

**КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ**  
*Кафедра технической физики и энергетики*

**О.В. ИОВЛЕВА, В.М. ЛАРИОНОВ**

**ОСНОВЫ ТЕПЛОМАССООБМЕНА И**  
**ГИДРОДИНАМИКИ**

**Казань - 2019**

УДК 621.1.016.7(075)

ББК 31.31я7

*Принято на заседании учебно-методической комиссии ИИ  
Протокол № 2 от 27 февраля 2019 года*

**Рецензенты:**

доктор физико-математических наук,  
профессор Институт механики и машиностроения **Р.Г. Зарипов;**  
доктор технических наук,  
профессор Казанского государственного энергетического университета,  
**Ю.В. Ваньков**

**Под общей редакцией**

Директора Инженерного института, зав. кафедрой технической физики и  
энергетики, доктора технических наук, профессора, члена-корреспондента АН  
РТ **Н.Ф. Кашапова**

**Иовлева О.В., Ларионов В.М.**

**Иовлева О.В. Основы теплообмена и гидродинамики /**

О.В. Иовлева, В.М. Ларионов. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2019. – 96с.

Цель настоящего пособия заключается в обзоре базовых понятий теплообмена и гидродинамики, в рассмотрении физического смысла процессов переноса теплоты и массы в пространстве и времени. Пособие охватывает минимальный, но необходимый материал по данной тематике. Так же представлены лабораторные работы для изучения процессов теплопередачи и гидродинамики.

Учебное пособие предназначено для студентов, изучающих дисциплины «Теория теплообмена», «Механика жидкости газа и плазмы».

Подготовлено на кафедре технической физики и энергетики.

© Иовлева О.В., Ларионов В.М., 2019

© Казанский университет, 2019

### **Правила по технике безопасности**

1. Перед проведением лабораторной работы необходимо уяснить содержание поставленной задачи экспериментального исследования, ознакомиться с основами теории изучаемого явления и физической сущностью измеряемых величин.
2. Включение и выключение лабораторной установки производится преподавателем.
3. Во избежание несчастных случаев запрещается заходить за имеющиеся ограждения, трогать приборы, расположенные за лицевой частью установки, облакачиваться на приборы.
4. Запрещается оставлять без надзора включенную установку.
5. В процессе выполнения работы необходимо строго выдерживать указанную в данных методических указаниях последовательность операций и заданные режимы.
6. Результаты измерений в каждом режиме необходимо показать преподавателю и только после этого переходить к следующему режиму.
7. Ознакомившись с правилами по технике безопасности, расписаться в журнале.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение .....</b>	<b>5</b>
<b>I.Определение среднего коэффициента теплоотдачи при вынужденном ламинарном движении жидкости в трубе круглого сечения при ее охлаждении в условиях естественной конвекции .....</b>	<b>6</b>
<b>II.Определение проницаемости воздуха через мелкопористые керамические перегородки .....</b>	<b>14</b>
<b>III.Определение коэффициента внутреннего трения в жидкости при различных температурах.....</b>	<b>25</b>
<b>IV.Определение коэффициента внутреннего трения воздуха при различных температурах .....</b>	<b>33</b>
<b>V.Исследование теплообмена излучением.....</b>	<b>38</b>
<b>VI.Определение коэффициента теплоотдачи при естественной конвекции на обогреваемом цилиндре .....</b>	<b>45</b>
<b>VII.Определение коэффициента теплопроводности воздуха методом нагретой нити.....</b>	<b>51</b>
<b>VIII.Определение коэффициента температуропроводности твердых тел методом регулярного режима .....</b>	<b>62</b>
<b>IX.Определение удельной теплоёмкости воздуха при постоянном давлении</b>	<b>70</b>
<b>X.Определение коэффициента теплопроводности твёрдых тел методом цилиндрического слоя .....</b>	<b>75</b>
<b>XI.Исследование теплопередачи при вынужденном течении нагретой жидкости в трубе круглого сечения («труба в трубе») .....</b>	<b>81</b>
<b>XII.Оределение коэффициента теплоотдачи методом регулярного режима ..</b>	<b>89</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>96</b>

## Введение

Процесс обучения студентов по специальности «Техническая физика» включает ряд теоретических и практических дисциплин.

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

- Стационарная теплопроводность.
- Нестационарная теплопроводность.
- Свободная (естественная) конвекция.
- Вынужденная конвекция.

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, экспериментального исследования.

Приводится принципиальная схема лабораторной установки, подробно излагается методика проведения эксперимента и обработки опытных данных.

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

# I. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ЛАМИНАРНОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ЕЕ ОХЛАЖДЕНИИ В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

**Цель работы:** исследование коэффициента теплопередачи при вынужденном течении жидкости в трубе круглого сечения.

## 1. Основные теоретические сведения

### 1.1 Гладкая труба

При движении жидкостей и газов в трубах и каналах существуют ламинарный ( $Re_{ж,d} \leq 2300$ ), турбулентный ( $Re_{ж,d} \geq 10^4$ ) и переходный от ламинарного к турбулентному ( $2300 < Re_{ж,d} < 10^4$ ) режимы течения жидкости.

Средний коэффициент теплоотдачи при ламинарном вязкостно-гравитационном режиме течения ( $Re_{ж,d} \leq 2300$ ) и ( $Gr_{ж,d} \cdot Pr_{ж} \geq 8 \cdot 10^5$ ) может быть рассчитан по критериальному уравнению, полученному М. А. Михеевым:

$$\overline{Nu}_{ж,d} = 0,15 \cdot Re_{ж,d}^{0,33} \cdot Pr_{ж}^{0,33} \cdot (Gr_{ж,d} \cdot Pr_{ж})^{0,1} \cdot \varepsilon_t \cdot \bar{\varepsilon}_l, \quad (1.1)$$

Здесь и далее  $Nu, Gr, Re, Pr, Pe$  – критерии подобия.

Поправочный коэффициент  $\bar{\varepsilon}_l$ , учитывающий влияние на теплоотдачу гидродинамической стабилизации потока на начальном участке теплообмена, равен:

при  $l/d < 50$  значение  $\bar{\varepsilon}_l$ , находят по данным табл. 1;

при  $l/d \geq 50$  -  $\bar{\varepsilon}_l = 1$ .

Значение  $\bar{\varepsilon}_l$  при вязкостно-гравитационном режиме течения жидкости

Таблица 1.1 - Значение  $\bar{\varepsilon}_l$  при вязкостно-гравитационном режиме течения жидкости

$l/d$	1	2	5	10	15	20	30	40	50
$\bar{\varepsilon}_l$	1,9	1,7	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,0

При ламинарном вязкостном режиме течения ( $Re_{ж,d} \leq 2300$ ) и  $Gr_{ж,d} \cdot Pr_{ж} < 8 \cdot 10^5$  средний коэффициент теплоотдачи  $a_1$  может быть определен по уравнению:

$$\overline{Nu}_{ж,d} = 0515 \cdot \left( Pe_{ж,d} \cdot \frac{d}{l} \right)^{0,33} \left( \frac{\mu_c}{\mu_{ж}} \right)^{0,14} \cdot \bar{\varepsilon}_l, \quad (1.2)$$

где  $\mu_c$  - кинематическая вязкость жидкости при температуре стенки,  $\mu_{ж}$  - кинематическая вязкость жидкости при  $t = t_c - 0,5\Delta t_{cp}$  ( $\Delta t_{cp}$  – средний температурный напор),  $\bar{\varepsilon}_l$  принимается равным единице при данном соотношении  $l/d$ .

Средний коэффициент теплоотдачи при турбулентном течении жидкости ( $Re_{ж,d} \geq 10^4$ ) в прямых гладких трубах рассчитывают по формуле М. А. Михеева:

$$\overline{Nu}_{ж,d} = 0,021 \cdot Re_{ж,d}^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \cdot \varepsilon_t \cdot \bar{\varepsilon}_l \quad (1.3)$$

Поправочный коэффициент  $\varepsilon_t \bar{\varepsilon}_l$ , учитывающий влияние на теплоотдачу гидродинамической стабилизации потока на начальном участке теплообмена, равен:

при  $l/d < 50$  -  $\bar{\varepsilon}_l \approx 1 + 2d/l$ ;

при  $l/d > 50$  -  $\bar{\varepsilon}_l = 1$ .

Переходный режим течения ( $2300 < Re_{ж,d} < 10^4$ ) характеризуется перемежаемостью ламинарного и турбулентного течений. В этом случае коэффициент теплоотдачи можно рассчитать по формуле:

$$\overline{Nu}_{ж,d} = K_0 \cdot Pr_{ж,d}^{0,43} \cdot \varepsilon_t \cdot \bar{\varepsilon}_l, \quad (1.4)$$

где комплекс  $K_0$  зависит от числа Рейнольдса (таблица 1.2), а поправку  $\bar{\varepsilon}_l$  рассчитывают так же, как и при турбулентном режиме течения.

Зависимость комплекса  $K_0$  от числа Рейнольдса

Таблица 2 - Зависимость комплекса  $K_0$  от числа Рейнольдса

$Re \cdot 10^{-3}$	2,2	2,3	2,5	3,0	3,5	4,0	5	6	7	8	9	10
$K_0$	2,2	3,6	4,9	7,5	10	12,2	16,5	20	24	27	30	33

Поправку  $\varepsilon_e \varepsilon_t$  в формулах (1.1), (1.2),(1.3) и (1.4), учитывающую изменение физических свойств среды от температуры, рассчитывают по формуле

$$\varepsilon_t = \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} \quad (1.5)$$

где  $Pr_{ж}$  принимают по справочным данным для текучей среды при средней температуре жидкости, а  $Pr_c$  - при температуре стенки.

