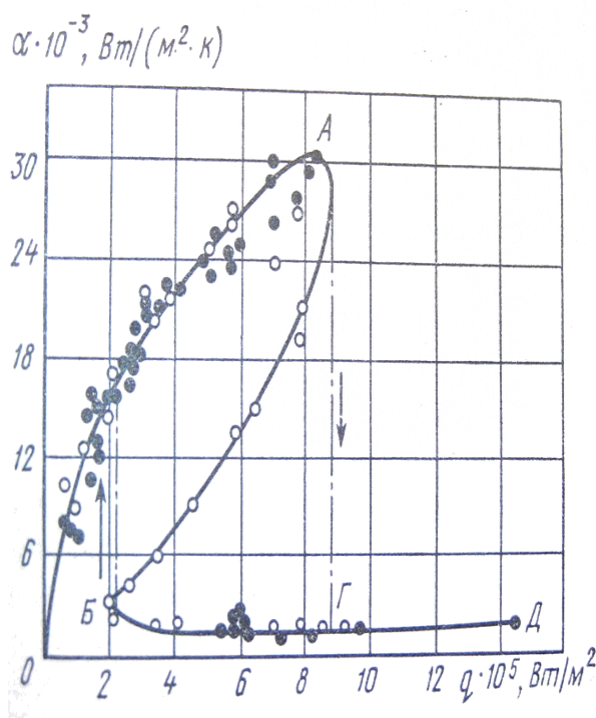


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока

### Проведение измерений

Из экспериментальных данных определяется величина темпа охлаждения на участке пленочного кипения. Если температура ампулы есть функция времени функции  $\bar{t} = f(\tau)$ , тогда:

$$m = \frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\tau_2 - \tau_1}$$

где:

$$\vartheta_\tau = t_\tau - t_{cp} \quad (t_{cp} = 100^\circ\text{C});$$

$t_\tau$  — температура ампулы (в градусах Цельсия) в момент времени  $\tau$ .

Нагретая ампула погружается в кипящую воду на 10 - 35 мм в зависимости от того, какой продолжительности должен быть опыт. Глубина погружения определяет площадь поверхности теплообмена, соответственно, и интенсивность отвода тепла от образца. Если  $h$  – глубина погружения образца, то площадь поверхности теплообмена складывается из двух составляющих:

$$\begin{aligned} F_1 &= \pi \cdot d \cdot h, \\ F_2 &= 0,25 \cdot \pi \cdot d^2, \\ F &= F_1 + F_2, \end{aligned}$$

где:  $d$  – внешний диаметр ампулы (25 мм), индексом «1» обозначена поверхность, образованная боковой поверхностью ампулы, погруженной на глубину  $h$ , а индекс «2» соответствует поверхности дна ампулы.

На участке пленочного кипения темп охлаждения сохраняется постоянным вне зависимости от выбранных моментов времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ .

Удельные теплоемкости материалов ампулы равны:

$$C_{\text{Р медь}} = 390 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad C_{\text{Р сталь}} = 510 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Масса ампулы и ее составляющих равны соответственно:

$$m_{\text{ампула}} = 275 \text{ г}, \quad m_{\text{медь}} = 200 \text{ г}, \quad m_{\text{сталь}} = 75 \text{ г}.$$

По этим данным несложно найти величину средней массовой теплоемкости ампулы:

$$C_{\text{Р ампула}} = C_{\text{Р медь}} \frac{m_{\text{медь}}}{m_{\text{ампула}}} + C_{\text{Р сталь}} \frac{m_{\text{сталь}}}{m_{\text{ампула}}}.$$

Экспериментальное значение коэффициента теплоотдачи находится по формуле:

$$\alpha_{\text{эксп}} = \frac{m \cdot m_{\text{ампула}} \cdot C_{\text{Р ампула}}}{\psi \cdot F},$$

где:  $\psi$  – коэффициент неравномерности распределения температуры в теле; он принимает значения от 0 до 1. Поскольку термическое сопротивление пленки пара много больше, чем сопротивление ампулы, то можно принять  $\psi = 1$ . Из-за малости рабочего участка в данной установке реализуется ламинарное течение паровой пленки. Базируясь на предположении, что толщина паровой пленки есть толщина пограничного слоя, при решении уравнения стационарной теплопроводности для ламинарного движения пленки Нуссельтом была получена теоретическая формула для коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha = c \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda_{\text{п}}^3 \cdot r \cdot g \cdot (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})}{\nu_{\text{п}} \cdot l_0 \cdot \Delta t}},$$

где:  $\lambda_{\text{п}}$  – теплопроводность пара (при  $p = 1$  бар:  $\lambda_{\text{п}} = 2,372 \cdot 10^{-2}$  Вт/(мК));

$\nu_n$  – кинематическая вязкость пара (при  $p = 1$  бар:  $\nu_n = 20.02 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ );  
 $r$  – удельная теплота парообразования (при  $p = 1$  бар:  $r = 2257 \text{ кДж/кг}$ );  
 $g$  – ускорение свободного падения ( $9,8 \text{ м/с}^2$ );  
 $\rho_n$  – плотность насыщенного пара (при  $p = 1$  бар:  $\rho_n = 0,598 \text{ кг/м}^3$ );  
 $\rho_{ж}$  – плотность насыщенной жидкости (при  $p = 1$  бар:  $\rho_{ж} = 958,4 \text{ кг/м}^3$ );  
 $l_0$  – характерный размер поверхности теплообмена (в случае дна  $l_0 = d$ ; в случае боковой поверхности  $l_0 = h$ ).  
 $c$  – поправочный коэффициент на расположение поверхности (в случае горизонтальной поверхности  $c = 0,72$ , в случае вертикальной –  $0,94$ );  
 $\Delta t$  – разница температур между поверхностью теплообмена и жидкостью, в которую она погружена:

$$\Delta t = t_{\text{пов}} - t_{\text{ж}}$$

где: температуру  $t_{\text{пов}}$  можно, учитывая малую толщину стенки ампулы, в первом приближении принять равной температуре на её внутренней поверхности:

$$t_{\text{пов}} = t_{\text{внеш}}$$

( $t_{\text{внеш}}$  – температура внешней термопары, заключенной между медной болванкой и стальным корпусом).

Чтобы найти средний коэффициент теплоотдачи по всей поверхности ампулы, необходимо сложить коэффициенты по поверхностям, предварительно относя их к долям этих поверхностей в общей поверхности ампулы:

$$\alpha_{\text{теор}} = \alpha_{\text{бок}} \cdot \frac{F_1}{F} + \alpha_{\text{дно}} \cdot \frac{F_2}{F}.$$

Получившиеся результаты не должны расходиться более чем на 5%.

Для оценки плотности теплового потока используется соотношение:

$$q = \frac{C_{\text{Рампула}} \cdot (t_{\tau_1}^{\text{cp}} - t_{\tau_2}^{\text{cp}}) \cdot m_{\text{ампула}}}{(\tau_2 - \tau_1) \cdot F},$$

где изменение температуры во времени на коротком участке можно описать линейными функциями:

$$t_{\tau}^{\text{cp}} = \frac{t_{\tau}^{\text{внутр}} + t_{\tau}^{\text{внеш}}}{2}.$$

Индексы «внутр» и «внеш» соответствуют показаниям термопар, расположенных в центре и на поверхности медной болванки.

Вторая критическая плотность теплового потока экспериментально оценивается следующим образом. Сначала находится температура предельного перегрева жидкости, которая, как и температура насыщения, является функцией только давления ( $p$  – давление в барах)

$$t_{\text{пр}} = 300 + 0,33 \cdot (p - 1),$$

затем оценивается величина критического температурного напора

$$\Delta t_{\text{кр2}} = 0,9 \cdot (t_{\text{пр}} - t_{\text{ж}}).$$

Далее, по закону Ньютона - Рихмана можно записать:

$$q_{\text{кр2}}^{\text{эксп}} = \alpha_{\text{кр2}} \cdot \Delta t_{\text{кр2}},$$

где:  $\alpha_{\text{кр2}}$  соответствует значению коэффициента теплоотдачи, полученному в эксперименте. При необходимости это экспериментальное значение можно сравнить с теоретическим, вычисленным по формуле С.С. Кутателадзе:

$$q_{\text{кр2}}^{\text{теор}} = 0,14 \cdot r \cdot \rho_{\text{п}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\sigma \cdot g \cdot (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})}{\rho_{\text{ж}}^2}},$$

где:  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения (при  $p = 1$  бар  $\sigma = 588,6 \cdot 10^{-4}$  Н/м).