Теплоотдача от трубы к воздуху происходит посредством естественной конвекции. При малых температурных напорах вокруг трубы образуется пленка нагретого воздуха. Этот режим называется пленочным. При этом,  $Gr_{ж,d} \cdot Pr_{ж} \leq$

1,  $Nu_{ж,d} = 0,5$  и  $a = 0,5 \cdot \left(\frac{\lambda_{ж}}{d}\right)$ . Теплообмен определяется теплопроводностью воздуха. При увеличении температурного напора возможно разрушение ламинарного течения вокруг трубы. В этом случае расчет коэффициента теплоотдачи производится по критериальной зависимости:

$$\overline{Nu}_{ж,d} = 0,5 \cdot (Gr_{ж,d} \cdot Pr_{ж})^{0,25} \cdot \varepsilon_t.$$

Так как  $d_2/d_1 \leq 1,8$ , то коэффициент теплопередачи можно приближённо считать таким же что и через плоскую стенку, а учитывая то, что коэффициент теплопроводности материала стенки (для меди  $\lambda = 384 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$  град) много больше чем значение  $\ln(d_2/d_1)$ , можно записать:

$$k_1 = \frac{1}{1/a_1 + 1/a_2}. \quad (1.6)$$

## 1.2 Оребренная труба

Тепловой поток через внутреннюю поверхность трубы равен:

$$Q = a_1(t_{ж1} - t_{c1})S_1, \quad (1.7)$$

где  $S_1 = \pi L d_1$  - площадь внутренней поверхности трубы;

$a_1$  - коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности трубы;

$t_c$  - температура стенки трубы ( для медной трубы можно считать, что температура на внутренней поверхности равна (приближённо) температуре на её внешней поверхности;

$t_{ж1}$  - температура жидкости в трубе;

$L$  - длина трубы.

Тепловой поток через внешнюю оребренную поверхность трубы равен:

$$Q = a_2(t_{c2} - t_{ж2})S \quad (1.8)$$

$a_2$  - коэффициент теплоотдачи на внешней оребренной поверхности трубы;

$t_c$  - температура стенки трубы;

$t_{ж2}$  - температура воздуха около трубы ( $t_{ж2} = t_0$ );

$S$  - суммарная площадь ребер и поверхности трубы между рёбрами ( $S = S_p + S_2$ );

$S_2$  - площадь внешней поверхности гладкой части трубы равная  $S_2 = \pi d_2 L - \delta \pi d_2 n$  ( $n$  - число ребер;  $\delta$  - толщина ребра);

$S_p$  - площадь поверхности ребер равная

$$S_p = 2n\pi(d_p^2 - d_2^2)/4.$$



Температуру на внешней поверхности трубы можно принять равной температуре на внутренней её поверхности  $t_{c1}$  так как величина термического сопротивления теплопроводности медной тонкостенной трубы на несколько порядков меньше величины термического сопротивления теплоотдачи на внешней ее поверхности.

Средняя по длине температура поверхности рёбер определяется из соотношения:

$$t_c = (t_6 + t_5)/2.$$

Учитывая соотношение (2) коэффициент теплопередачи через ребристую стенку можно представить в виде:

$$k_2 = \frac{1}{1/a_1 + S_2/a_2S}, \quad (1.9)$$

где  $S/S_2$  - коэффициент оребрения.

Количество тепла переносимое жидкостью с учётом массового расхода  $G$  рассчитывается по соотношению:

$$Q = c_p \cdot G \cdot (t_{ж1}^1 - t_{ж1}^2), \quad (1.10)$$

$t_{ж1}^1$  - температура воды на входе в гладкую или оребренную трубу;

$t_{ж1}^2$  - температура воды на выходе из гладкой или оребренной трубы.

## **2. Программа исследования**

### **2.1 Описание экспериментальной установки**

Схема экспериментальной установки приведена на рисунках 1.1, 1.2. На передней панели 1 находится двухканальный измеритель температуры 2 типа ТРМ200, подключённый к восьми хромель-копелевым термопарам ( $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8$ ), через переключатель термопар 13, соединённым с первым каналом измерителя температур. В нижней части панели находятся три выключателя – “Сеть”, “Нагреватель термостата”, “Насос термостата”. Рабочим участком является две медные гладкие 4 и две оребрённые 3 труба, соединённые последовательно, через которые циркулирует нагретая в водоподогревателе (термостате) 5 вода. Объёмный расход воды измеряется расходомером 8 (или ротаметром 9 для малых расходов  $G = (8 - 10)10^{-3}$  л/с). На входном патрубке водоподогревателя (термостата) находится кран  $K_1$ , регулирующий величину объёмного расхода воды в трубах 4 и 3. Циркуляционный насос 10 прокачивает нагретую в водоподогревателе (термостате) воду по трубе 4 и 3. Кран  $K_2$  служит для удаления воздуха из системы при её заполнения водой. Заполнение системы водой производится

через расширительный бачёк 11 при открытом кране К1 и К2 (или вентиль Маевского).



Рисунок 1.1 Блок термостата с циркулярным насосом

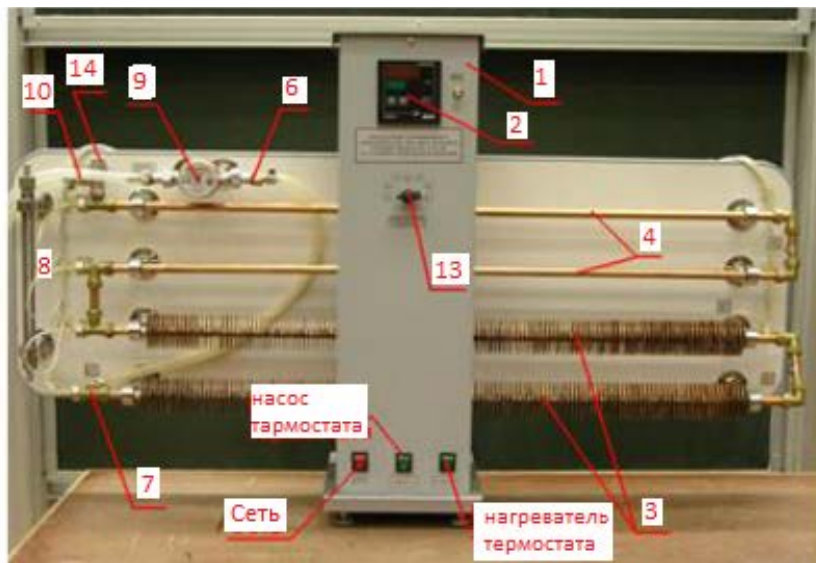


Рисунок 1.2 Панель управления с рабочим участком установки

Температура жидкости в водоподогревателе (термостате) регулируется в блоке 12 в пределах 25–65° С. Объемный расход воды измеряется расходомером 8 с крыльчаткой и регулируется краном К1 в пределах 5–40 л/час.

### Измеряемые величины:

- $t_1$  - температура воды на входе в оребренную трубу;
- $t_2$  - температура воды на выходе из оребренной трубы;
- $t_3$  - температура воды на входе в гладкую трубу;
- $t_4$  - температура воды на выходе из гладкой трубы;
- $t_5$  - температура на внешней поверхности оребренной трубы на ее середине;
- $t_6$  - температура на торце ребра на середине трубы;
- $t_7$  - температура на внешней поверхности гладкой трубы на ее середине;
- $t_8$  - температура воздуха вблизи трубы;
- $G$  - массовый расход воды.

## 2.2 Подготовка установки к эксплуатации

Перед первым пуском установки следует:

1. Заземлить установку.

2. Заполнить полностью водоподогреватель (термостат) через расширительный бачок 11 дистиллированной водой.

3. Соединить шланг 6 с насосом термостата.

4. Закрыть кран К1 термостата и кран К2 (или вентиль Маевского 14) выпуска воздуха из системы.

5. Долить воду в расширительный бачок термостата 11 (уровень воды в расширительном бачке термостата должен быть достаточным для заполнения водой циркуляционного насоса, всегда в течение опыта).

6. Включить тумблер «Сеть» и тумблер «Насос термостата».

7. Заполнить систему, постоянно доливая воду в расширительный бачок. Заполнение системы водой определяется по началу вытекания воды из трубки 7.

8. Не выключая насоса, соединить трубку 7 с входом термостата и открыть вентиль К1.

9. Если в системе остался воздух, то следует подтянуть хомуты на магистральных соединениях и приоткрыть клапан К2 (или вентиль Маевского 14) для удаления воздуха из насоса и системы.

10. Закрыть клапан К2 (или вентиль Маевского 14) и многократно включая и выключая циркуляционный насос добиться полного удаления воздуха из системы.

11. Пункты 9 и 10 повторить при нагревании воды в термостате.

### **2.3 Проведение опыта**

После ознакомления с описанием экспериментальной установки необходимо заготовить форму протокола для записи наблюдений.

1. Включить электропитание установки переключателем «Сеть»

2. Включить измеритель температуры 2.

3. Закрыть кран К2 (или вентиль Маевского 14) и открыть кран К1.

4. Включить циркуляционный насос переключателем «Насос термостата».

5. Установить краном К1 расход воды не более  $(10-15)10^{-3}$  л/с.

6. Включить электрический водоподогреватель (термостат) переключателем «Нагреватель термостата».

7. При достижении температуры на входе гладкой трубы  $t_1 = 45-50^{\circ}\text{C}$  измерить температуры  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8$  и записать в таблицу.

8. По заданию преподавателя перейти на другой режим температуры на входе гладкой трубы  $t_1 = 50-60^\circ\text{C}$  и измерить температуры  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8$ .