### Данные установки

Диаметр стальной ампулы	25 мм
Масса стальной ампулы	0,075 кг
Масса медного цилиндра	0,2 кг

### Таблица результатов измерений

$\tau, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{внут}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{внеш}}, ^\circ\text{C}$

### Расчетные соотношения

Площадь боковой поверхности	$F_1 = \pi \cdot d \cdot h$
Площадь поверхности дна	$F_2 = 0,25 \cdot \pi \cdot d^2$
Общая площадь	$F = F_1 + F_2$
Удельная теплоемкость ампулы	

$$C_{\text{Р ампула}} = C_{\text{Р медь}} \frac{m_{\text{медь}}}{m_{\text{ампула}}} + C_{\text{Р сталь}} \frac{m_{\text{сталь}}}{m_{\text{ампула}}}.$$

Темп охлаждения:

$$m = \frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\tau_2 - \tau_1},$$

где:

$$\vartheta_{\tau} = t_{\tau} - t_{\text{ср}} \quad (t_{\text{ср}} = 100^\circ\text{C}).$$



Экспериментальное значение коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_{\text{эксп}} = \frac{m \cdot m_{\text{ампула}} \cdot C_{\text{Р ампула}}}{\psi \cdot F},$$

где:  $\psi=1$ .

Теоретическая формула для нахождения коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha = c \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda_{\text{п}}^3 \cdot r \cdot g \cdot (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})}{\nu_{\text{п}} \cdot l_0 \cdot \Delta t}},$$

где  $\Delta t = t_{\text{внеш}} - t_{\text{ж}}$ .

$$\alpha_{\text{теор}} = \alpha_{\text{бок}} \cdot \frac{F_1}{F} + \alpha_{\text{дно}} \cdot \frac{F_2}{F}.$$

Вторая критическая плотность теплового потока экспериментально оценивается следующим образом:

$$q_{\text{кр2}}^{\text{эксп}} = \alpha_{\text{кр2}} \cdot \Delta t_{\text{кр2}},$$

где  $\alpha_{\text{кр2}}$  соответствует значению коэффициента теплоотдачи, полученному в эксперименте,

$$\Delta t_{\text{кр2}} = 0,9 \cdot (t_{\text{пр}} - t_{\text{ж}}),$$

$$t_{\text{пр}} = 300 + 0,33 \cdot (p - 1), \quad (p - \text{давление в барах}).$$

Теоретическое значение второй критической плотности теплового потока вычисляется по формуле С.С. Кутателадзе:

$$q_{\text{кр2}}^{\text{теор}} = 0,14 \cdot r \cdot \rho_{\text{п}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\sigma \cdot g \cdot (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})}{\rho_{\text{ж}}^2}},$$

где  $\sigma = 588,6 \cdot 10^{-4}$  Н/м.

### Контрольные вопросы

1. Характерные особенности пленочного режима кипения.
2. Регулярный режим охлаждения тел.
3. Темп охлаждения.
4. Кризис теплоотдачи при кипении.

### 4. План отчета

1. Название работы и цель.
2. Схема установки.
3. Краткое описание установки.
4. Таблица результатов измерений.
5. Обработка результатов опытов.
6. Выводы.
7. Ответы на контрольные вопросы.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7.**  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ**  
**ТОНКОЙ ВОЛЬФРАМОВОЙ ПРОВОЛОКИ, НАГРЕВАЕМОЙ**  
**ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ**

**Цель работы:** экспериментальное определение интегрального коэффициента излучения тонкой вольфрамовой проволоки, нагретой электрическим током в интервале температур от 100 до 800°С.

**1. Теоретические основы лабораторной работы**

В основе калориметрического метода лежит уравнение для результирующего потока излучения с поверхности вольфрамовой проволоки:

$$E = \varepsilon_1 C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (1)$$

где:  $\varepsilon_1$  – степень черноты

вольфрамовой нити;  $C_0$  – излучательная способность абсолютно чёрного тела. Поскольку площадь поверхности вольфрамовой проволоки мала по сравнению с площадью поверхности оболочки ( $F_1 \ll F_2$ ), формула содержит только искомое значение  $\varepsilon_1$ . Предполагается, что тела серые и поэтому  $\varepsilon_1 = A_1$ . Для определения  $\varepsilon_1$  необходимо измерить температуру проволоки  $T_1$  и температуру стенки внутренней стеклянной трубки  $T_2$  (в шкале Кельвина) и определить плотность потока излучения с поверхности проволоки:

$$E = Q/(\pi dl), \quad (2)$$

где:  $Q = U_R (U_0/R_0)$ ;  $d$  – диаметр вольфрамовой проволоки;  $l$  – длина проволоки.

Температура вольфрамовой проволоки определяется по формуле:

$$t_1 = t_n = \frac{R_n - R_{он}}{\alpha \cdot R_{он}}, \quad (3)$$

где:

$R_{он}$  – сопротивление вольфрамовой проволоки при  $t_1 = 0^\circ\text{C}$ ;

$R_t = U_R/I$  – сопротивление проволоки при данной температуре,  $I = U_0/R_0$ ;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления вольфрама.

При отсутствии данных для  $R_{он}$  (сопротивление нити при  $t_n = 0^\circ\text{C}$ ) используются данные для  $R_{нк}$  при комнатной температуре  $t_k$  (измеряется  $R_{нк}$  мультиметром при отключённом нагревателе). При этом формула (3) для расчёта температуры вольфрамовой проволоки ( $^\circ\text{C}$ ) приобретает вид:

$$t_1 = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{R_t}{R_{нк}} - 1 \right) + \frac{R_t}{R_{нк}} t_k. \quad (4)$$



вольфрамовой проволокой включено образцовое сопротивление  $R_0$  для определения величины электрического тока в цепи по измеренному значению падения напряжения на нем. Для измерения напряжения на вольфрамовой проволоке  $U_n$  и напряжения на образцовом сопротивлении  $U_0$  к разъёмам  $V$  подключается мультиметр  $I$ .