9. Обработать результаты и сравнить экспериментальные значения коэффициентов теплопередачи с теоретическими, полученными по критериальным зависимостям.

### **Требования к содержанию отчета по работе**

Рекомендуется следующая структура отчета по лабораторной работе:

1. Титульный лист.
2. Задание к лабораторной работе.
3. Описание схемы экспериментальной установки и методики расчёта.
4. Анализ результатов и выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Сформулируйте принцип измерения мощности теплопередачи, используемый в данной установке.
2. Каково назначение ребрения на поверхности трубы?
3. Сформулируйте закон Ньютона-Рихмана. Дайте определение коэффициента теплоотдачи и укажите его размерность.
4. Какова роль теплопроводности в процессе свободно-конвективной и вынужденно-конвективной теплопередачи?
5. Какие физические величины необходимо измерить в ходе выполнения работы?
6. Какой тип теплопередачи реализуется между нагретой трубой и воздухом?
7. Какие меры необходимо предпринимать, чтобы теплопередача между трубой и воздухом реализовывалась по выбранному механизму?
8. Какой метод измерения температур используется в данной лабораторной установке?
9. Какие виды теплообмена наблюдаются на данной лабораторной установке?
10. Что понимают под сопряженным теплообменом? Какие исходные положения принимаются для его рассмотрения?
11. Какой тип теплообмена реализуется между водой и стенкой трубы?
12. Сформулируйте принцип подобия для процесса

вынужденноконвективного теплообмена между поверхностью с заданной температурой и жидкостью.

13. Ламинарный или турбулентный режим конвекции реализуется в условиях эксперимента?
14. Вязкостный или вязкостно-гравитационный тип имеет теплопередача между водой и стенкой трубы? Обоснуйте данными измерений.
15. Что называется конвективным теплообменом? Какие различают виды конвекции?
16. Что называют коэффициентом теплоотдачи? От каких величин он зависит?
17. Описать механизм возникновения свободной конвекции.
18. При каких условиях свободная конвекция вносит основной вклад в теплообмен между телом и средой?
19. Каковы причины отклонения измеренного коэффициента теплопередачи от рассчитанного с использованием критериальных соотношений?
20. О чем свидетельствуют данные измерений температуры на краях ребер?

## II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ МЕЛКОПОРИСТЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ПЕРЕГОРОДКИ

**Цель работы:** изучение моделей газопроницаемости материала (пористой металлокерамики). Экспериментальное определение удельной газопроницаемости материала при ламинарном течении газа через пористую цилиндрическую стенку. Определение пористости материала.

### Основные теоретические сведения

**Газопроницаемость**, - свойство твёрдого тела, обуславливающее прохождение газа через тело при наличии перепада давления. В зависимости от структуры твёрдого тела и величины перепада давления различают три основных типа газопроницаемости: диффузионный поток, молекулярную эффузию, ламинарный поток.

**Диффузионный поток** определяет газопроницаемость при отсутствии в твёрдом теле пор (например, газопроницаемость полимерных плёнок или покрытий). В этом случае газопроницаемость складывается из растворения газа в пограничном слое тела, диффузии его через тело и выделения газа с др. стороны тела.

**Молекулярной эффузией** называют газопроницаемость через систему пор, диаметр которых мал по сравнению со средней длиной свободного пробега  $l$  молекул газа (при давлении  $10^{-3}$ — $10^{-4}$  мм рт. ст.,  $1 \text{ мм рт. ст.} = 133,322 \text{ н/м}^2$ )

**Ламинарное течение** газа через твёрдое тело имеет место при наличии в нём пор, диаметр которых значительно превышает длину свободного пробега молекул. При дальнейшем увеличении диаметра пор и переходе к крупнопористым телам (например, ткани) Газопроницаемость определяется законами истечения из отверстий.

Рассмотрим ламинарное течение газа через пористый материал.

Теория ламинарного течения жидкости через пористые среды основывается на опыте Дарси, который установил, что объемный расход  $Q$  жидкости через образец равен

$$q = -\frac{kS}{\eta l}(P_A - P_B) \quad (2.1)$$

где  $k$  - удельная проницаемость;  $S$  - площадь образца;  $d$  - толщина образца;  $\eta$  - вязкость жидкости;  $(P_A - P_B)$  - разность давлений на концах образца.

Этот закон справедлив и для газов, если под  $q$  понимать объемный расход, отнесенный к среднему давлению  $\frac{(P_A+P_B)}{2}$  при условии, что оно достаточно велико. Тогда:

$$q_A P_A = -\frac{kS}{\eta l} (P_A - P_B) \frac{(P_A+P_B)}{2}, \quad (2.2)$$

где  $q_A$  - расход, измеряемый при давлении  $P_A$ .

Экспериментальным путем установлены отклонения от классического закона Дарси как в области больших, так и в области малых расходов газа. Рассмотрим отклонения от закона Дарси в области малых расходов. В этой области Клинкаенберг предложил следующую формулу для значения удельной проницаемости:

$$k = k_\infty \left(1 + \frac{b}{\bar{p}}\right), \quad (2.3)$$

где  $k_\infty$  - удельная проницаемость по отношению к несжимаемой жидкости,  $\bar{p}$  - среднее давление  $\frac{(P_A+P_B)}{2}$ ,  $b$  - константа, являющаяся характеристикой газа и пористой среды.

Зависимость удельной проницаемости от давления объясняется скольжением газа вдоль стенок капилляров. Если средние давления невелики, то течение сопровождается скольжением и закон Дарси можно записать с учетом эффекта Клинкаенберга:

$$q_A P_A = -\frac{k_\infty S}{\eta l} \left(1 + \frac{2b}{P_A+P_B}\right) \left(\frac{P_A^2-P_B^2}{2}\right). \quad (2.4)$$

Отклонения от закона Дарси в области малых расходов газа объясняются молекулярными эффектами. Если отношение длины свободного пробега молекулы газа  $\lambda$  к диаметру капилляра  $a$  (число Кнудсена)  $\frac{\lambda}{a}$  меньше 0,001, то поток вязкостный и описывается формулой Пуазейля

$$Q = \frac{\pi a^4}{128\eta l} \Delta P \bar{P}. \quad (2.5)$$

Если  $\frac{\lambda}{a}$  больше 1 - поток молекулярный, и молекулярный поток газа  $Q$  описывается следующей формулой:

$$Q = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} \frac{a^3}{l} \Delta P, \quad (2.6)$$

где  $M$  - молекулярный вес газа,  $T$  - абсолютная температура,  $R$  - газовая постоянная.

В случае  $0,01 < \frac{\lambda}{a} < 1$ , течение сопровождается скольжением, в этом случае вводим поправку в (2.6), учитывающую скольжение газа вдоль стенок капилляров. Тогда:

$$Q = \frac{\pi a^4}{128\eta l} \Delta P \bar{P} + \frac{3\pi}{16} \cdot \frac{1}{6} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} \frac{a^3}{l} \Delta P, \quad (2.7)$$

где  $\frac{3\pi}{16}$  - коэффициент, учитывающий влияние шероховатости стенок.

При рассмотрении потока газа через пористые материалы нельзя ограничиваться представлением пор в виде полых сфер, но можно предполагать, что они имеют трубчатую цилиндрическую форму. К такому представлению приходится прибегать для упрощения при описании течения газа, хотя в общем случае сечение пор не будет круглым, и стенки в них могут сходиться и расходиться. Для модели пористых тел, представленных в виде набора цилиндрических капилляров, течение со скольжением описывается формулой:

$$Q = \left[ \frac{N\pi r^4 \bar{P}}{8\eta \cdot l} + \frac{3}{4} \frac{\pi N r^3}{l} \sqrt{\frac{\pi RT}{2M}} \left( \frac{2}{f} - 1 \right) \right] \Delta P \quad (2.8)$$

где  $r$  - радиус капилляра;  $Q$  - поток газа через единицу поверхности;  $N$  - число капилляров;  $f$  - коэффициент, близкий к единице.

Выражение (2.8) для потока газа описывает зависимость удельной проницаемости от среднего давления с учетом дополнительного вклада эффекта Клинкенберга.

При вязкостном течении поток подчиняется уравнению Пуазейля для газов и равен:

$$Q = P_Q \cdot S \left( \frac{P_A + P_B}{2} \right) (P_A - P_B), \quad (2.9)$$

$$Q = q \cdot \bar{P}$$

где  $P_Q$  - величина, называемая проницаемостью. Численно она равна потоку, отнесенному к среднему давлению газа, протекающего через единицу площади пористого материала в единицу времени при перепаде давлений в 0,1 МПа. Умножая на толщину образца, получим коэффициент проницаемости, зависящий от типа и размера пор и природы газа. Наконец, умножая проницаемость еще и на вязкость газа, получим удельную проницаемость, зависящую только от типа и размера пор.

Поток газа через капилляр дается законом Гагена-Пуазейля:



$$Q = \frac{\pi \cdot a^4}{128\eta} \cdot \frac{P_A - P_B}{l} \cdot \bar{p} \quad (2.10)$$

Если на единице площади поперечного сечения модели находится  $N$  капилляров, то поток  $Q$  через единицу площади будет определяться как:

$$Q = \frac{N \cdot \pi \cdot a^4}{128\eta} \cdot \frac{P_A - P_B}{l} \cdot \bar{p}$$

Так как расход может быть найден из закона Дарси, то удельная газопроницаемость  $k$  равна:  $k = \frac{N \cdot \pi \cdot a^4}{128}$ . Объем пор модели (при единичной площади поперечного сечения) равен:  $0.25N \cdot \pi \cdot l \cdot a^2$ , тогда пористость  $\varepsilon$  численно равна:  $\varepsilon = \frac{1}{4}N \cdot \pi \cdot a^2$ . Исключив  $N$  из выражения для  $k$ , придем к следующему уравнению:  $k = \frac{\varepsilon \cdot a^2}{32}$ ; т.е. удельная проницаемость определяется квадратом диаметра единичного капилляра и пористостью материала.

При рассмотрении уравнений молекулярного потока газов устанавливают другой вид постоянности проницаемости. Для молекулярной системы уравнение Кнудсена может быть записано в таком виде:

$$Q = P_M (P_A - P_B) S \quad (2.11)$$

где  $P_M$  - молекулярная проницаемость.

В общем случае численное значение проницаемости зависит от различных факторов, основные из которых для слоистых пластиков следующие: химический состав вещества, из которого состоит пористый материал; процентное содержание связующего и метод изготовления; природа диффундирующего газа; разность давлений, поддерживаемая между противоположными поверхностями; толщина образца.

Результаты экспериментального измерения расхода воздуха через образцы из различных материалов при различных давлениях и рассчитанные по формулам (2.9) и (2.11) показывают, что удельная проницаемость многослойных стеклопластиков лежит в широких диапазонах значений от  $10^{-15}$  до  $10^{-22}$  м<sup>2</sup>, и что для всех материалов с повышением давления удельная газопроницаемость уменьшается (рис.2.1).

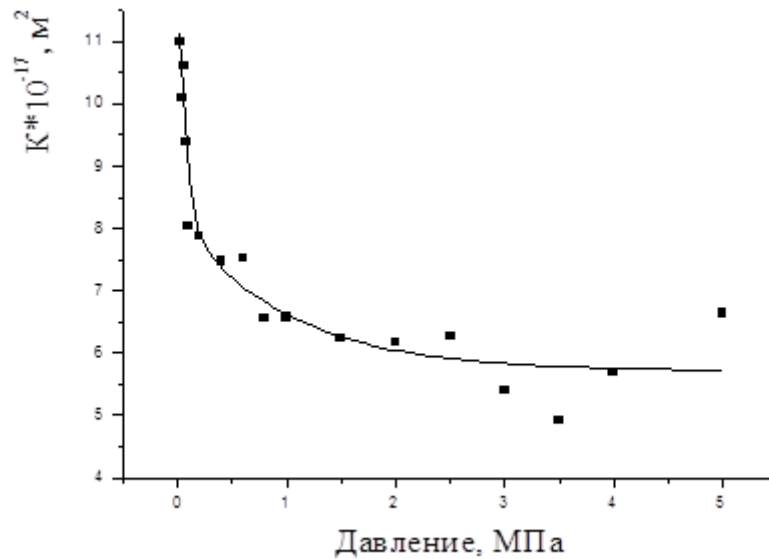


Рисунок 2.1 – Зависимость удельной проницаемости материалов от внешнего давления.

Как указывалось ранее, это объясняется эффектом Клинкенберга, проявляющегося при низких давлениях. Результаты экспериментальных исследований показывают, что удельная газопроницаемость в области малых давлений газа линейно зависит от  $1/\bar{p}$  (например, на рис.2 в качестве примера представлена зависимость для материала с текстолитовой матрицей).

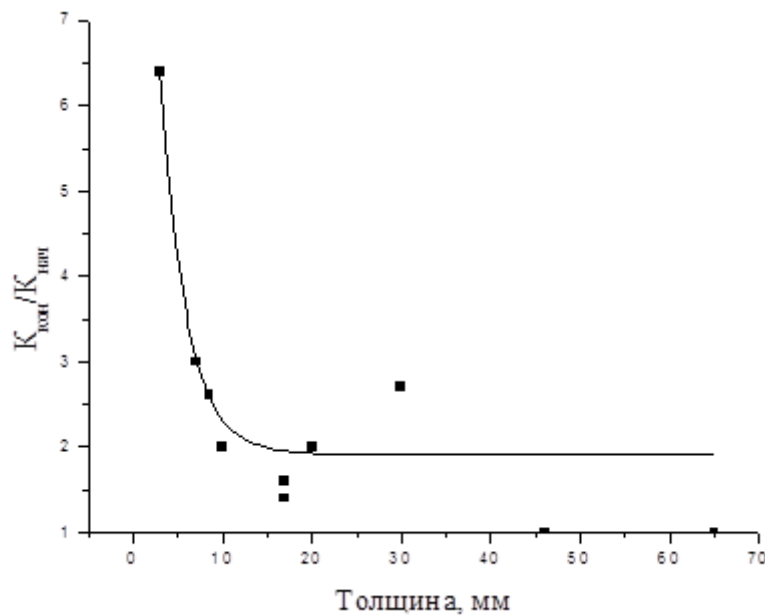


Рисунок 2.2 Зависимость удельной проницаемости от толщины материала.

Для других исследованных в работе материалов с полимерной матрицей получены аналогичные зависимости. Очевидно, что используя их, можно определить значения коэффициента  $k_{\infty}$  и константы  $b$  (из (2.3)) для каждого материала.

Таким образом, экспериментально подтверждается, что удельная газопроницаемость материалов может быть описана уравнением (2.3).

Анализ микроструктуры и пористости материалов показывает, что с уменьшением общей пористости уменьшается и удельная газопроницаемость. Наличие трещин в материалах обуславливает большую проницаемость и, наоборот, плотная однородная структура характеризуется малой проницаемостью.

Адаунми выразил коэффициент удельной проницаемости единичного куба пористого материала в виде:

$$K = A_1 \cdot \bar{p} \cdot E_0 + B_1 \cdot F_0 \quad (2.12)$$

где:  $A_1 = \frac{\pi}{8\eta}$ ,  $B_1 = \frac{3\pi}{4l} \sqrt{\frac{\pi \cdot R \cdot T}{2M}} \left( \frac{2}{f} - i \right)$ ,  $f$  - коэффициент близкий к единице.

$$E_0 = N \cdot r^4; \quad F_0 = N \cdot r^3 \quad (2.13)$$

Тогда тангенс угла наклона кривой  $k = f(\bar{p})$  на рис.2.1 дает величину  $A_1 \cdot E_0$ , равную проницаемости при вязкостном течении, а точка пересечения прямой с осью ординат дает значение проницаемости при молекулярном течении  $B_1 \cdot F_0$ . Так как  $N = \frac{F_0^4}{E_0^3}$  и  $r = \frac{E_0}{F_0}$ , то можно определить  $N$  и  $r$ .

Анализ свойств ряда композиционных теплозащитных материалов показал, что с уменьшением общей пористости уменьшается и сквозная пористость. Так как эффективное поровое пространство исследуемых теплозащитных материалов меньше общей пористости, следует ожидать, что с уменьшением толщины материала, количество сквозных капилляров на единицу площади сечения будет увеличиваться, что приведет к увеличению удельной проницаемости. Для подтверждения этого предположения были выбраны образцы исходной толщины от 46 до 65 мм, которые после определения удельной проницаемости разрезались на образцы различной толщины.

Как видно на рисунке 2, в диапазоне изменений толщины от 10 до 60 мм наблюдается незначительное уменьшение удельной проницаемости (в 2 раза), но она существенно изменяется при малой толщине образца. Так, с уменьшением толщины от 65 до 5 мм удельная газопроницаемость увеличилась в 54 раза.

Таким образом, проведенные эксперименты подтверждают, что количество сквозных капилляров с уменьшением толщины увеличивается. Следует указать, что общая проницаемость образца с уменьшением толщины увеличивается еще значительно, так как она обратно пропорциональна толщине даже при условии независимости удельной проницаемости от толщины. Это обстоятельство говорит о том, что в слоистых материалах большинство закрытых пор в направлении, перпендикулярном к слоям, имеет протяженность порядка 5 мм.

### Получение расчетных формул

Для определения значений требуемой удельной газопроницаемости конкретного материала необходимо знать давление под материалом и характер его распределения по толщине.

Определение давления под материалом сводится к решению уравнения течения газа в нестационарном случае при нестационарных граничных условиях.

Закон Дарси в дифференциальной форме имеет вид  $\vec{V} = -\frac{k}{\eta} gradP$ , где  $\vec{V}$  - объемная скорость газа [1].

Для одномерного случая:

$$\vec{V} = \frac{k}{\eta} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (2.14)$$

$\vec{V}$  относится к среднему давлению  $\frac{P_1 - P_2}{2}$ .

Учитывая условие неразрывности  $div(\rho \vec{V}) = -\varepsilon \frac{\partial P}{\partial t}$  и уравнение состояния идеального газа  $\rho = \frac{P}{RT}$ , получим:

$$\rho \vec{V} = -\frac{k}{\eta} \cdot \rho \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (2.15)$$

$$div(\rho \vec{V}) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{k}{\eta} \left( \rho \frac{\partial P}{\partial x} \right) \right] = -\varepsilon \frac{\partial P}{\partial t},$$

где  $\rho$  - плотность газа;  $\varepsilon$  - пористость материала.