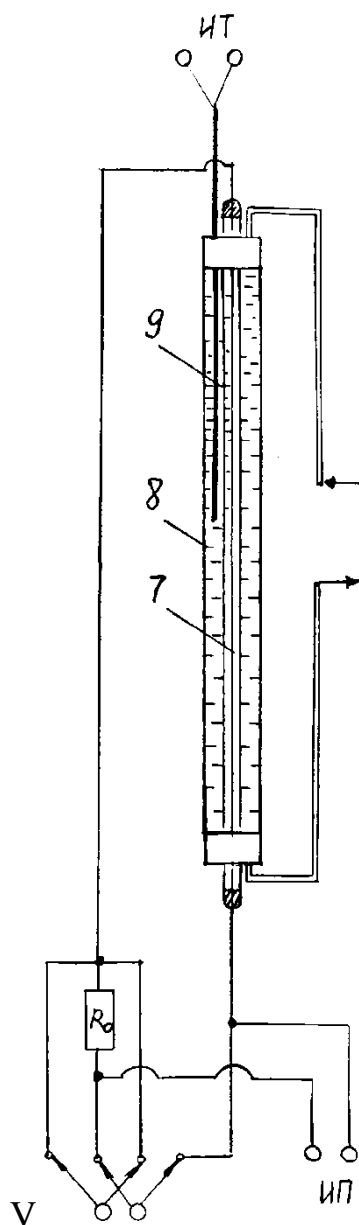


Рис. 2. Принципиальная схема рабочего участка лабораторной установки

### 3. Порядок проведения лабораторной работы

1. Перед выполнением работы измерить мультиметром (в режиме измерения сопротивления) электрическое сопротивление вольфрамовой проволоки  $R_{\text{нк}}$  при комнатной температуре  $t_{\text{к}}$ .
2. Записать данные установки, условия опыта.
3. Убедиться в том, что все приборы выключены. Повернуть регулятор напряжения блока питания против часовой стрелки до упора. Включить стенд тумблером 3. Включить источник питания 4, мультиметр 1, установив переключатель режимов на измерение постоянного напряжения, и измеритель температуры 2.
4. Определить значения напряжения (задаются преподавателем), при которых проводятся измерения. Рекомендуемые значения напряжения, устанавливаемые на блоке питания: 6, 8, 10, 12, 15 вольт.
5. Переключить тумблер 5 в положение  $U_{\text{н}}$ . Установить первое значение напряжения на нити, следя за показаниями вольтметра. Произвести отсчет напряжения на нити  $U_{\text{н1}}$ .
6. Переключить тумблер 5 в положение  $U_{\text{о}}$ . Произвести отсчет напряжения на образцовом сопротивлении  $U_{\text{о1}}$ .
7. Определить температуру стенки трубки  $t_2$  по показаниям измерителя температур 2.
8. Пункты 4 и 5 повторить для следующих значений напряжения  $U_{\text{н}}$ , устанавливаемых на нити.
9. Убрать напряжение на нити. Выключить приборы и стенд.

#### Данные установки

Диаметр вольфрамовой проволоки	$d_1 = 0,15 \text{ мм}$
Внутренний диаметр трубки	$d_2 = 8 \text{ мм}$
Образцовое сопротивление	$R_0 = 0,1 \text{ Ом}$
Температурный коэффициент сопротивления	$\alpha = 0,004 \text{ 1/К}$
Длина нити	$l = 450 \text{ мм.}$

#### Таблица результатов измерений

№ п/п	$U_{\text{н}}, \text{ В}$	$U_{\text{о}}, \text{ В}$	$I_{\text{н}}, \text{ А}$	$T_1, \text{ К}$	$T_2, \text{ К}$	$Q, \text{ Вт}$
1						
2						
3						
.....						

### Расчетные соотношения

Величина тока, протекающего по рабочему участку:

$$I_{\text{н}} = \frac{U_0}{R_0}.$$

Величина теплового потока на рабочем участке:

$$Q = U_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}}.$$

Сопротивление рабочего участка:

$$R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}}.$$

Температура рабочего участка:

$$t_{\text{н}} = \frac{1}{\alpha} \cdot \left( \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{к}}} - 1 \right) + \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{к}}} \cdot t_{\text{к}}.$$

Степень черноты вольфрама:

$$\varepsilon_1 = \frac{E}{C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]},$$

где:  $C_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$  – излучательная способность абсолютно чёрного тела.

Полученное значение степени черноты сравнить с табличным значением (приложение 4) и объяснить расхождение этих значений.

### Контрольные вопросы

1. Понятие лучистой энергии.
2. Закон Стефана - Больцмана.
3. Степень черноты и коэффициент излучения, их физический смысл.
4. Приведенная степень черноты тела. Расчетное уравнение для определения степени черноты тела.
5. Закон Кирхгофа и его следствия.

### 4. План отчета

1. Название работы и цель.
2. Схема установки.
3. Краткое описание установки.
4. Таблица результатов измерений.
5. Обработка результатов опытов.
6. Выводы.
7. Ответы на контрольные вопросы.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