Тогда давление в материале связано с удельной газопроницаемостью как:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \rho \frac{\partial P}{\partial x} \right) \frac{k}{\eta} \right] = \varepsilon \frac{\partial P}{\partial t}. \quad (2.16)$$

Или в области малых давлений газа:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ P \frac{k_{\infty}}{\eta} \left( 1 + \frac{b}{P} \right) \frac{\partial P}{\partial x} \right] = \varepsilon \frac{\partial \rho}{\partial x} . \quad (2.17)$$

Если ввести обозначения

$$p = \frac{p+b}{p_H+b}, \quad \vec{V} = \frac{k_{\infty}(p_H+b)t}{2\varepsilon \cdot \eta \cdot l^2}, \quad \bar{x} = \frac{x}{l},$$

где  $p_H$  - постоянное начальное давление в материале;  $l$  - толщина материала, то уравнение принимает вид

$$\frac{\partial^2 p}{\partial \bar{x}^2} = \frac{\partial p}{\partial V} . \quad (2.18)$$

Для стационарного процесса газопроводности можно записать

$$\frac{\partial^2 p}{\partial \bar{x}^2} = 0 . \quad (2.19)$$

Для цилиндрической задачи, учитывая, что поток газа идёт в радиальном направлении от внутренней поверхности цилиндра к внешней, получим

$$\frac{\partial^2 p}{\partial \bar{r}^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \bar{r}} = 0 . \quad (2.20)$$

Граничными условиями являются: при  $r = r_1, p = p_1$ ; при  $r = r_2, p = p_2$ .

Из уравнения (2.20) следует

$$p(r) = p_1 - (p_1 - p_2) \frac{\ln \frac{r}{r_1}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} . \quad (2.21)$$

Дифференцируя (2.21) получим

$$dp = \frac{p_1 - p_2}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \frac{dr}{r} . \quad (2.22)$$

Объёмный расход газа через цилиндрическую поверхность образца равен

$$q = -\frac{k}{\eta} \frac{dp}{dr} S , \quad (2.23)$$

где  $S = 2\pi r l$  - площадь любой цилиндрической поверхности коаксиальной оси цилиндрического образца;  $k$  - удельная газопроницаемость,  $\text{м}^2$ ;  $\eta$  - динамическая вязкость газа, Па с.

Из (22) и (23) следует, что

$$q = \frac{2\pi l (p_1 - p_2) k}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \frac{1}{\eta} . \quad (2.24)$$

Таким образом, измеряя объёмный расход газа через цилиндрическую

поверхность образца  $q$  и разность давлений внутри и снаружи образца ( $p_1 - p_2$ ) можно определить величину удельной газопроницаемости  $k$  и (используя капиллярную модель пористости материала) величину пористости материала  $\varepsilon$  по формуле

$$\varepsilon = \frac{32k}{a^2}, \quad (2.25)$$

где  $a$  – средний диаметр капилляров пористого материала.

### Порядок выполнения работы

1. Записать данные установки, условия опыта.
2. Убедиться в том, что все приборы выключены. Повернуть регулятор напряжения блока питания против часовой стрелки до упора.
3. Включить стенд тумблером (1). Включить измеритель температуры (5), компрессор (6)
4. По измерителю (6) определить температуру воздуха  $t_1$  внутри пористого цилиндра (10) (красная дисплей измерителя (6)) и температуру стенки  $t_2$  пористого цилиндра (зелёный дисплей измерителя (6)). По шкале ротаметра (3) определить значение объёмного расхода воздуха через пористую стенку цилиндра (10), используя градуировочную кривую ротаметра. По разности высот  $\Delta h$  жидкости в U - манометре (4) определить разность давлений внутри и снаружи образца  $(p_1 - p_2) = \rho g \Delta h$ , где  $\rho$  – плотность жидкости в U - манометре,  $g$  – ускорение свободного падения. Данные записать в таблицу 2.1.
5. Включить вентилятор установки тумблером (2), регулятор температуры (7) тумблером (8). Нажать клавишу регулятора температуры (7) и повернуть ручку регулятора на 45 град. по часовой стрелке. При достижении температуры стенки  $t_2$  пористого цилиндра 60 – 70°C стабилизировать режим нагревания (уменьшить подаваемую регулятором мощность поворотом круглой ручки против часовой стрелки).
6. Повторить действия пункта 4.
7. Установить регулятором температуры величины  $t_2$ : 80°C; 90°C; 100°C.
8. Повторить действия пункта 4.

### Данные установки и таблица результатов измерений

Внутренний диаметр цилиндра	$d_1 = 28\text{мм.}$
Внешний диаметр цилиндра	$d_2 = 57\text{мм.}$
Средний диаметр пор	$a = 6,5\text{мк.}$

Таблица 1.

№ п/п	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$h_1, \text{м}$	$h_2, \text{м}$	$(h_1 - h_2), \text{м}$	$(p_1 - p_2), \text{Па}$	k	$\varepsilon$
1								
2								
3								
4								

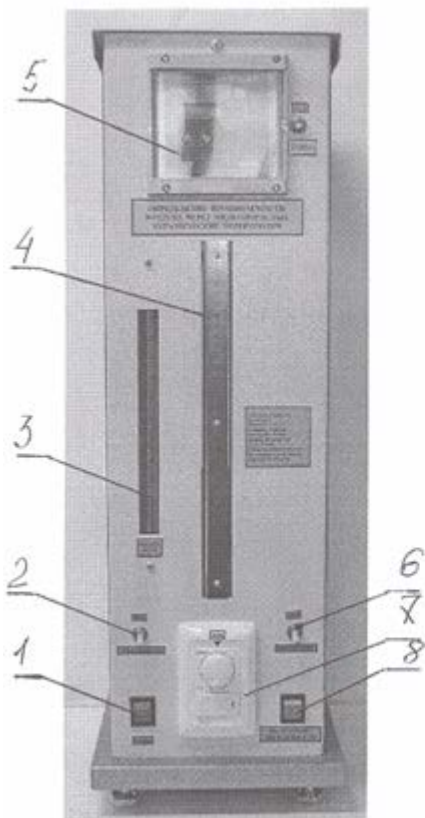


Рисунок 2.3 Вид экспериментальной установки спереди

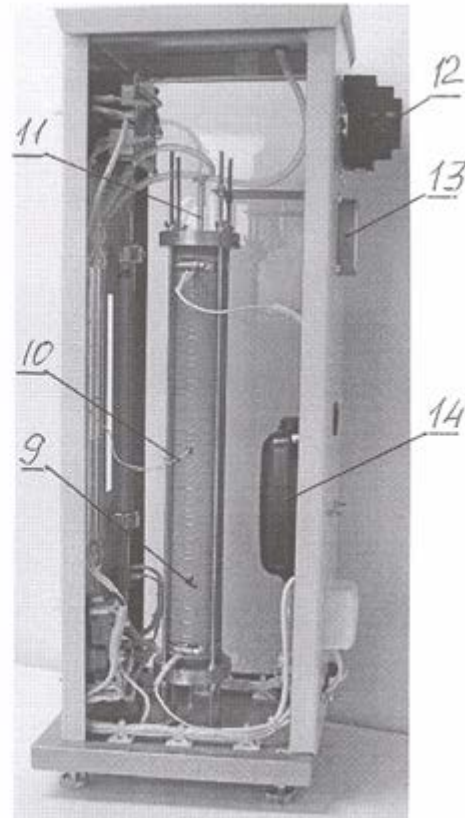


Рисунок 2.4 Вид экспериментальной установки сбоку

1 – тумблер подключения установки к сети; 2 – тумблер включения вентилятора; 3 – ротаметр; 4 – манометр; 5 – измеритель температуры; 6 – компрессор; 7 – регулятор температуры; 8 – тумблер включения регулятора температуры; 9 – нагревательный элемент; 10 – пористый цилиндр; 11 – воздухоподающая трубочка; 12 – преобразователь сигнала; 13 – вентилятор; 14 – компрессор.



Рисунок 2.5 Экспериментальная установка

### **Требования к содержанию отчета по работе**

Рекомендуется следующая структура отчета по лабораторной работе:

1. Титульный лист.
2. Задание к лабораторной работе.
3. Описание схемы экспериментальной установки и методики расчёта.
4. Анализ результатов и выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое проницаемость (дать определение).
2. От чего зависит проницаемость пористой среды?
3. Одинаковы ли проницаемости одной и той же пористой среды для воздуха и жидкости?
4. Как зависит проницаемость от пористости?
5. Закон Дарси. Понятие напора. Коэффициент фильтрации.
6. Типичные условия на границе пористой среды.



### III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ В ЖИДКОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

**Цель работы:** Определение температурной зависимости коэффициента внутреннего трения жидкости (глицерина или вазелинового масла) методом падающего груза (метод Стокса).

#### Основные теоретические сведения

Движущуюся жидкость рассматривают как совокупность непрерывных плотно прилегающих друг к другу слоёв (рисунок 1), каждый из которых движется с постоянной скоростью. Слои могут иметь различную толщину и скользят относительно друг друга, не перемешиваясь между собой.

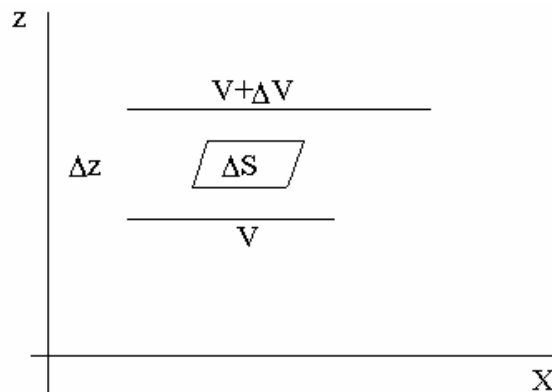


Рисунок 3.1 Модель движения вязкой жидкости

Тогда на площадку  $\Delta S$  между этими слоями будет действовать сила внутреннего трения (вязкости), величина которой равна:

$$F = \eta \frac{\Delta v}{\Delta z} \Delta S \quad (3.1)$$

где  $\eta$  - динамический коэффициент внутреннего трения или просто коэффициент вязкости, значение которого зависит от свойств жидкости и от температуры.

$\frac{\Delta v}{\Delta z}$  - поперечный градиент скорости, он показывает, как  $\Delta z$  изменится скорость потока в направлении оси  $z$ .

Решая уравнение (3.1) относительно  $\eta$ , находим:

$$\eta = \frac{F}{\frac{\Delta v}{\Delta z} \Delta S} \quad (3.2)$$

Следовательно, коэффициент внутреннего трения численно равен силе, действующей на единицу площади при градиенте скорости, равном единице.

Размерность коэффициента внутреннего трения в системе СИ следующая:

$$[\eta] = \left[ \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} \right] = \text{Па} \cdot \text{с} = 10[\text{П}].$$

Единица коэффициента внутреннего трения в системе СИ называется пуазом. Один пуаз равен: 0,1 Па · с.

Коэффициент вязкости является одной из важнейших характеристик смазочных материалов. Существует много способов определения коэффициента вязкости. Одним из наиболее простых и распространенных является способ, основанный на измерении скорости падения шарика в жидкости, который получил название метода Стокса. На шарик, находящийся в жидкости, действуют:

сила тяжести, направленная вертикально вниз, равная:

$$F_1 = \rho_{\text{ш}} g V \quad (3.3)$$

и Архимедова сила, направленная вертикально вверх, равная:

$$F_2 = \rho_{\text{ж}} g V \quad (3.4)$$

где:  $r$  - радиус шарика,  $g$  - ускорение силы тяжести,

$\rho_{\text{ш}}$  - плотность материала шарика,

$\rho_{\text{ж}}$  - плотность исследуемой жидкости,

$V_{\text{ш}}$  - объем шарика.

Шарик под действием разности этих сил придет в ускоренное движение, так как сила тяжести больше выталкивающей силы. При движении шарика на него также будет действовать сила сопротивления, направленная вертикально вверх, вызванная вязкостью жидкости. Для малых скоростей и для малых размеров тел эта сила выражается формулой, выведенной Стоксом:

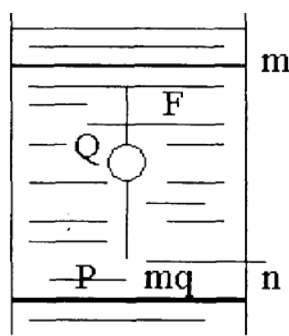


Рисунок 3.2 Распределение сил, действующих на шарик, падающий в вязкой жидкости

$$F_3 = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v. \quad (3.5)$$

Таким образом, величина силы сопротивления зависит от скорости: чем больше скорость движения, тем больше сила сопротивления. При падении

шарика в жидкость его движение будет увеличиваться до тех пор, пока сила сопротивления не станет равной разности сил тяжести и архимедовой силе, и уравнение второго закона Ньютона в проекции на вертикальную ось запишется в виде:

$$F_1 = F_2 + F_3.$$

Откуда можно получить равенство в виде:

$$\rho_{\text{ш}} g V_{\text{ш}} = \rho_{\text{ж}} g V_{\text{ж}} + 6\pi\eta r v. \quad (3.6)$$

Начиная с этого момента, шарик начинает двигаться равномерно с некоторой постоянной скоростью  $v$ . Решая написанное уравнение относительно  $\eta$  и учитывая, что объем шара:

$$V_{\text{ш}} = \frac{1}{6} \pi d^3, \quad (3.7)$$

получим для коэффициента внутреннего трения:

$$\eta = \frac{1}{18} \frac{(\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}}) g d^3}{v}, \quad (3.8)$$

где  $d$  – диаметр шарика.

$$v = \frac{H}{\tau}, \quad (3.9)$$

где  $H$  – расстояние между метками, м;

$\tau$  – время падения шарика, с.

### Описание установки

На Рисунке 3.3 и Рисунке 3.4 представлена передняя панель и схема экспериментальной установки для измерения коэффициента внутреннего трения воздуха.

Цилиндрическая ёмкость 1 с жидкостью обогревается нихромовым нагревателем 5. Металлический шарик 7 вносится в ёмкость 1 через патрубок 2, вмонтированный в пробку 8. Через пробку 8 введена термopара 9, которая может перемещаться по высоте ёмкости 1. В эту же пробку вмонтирована «корзина» 9 для извлечения упавших шариков. Температура исследуемой жидкости измеряется прибором 10 и регулируется вращением ручки 11 регулятора 6. Расстояние между метками 3 и 4 определяется по измерительной линейке 12.

На передней панели находится тумблер включения питания установки 13, тумблер включения нагревателя 14, регулятор.

### Ход работы

## Определение коэффициента внутреннего трения при комнатной температуре

1. Измеряют микрометром диаметр шарика и находят его радиус, выражая в метрах.
2. Измеряют расстояние между метками на стенках цилиндра, выражая его в метрах.
3. Опустить шарик в жидкость как можно ближе к оси цилиндра.
4. Определить время прохождения шариком расстояния между метками с помощью секундомера с точностью до 0,2 сек.
5. Найти скорость падения шарика в этом интервале  $v = H/\tau$ ,  
где  $\tau$  - расстояние между метками
6. Результаты измерений записать в таблицу.
7. Найти значение коэффициента вязкости исследуемой жидкости (формула (3.8)).
8. Аналогичные опыты проводят три раза, наблюдая падения 3-х шариков с различными диаметрами. По трем найденным значениям определить средний результат коэффициент внутреннего трения.
9. Относительная погрешность для одного из опытов определяется по следующей формуле:  

$$E = \frac{\Delta\eta}{\eta_{\text{ср}}} = \frac{\Delta l}{l} + 2\frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta\rho_{\text{ш}} + \Delta\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}}}$$
10. Определить абсолютную погрешность одного измерения:  

$$\Delta\eta = E \cdot \eta_{\text{ср}}$$

Таблица 3.1 - Результаты измерений

N п/п	Диаметр шарика (м)	Радиус шарика (м)	Расстояние между метками (м)	Время падения шарика (сек)	Скорость падения шарика (м/сек)	Кэфф. Вязкости ((Н*сек)/м <sup>2</sup> )
1						
2						
3						

Значение коэффициента внутреннего трения  $\eta$  значительно меняется с изменением температуры. По тому, чтобы иметь возможность сравнивать найденное значение со справочными, необходимо измерить и записать температуру жидкости.

## Определение коэффициента внутреннего трения в жидкости при различных температурах

1. Смотреть рисунки 3.3 и 3.4.
2. Включить электропитание установки тумблером 13.
3. Включить тумблером 15 измеритель температуры 10, тумблером 14 электропитание регулятора температуры 6.
4. Повернуть с щелчком ручку 11 на 3-5°C регулятора температуры по часовой стрелке и установить требуемую температуру жидкости в сосуде, регулируя подводимую мощность ручкой 11. (Рекомендуемый диапазон температур 25 - 45°C).
5. Зафиксировать метки 3 и 4 на шкале 12 и определить расстояние  $H$  между метками.
6. Измерить диаметры шариков с помощью микрометра.
7. Аккуратно опустить в емкость через патрубок 2.
8. Измерить секундомером время  $\tau$  падения шарика от метки 3 до метки 4.
9. Выполнить работу для 5 шариков.
10. Данные занести в таблицу:

Таблица 2 - Данные измерений

$t^{\circ}C$	$\tau, c$	$v, м/с$	$\eta, кг/м \cdot c$
25			
30			
35			
40			
45			

11. Построить график зависимости  $\eta = f(t^{\circ} C)$ .
12. Определить погрешности измерений.
13. Дополнительные данные для выполнения лабораторной работы:  
 $\rho_1 = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3, \rho_2 = 1,26 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3, d.$

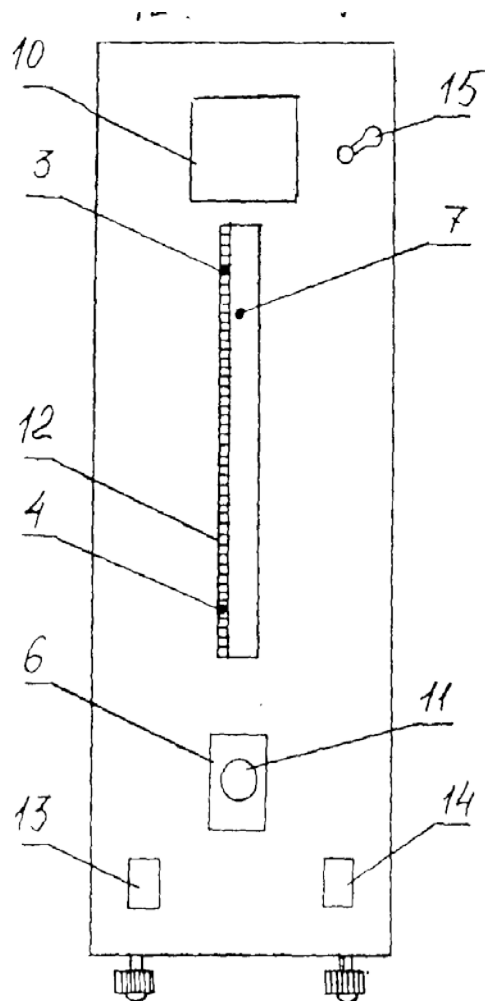


Рисунок 3.3 Вид экспериментальной установки спереди

3, 4 – контрольно-измерительные точки, 6 – регулятор температуры, 7 – металлический шарик, 10 – прибор для измерения температуры, 11 – ручка для регулирования регулятора, 12 – измерительная линейка, 13 – тумблер включения питания установки, 14 – тумблер включения нагревателя, 15 – тумблер включения измерителя температуры