#### Плотность, коэффициент теплопроводности, теплоемкость и коэффициент температуропроводности различных материалов

Наименование материала	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$t$ , °C	$\lambda$ , Вт/(м·град)	$c$ , кДж/(кг·град)	$\alpha \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
Асбест листовой	770	30	0,1163	0,816	0,186
Асфальт	2110	20	0,6978	2,09	0,156
Бетон	2300	20	1,279	1,13	0,622
Глина огнеупорная	1850	450	1,035	1,089	0,051
Дуб (поперек волокон)	800	20	0,207	1,758	0,147
Земля влажная	1700	17	0,657	2,01	0,192
Каменный уголь	1400	20	0,186	1,31	0,103
Кирпич красный	1800	0	0,768	0,879	—
Кирпич огнеупорный	1900	0	0,814	0,837	0,514
Лед	920	0	2,25	2,26	1,08
Минеральная вата	200	50	0,0465	0,921	0,253
Накипь котельная	1000÷2500	100	1,314÷3,14	—	—
Песок сухой	1500	20	0,326	0,795	2,74
Пробковая пластина	200	27	0,0419	1,884	0,117
Резина твердая	1200	0	0,169	1,382	0,098
Сахарный песок	1600	0	0,582	1,256	0,278
Слюда	290	20	0,582	0,879	2,28
Снег	560	—	0,465	2,09	0,4
Стекло	2500	20	0,744	0,67	0,444
Стеклянная вата	200	0	0,037	0,67	0,278
Фибра		0	0,408		—
Шлаковая вата	250	100	0,0698	—	—
Штукатурка известковая	1600	0	0,698	0,837	—
Алюминий	2670	0	204	0,921	86,7
Латунь	8600	0	85	0,377	33,8
Медь	8800	0	384	0,381	112,5
Никель	9000	20	58	0,461	17,8
Олово	7230	0	64	0,221	41,1
Ртуть	13600	0	7,9	0,138	4,3
Свинец	11400	0	35	0,13	23,6
Серебро	10500	0	458	0,234	170
Сталь углеродистая (C = 0.5%)	7900	20	45	0,461	14,7
Сталь нержавеющая					~5,6
Чугун	7220	20	63	0,502	17,0
Сажа ламповая	165	40	0,166	—	—
Вода	199,9	0	0,5513	4,212	0,131
Воздух (сухой)	1,293	0	0,0244	1,005	18,8
Кислород	1,429	0	0,0247	0,915	18,9
Азот	1,25	0	0,0243	1,03	18,9
Водород	0,0899	0	0,1721	14,192	135,0
Оксид углерода	1,25	0	0,0233	1,039	17,9

**Физические свойства воздуха при атмосферном давлении**

$T, K$	$t, ^\circ C$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{Кдж}/(\text{кг}\cdot K)$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт}/(\text{м}\cdot K)$	$\alpha \cdot 10^5, \text{м}^2/\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$Pr$
273	0	1,293	1,005	2,44	1,881	13,28	0,707
283	10	1,247	1,005	2,51	2,006	14,16	0,705
293	20	1,205	1,005	2,59	2,142	15,06	0,703
303	30	1,165	1,005	2,67	2,286	16	0,701
313	40	1,128	1,005	2,76	2,431	16,96	0,699
323	50	1,093	1,005	2,83	2,572	17,95	0,698
333	60	1,060	1,005	2,90	2,720	18,97	0,696
343	70	1,029	1,009	2,97	2,856	20,02	0,694
353	80	1,000	1,009	3,05	3,020	21,09	0,692
363	90	0,972	1,009	3,13	3,189	22,1	0,69
373	100	0,948	1,009	3,21	3,364	23,13	0,688
393	120	0,898	1,009	3,34	3,684	25,45	0,686



**Физические параметры воды на линии насыщения**

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5},$ Па	$\rho,$ кг/м <sup>3</sup>	$c_p,$ кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6,$ м <sup>2</sup> /с	$\sigma \cdot 10^5,$ Н/м	$\beta \cdot 10^4,$ К <sup>-1</sup>	$Pr$
0	1,013	999,9	4,212	55,1	1,789	75,6	-0,63	3,67
10	1,013	999,7	4,191	57,5	1,306	74,1	+0,70	9,52
20	1,013	999,2	4,183	59,9	1,006	72,6	1,82	7,02
30	1,013	995,7	4,174	61,8	0,805	71,2	3,21	5,42
40	1,013	992,2	4,174	63,5	0,659	69,6	3,87	4,31
50	1,013	988,1	4,174	64,8	0,556	67,6	4,49	3,54
60	1,013	983,2	4,179	65,9	0,478	66,2	5,11	2,98
70	1,013	977,8	4,187	66,8	0,415	64,4	5,70	2,55
80	1,013	971,8	4,195	67,5	0,365	62,5	6,32	2,21
90	1,013	965,3	4,208	68,0	0,326	60,6	6,95	1,95
100	1,01	958,4	4,220	68,3	0,295	58,8	7,52	1,75
120	1,99	943,1	4,250	68,6	0,252	54,8	8,64	1,47
140	3,61	926,1	4,287	68,5	0,217	50,7	9,72	1,26
160	6,18	907,4	4,346	68,3	0,191	46,6	10,7	1,10
180	10,03	886,9	4,417	67,5	0,173	42,3	11,9	1,00
200	15,55	863,0	4,505	66,3	0,158	37,7	13,3	0,93
220	23,20	840,3	4,614	64,5	0,148	33,2	14,8	0,89
240	33,48	813,6	4,756	62,8	0,141	28,5	16,8	0,87
260	46,94	784,0	4,949	60,5	0,135	23,7	19,7	0,87
280	64,19	750,7	5,230	57,5	0,131	19,1	23,7	0,90
300	85,92	712,5	5,736	54,0	0,128	14,4	29,2	1,97
320	112,90	667,1	6,574	50,6	0,128	9,81	38,2	1,11
340	146,08	610,1	8,165	45,7	1,127	5,67	53,4	1,39
360	186,74	528,0	13,985	39,6	1,126	2,02	109	2,35