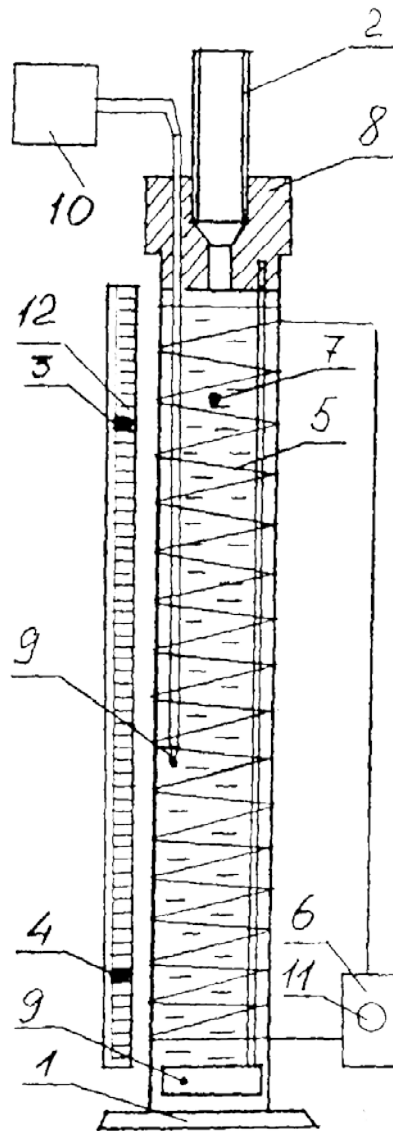


Рисунок 3.4 Схема экспериментальной установки

1 – цилиндрическая емкость, 2 – патрубок, 3, 4 – контрольно-измерительные точки, 5 – нихромовый нагреватель, 6 – регулятор температуры, 7 – металлический шарик, 8 – пробка, 9 – термопара, 10 – прибор для измерения температуры, 11 – ручка для регулирования регулятора, 12 – измерительная линейка

### **Требования к содержанию отчета по работе**

Рекомендуется следующая структура отчета по лабораторной работе:

1. Титульный лист.
2. Задание к лабораторной работе.
3. Описание схемы экспериментальной установки и методики расчёта.
4. Анализ результатов и выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Что называется коэффициентом вязкости (коэффициентом внутреннего трения)?
2. Как зависит точность измерения от высоты столба жидкости?
3. Как зависит скорость падения шарика от плотности материала из которого изготовлен шарик?
4. Какие силы действуют на шарик, движущегося в жидкости?
5. При каких условиях шарик начинает равномерно двигаться в жидкости?



#### IV. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ВОЗДУХА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

**Цель работы:** определение величины коэффициента внутреннего трения воздуха и его температурной зависимости методом, основанным на истечении воздуха через капилляр (метод Пуазейля).

##### Основные теоретические сведения

##### Методика измерения коэффициента внутреннего трения

При ламинарном (слоистом) течении воздуха через капилляр коэффициент внутреннего трения воздуха можно рассчитать по формуле Пуазейля

$$\eta = \frac{\pi r_0^4 (p_1 - p_2) \tau}{8LV}, \quad (4.1)$$

Где

$p_1 - p_2 = \rho_B g (h_1 - h_2)$  – разность давлений воздуха на входе и выходе из капилляра;

$(h_1 - h_2)$  – разность уровней воды в манометре;

$r_0$  – радиус капилляра;

$L$  – длина капилляра;

$V$  – объём воздуха, протекающего через капилляр за время  $\tau$  при данной температуре;

$\rho_B$  – плотность воды при температуре и давлении в лаборатории.

**В работе измеряется:**

$(h_1 - h_2)$  – разность уровней воды в манометре;

$V/\tau = G$  – объёмный расход воздуха при его течении через капилляр;

$t^\circ$  – средняя температура воздуха в капилляре.

##### Молекулярно-кинетическая теория для коэффициента внутреннего трения

Методами молекулярно-кинетической теории идеального газа получено выражение для коэффициента внутреннего трения

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle l, \quad (4.2)$$

где  $\langle v \rangle$  – средняя скорость теплового движения молекул идеального газа

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\mu\pi}}; \quad (4.3)$$

$\langle l \rangle$  – средняя длина свободного пробега молекул

$$\langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_{\text{эфф}}n}, \quad (4.4)$$

$\rho = m_0 n$  - плотность газа;  $\mu$  - молярная масса газа;  $\sigma_{\text{эфф}}$  – эффективное сечение соударения молекул;  $n$  – число молекул газа в единице объёма (концентрация).

Из соотношений (4.2) - (4.3) следует

$$\eta = 0.39 \frac{m_0}{\sigma_{\text{эфф}}} \sqrt{\frac{RT}{\mu}}. \quad (4.5)$$

Если в данном диапазоне температур и давлений воздух можно приближённо считать идеальным газом, то эффективное сечение соударения молекул остаётся постоянной величиной и, следовательно, можно записать

$$\eta = \text{const} \sqrt{T}. \quad (4.6)$$

### Описание экспериментальной установки

На Рисунке 4.1 и Рисунке 4.2 представлена передняя панель и схема экспериментальной установки для измерения коэффициента внутреннего трения воздуха.

Микрокомпрессор 1 прокачивает воздух через ротаметр 2 и затем направляется в медный термостат (цилиндрическая трубка) 3, внутри которой находится капилляр 4. Внутри медного термостата находится спай термопары 5, измеряющей температуру воздуха протекающего через капилляр 4 в атмосферу. Термоэлектроды 7 соединены с измерителем температуры 8. Перепад давления на капилляре измеряется  $U$  – манометром 6. Медный термостат 3 находится в керамическом цилиндре, на внешней поверхности которого находится электрический нагреватель 9, соединённый с регулятором мощности 10.

На передней панели находится тумблер включения питания установки 11, тумблер 12 включения нагревателя 9, регулятор температуры воздуха 10, протекающего через капилляр 4, измеритель температуры нагретого воздуха 13, измеритель объёмного расхода воздуха 2, протекающего через капилляр 4 (ротаметр),  $U$  – манометр 6. для измерения перепада давления воздуха на капилляре, тумблер 14 включения компрессора 1, тумблер 15 включения вентилятора.

### Порядок выполнения работы

1. Включить электропитание установки тумблером 1.

2. Включить компрессор 1 тумблером 14, измеритель температуры 8 тумблером 13.
3. Включить питание регулятора температуры 10 тумблером 12 и нажатием клавиши 16.
4. Повернуть со щелчком ручку 17 регулятора температуры по часовой стрелке и установить его мету в среднее положение.
5. По показаниям измерителя температуры 8 наблюдать её увеличение до 200-220 °С.
6. При достижении указанного интервала температур отрегулировать положение ручки 17, при котором температура воздуха протекающего через капилляр останется постоянной.
7. Записать показания ротаметра 2, U – манометра 6 (разность положений менисков на шкале) и показания измерителя температуры 8.

### Данные установки

Длина капилляра  $L = 50$  мм.

Диаметр капилляра  $d = 1.3$  мм.

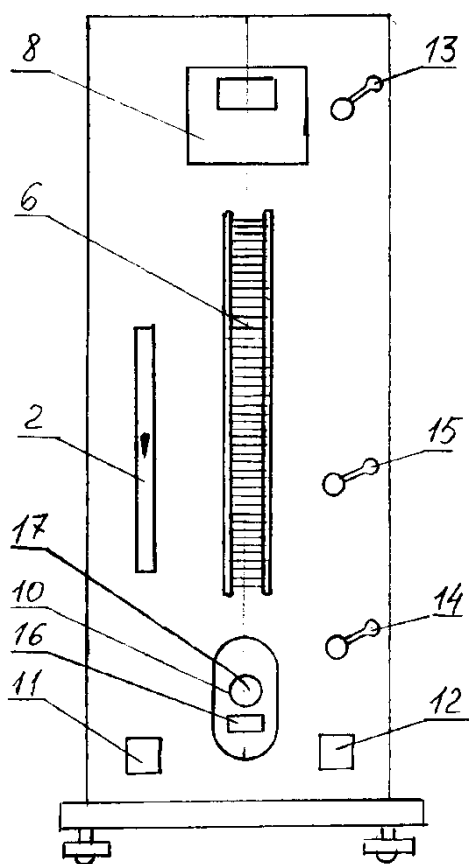


Рисунок 4.1 Вид экспериментальной установки спереди

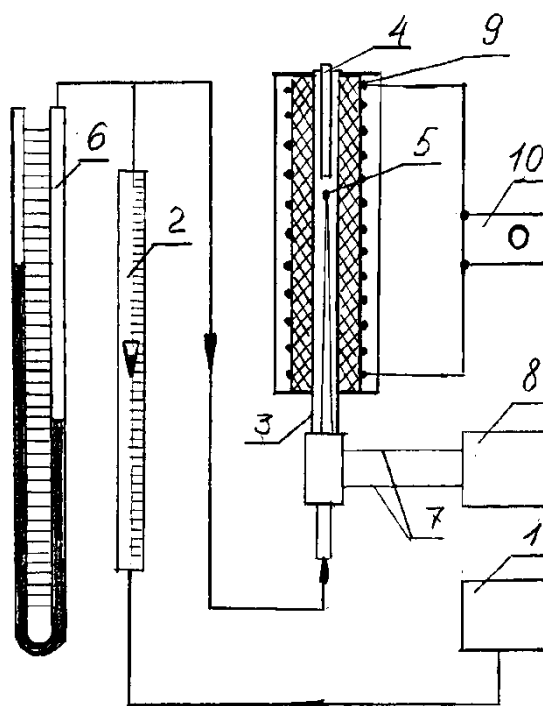


Рисунок 4.2 Схема экспериментальной установки



Рисунок 4.3 Экспериментальная установка сбоку



Рисунок 4.4 Экспериментальная установка спереди

### **Требования к содержанию отчета по работе**

Рекомендуется следующая структура отчета по лабораторной работе:

1. Титульный лист.
2. Задание к лабораторной работе.
3. Описание схемы экспериментальной установки и методики расчёта.
4. Анализ результатов и выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Напишите формулу Ньютона для силы вязкого трения и поясните значение всех входящих в нее величин. Дайте определение коэффициента вязкости, выведите его размерность.
2. Что называется коэффициентом вязкости, каков его физический смысл?
3. При каких условиях выполняется закон Пуазейля?
4. Что называют средней длиной свободного пробега. Как зависит средняя длина свободного пробега молекул от температуры газа, давления?