**Степени черноты полного излучения различных материалов**

Материал и характер поверхности	$t, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon$
Алюминий полированный	225-575	0,090-0,057
Алюминий шероховатый	26	0,055
Алюминий окисленный при 600 °C	200-600	0,11-0,19
Вольфрамовая нить	3300	0,39
Сталь листовая шлифованная	940-1100	0,52-0,61
Сталь окисленная	200-600	0,80
Сталь окисленная шероховатая	40-370	0,94-0,97
Жесть листовая оцинкованная (очень блестящая)	28	0,228
Жесть листовая оцинкованная (окисленная)	24	0,276
Жесть листовая луженая (блестящая)	25	0,043-0,064
Чугун шероховатый сильно окисленный	40-250	0,95
Чугун расплавленный	1300	1400
Золото тщательно полированное	225-625	0,018-0,035
Латунь тщательно полированная	245-375	0,028-0,039
Латунь окисленная при нагреве до 600 °C	200-600	0,61-0,59
Медь тщательно полированная электролитная	80	0,018
Медь окисленная при нагреве до 600 °C	200-600	0,57-0,55
Медь расплавленная	1075-1275	0,11-0,13
Никель окисленный до 600 °C	200-600	0,11
Платина чистая полированная	225-625	0,054-0,104
Платиновая проволока	225-1375	0,073-0,181
Серебро полированное	38-370	0,0221-0,0312
Снег	0	0,96
Асбестовый картон	24	0,96
Асбошифер	20	0,96
Шамотный кирпич глазурованный	1100	0,75
Магнезитовый кирпич	1500	0,39
Силикатный кирпич (95 % SiO <sub>2</sub> )	1230	0,66

## **ЛИТЕРАТУРА**

### **Основная:**

1. Теплотехника: Учеб.для вузов/В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; Под ред. В.Н. Луканина. – 7-е изд., испр. – М.: Высш. Шк., 2009. – 671 с.
2. Скрипов П.В., Баранова О.Ю., Усков В.С. Теоретические основы теплотехники. Техническая термодинамика: учебное пособие. – Екатеринбург: УрИ ГПС МЧС России, 2008.
3. Скрипов П.В., Баранова О.Ю., Усков В.С. Теоретические основы теплотехники. Теплопередача: учебное пособие. – Екатеринбург: УрИ ГПС МЧС России, 2008.
4. Скрипов П.В., Усков В.С., Баранова О.Ю. Теплотехника. Учебный справочник. – Екатеринбург: УрИ ГПС МЧС России, 2009.
5. Александров А.А. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок. Учебное пособие для вузов / А.А. Александров. – М.: Издательство МЭИ, 2004.
6. Королев В.Н., Толмачев Е.М. Техническая термодинамика: учебное пособие для вузов / В.Н. Королев, Е.М. Толмачев. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001.

### **Дополнительная:**

1. Кошмаров Ю.А., Башкирцев М.П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле / Ю.А. Кошмаров, М.П. Башкирцев. – М.: ВИПТШ МВД РФ, 1987.
2. Егоров Г.И. Практическое применение законов термодинамики и рекомендации в исследовании пожаров / Г.И. Егоров. – Челябинск: НБС, 2000.
3. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высшая школа, 1969.