5. Как зависит коэффициент внутреннего трения в газах от температуры.
6. Что называют эффективным сечением молекулы? Как определить диаметр молекулы?
7. Каков механизм внутреннего трения в жидкостях, чем он отличается от газов?
8. Что показывает ротаметр? Почему при понижении температуры показания ротаметра увеличиваются?
9. Поясните метод измерения температуры

## V. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ

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

### Основные теоретические сведения

Теплообмен излучением (лучистый, радиационный теплообмен), осуществляется в результате процессов превращения внутренней энергии вещества в энергию излучения, переноса энергии излучения и её поглощения веществом. Интенсивность этого обмена определяется взаимным расположением в пространстве тел, обменивающихся теплом, а так же свойствами поверхностей тел и среды, разделяющей эти тела. При этом любое тело, температура которого отлична от абсолютного нуля, испускает энергию, обусловленную нагревом тела. Это излучение называется собственным излучением тела.

Теплообмен излучением осуществляется посредством электромагнитных волн. В камерах нагревательных печей на его долю приходится 90-95% суммарного теплообмена. Электромагнитные волны распространяются прямолинейно со скоростью света и подчиняются оптическим законам преломления, поглощения, отражения. Источником этих волн являются материальные частицы, входящие в состав вещества. Для распространения электромагнитных волн не требуется материальной среды. В вакууме они распространяются со скоростью света и характеризуются длиной волны  $\lambda$  или частотой колебаний  $\nu$ . При температуре до 1500 °С основная часть энергии соответствует инфракрасному и частично световому излучению ( $\lambda = 0,7 - 50$  мкм).

В общем спектре инфракрасного излучения выделяют (ИК) область излучения ближней ИК-области ( $\lambda = 0,76 - 1,5$  мкм); средней (1,5 - 10 мкм) и дальней (10 - 1000 мкм). При температурах до 1800 °С основная доля мощности излучения приходится на инфракрасную область спектра, не видимую глазом человека.

Следует отметить, что энергия излучения испускается не непрерывно, а в виде определенных порций — квантов. Носителями этих порций энергии являются элементарные частицы излучения — фотоны, обладающие энергией, количеством движений и электромагнитной массой. При попадании на другие

тела энергия излучения частично поглощается ими, частично отражается и частично проходит сквозь тело. Процесс превращения энергии излучения во внутреннюю энергию поглощающего тела называется поглощением. Большинство твердых и жидких тел имеют сплошной спектр излучения. Газы испускают энергию только в определенных интервалах длин волн (селективный спектр излучения). Твердые тела излучают и поглощают энергию поверхностью, а газы — объемом.

Излучаемая в единицу времени энергия в узком интервале изменения длин волн  $\Delta\lambda$  называется потоком монохроматического излучения  $Q_\lambda$ . Поток излучения, соответствующий всему спектру, называется интегральным, или полным, лучистым потоком  $Q$  (Вт). Интегральный лучистый поток, излучаемый с единицы поверхности тела по всем направлениям полусферического пространства, называется плотностью интегрального излучения (Вт/м<sup>2</sup>).

Каждое тело не только излучает, но и поглощает лучистую энергию. Из всего количества падающей на тело лучистой энергии ( $Q_{\text{пад}}$ ) часть ее ( $Q_{\text{пог}}$ ) поглощается, часть ( $Q_{\text{от}}$ ) отражается и часть ( $Q_{\text{пр}}$ ) проходит сквозь тело. При этом  $A + R + D = 1$ , где  $A$  — коэффициент поглощения;  $R$  — коэффициент отражения,  $D$  — коэффициент пропускания.

Если тело поглощает все падающие на него лучи, то есть  $A = 1$ ,  $R = 0$ ,  $D = 0$ , оно называется абсолютно черным.

Если вся падающая на тело энергия отражается, то  $R = 1$ ,  $A = 0$ ,  $D = 0$ . Если при этом отражение подчиняется законам геометрической оптики, тело называется зеркальным; при диффузном отражении, когда отраженная лучистая энергия рассеивается по всем направлениям, — абсолютно белым.

Если  $D = 1$ , то  $A = 0$  и  $R = 0$ . Такое тело пропускает все падающие на него лучи и называется абсолютно прозрачным.

В природе абсолютно черных, белых и прозрачных тел не существует. При расчетах лучистого теплообмена между телами большое значение имеет результирующее излучение, представляющее собой разность между лучистым потоком, получаемым телом, и лучистым потоком, который оно испускает в окружающее пространство. Часто теплотехнические расчеты ведут на основе допущения излучения серых тел, имеющих непрерывный спектр излучения. Такое допущение упрощает решение многих теплотехнических задач, которые без него были бы неразрешимы. Собственное излучение большей части поверхностей, участвующих в теплообмене, действительно близко к серому, за

исключением газов, излучение которых сугубо селективное. Для определенной длины волны отражательная, пропускательная, поглощательная способности тел характеризуют спектральные коэффициенты поглощения  $A_\lambda$ , отражения  $R_\lambda$ , пропускания  $D_\lambda$ .

Большинство белых поверхностей в видимом диапазоне волн обладают большим коэффициентом отражения  $R_\lambda = 0,7 - 0,9$ , а в ИК-диапазоне волн ведут себя как черные тела в связи с большим коэффициентом поглощения электромагнитных волн именно в этом диапазоне.

### **Схема экспериментальной установки и методика измерений**

Схема экспериментальной установки приведена на Рисунке 5.1. На передней панели находятся:

- двухканальный измеритель температуры (2) типа 2ТРМО, подключённый к хромель--копелевой термопаре;
- универсальный вольтметр (1) типа МУ-67 с автоматическим переключением пределов измерений;
- тумблёр электропитания установки (3);
- разъёмы (V) для подключения вольтметра (1);
- тумблёр (5) для переключения вольтметра на измерение падения напряжения на образцовом сопротивлении ( $U_0$ ) и напряжения на вольфрамовой проволоке ( $U_n$ ). На Рис.2 приведена принципиальная схема рабочего участка, электрическая схема питания и измерений. Нагреваемая вольфрамовая проволока-нить (7) находится в цилиндрическом стеклянном баллоне (8) с двойными стенками, между которыми находится вода. Воздух из внутренней трубки откачен до давления  $10^{-5}$  мм. рт. ст. Температура стенки этой трубки  $T_2$  считается равной температуре воды циркулирующей между двойными стенками и постоянной в течение опыта. Она определяется хромель-копелевой термопарой (9), соединённой с измерителем температуры (2). Баллон с нитью укреплен в модуле (6), который находится на лабораторном стенде. Электропитание к вольфрамовой проволоке подводится внутри установки от источника питания (4). Последовательно с вольфрамовой проволокой включено образцовое сопротивление ( $R_0$ ) для определения величины электрического тока в цепи по измеренному значению падения напряжения на  $R_0$ . Для измерения



напряжения на вольфрамовой проволоке  $U_R$  и напряжения на образцовом сопротивлении  $U_0$  к разъёмам  $V$  подключается мультиметр (1).

### Расчетные формулы

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

$$E = \varepsilon_1 C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (5.1)$$

где  $\varepsilon_1$  – интегральный коэффициент теплового излучения вольфрамовой нити;  $C_0$  – излучательная способность абсолютно чёрного тела (принимается равной 1, поскольку отражение лучистого потока от внутренней стенки трубки к вольфрамовой проволоке мало). 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.

$$E = Q / (\pi dl), \quad (5.2)$$

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

Температура вольфрамовой проволоки определяется по формуле:

$$t_1 = t_H = \frac{R_H - R_{OH}}{\alpha R_{OH}}, \quad (5.3)$$

$$T_1 = (273.15 + t_1) \text{ K},$$

где:

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

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

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления вольфрама.

При отсутствии данных для  $R_{OH}$  (сопротивление нити при  $t_H = 0^\circ\text{C}$ ) используются данные для  $R_{HK}$  при комнатной температуре  $t_K$  (измеряется  $R_{HK}$  мультиметром при отключённом нагревателе). При этом формула (5.3) для расчёта температуры вольфрамовой проволоки приобретает вид

$$t_1 = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{R_t}{R_{HK}} - 1 \right) + \frac{R_t}{R_{HK}} t_K, \quad (5.4)$$

### Порядок выполнения работы

Перед выполнением работы измерить мультиметром (в режиме измерения сопротивления) электрическое сопротивление вольфрамовой проволоки  $R_{HK}$  при комнатной температуре  $t_K$ .

1. Записать данные установки, условия опыта.
2. 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) и измеритель температуры (2).
3. Определить (задаёт преподаватель) значения напряжений, при которых проводятся измерения. Рекомендуемые значения напряжений, устанавливаемые на блоке питания: 6, 8, 10, 12, 16 вольт.
4. Переключить тумблер (5) в положение  $U_H$ . Установить первое значение напряжения на нити, следя за показаниями вольтметра. Произвести отсчет напряжения на нити  $U_{H1}$ .
5. Переключить тумблер (5) в положение  $U_0$ . Произвести отсчет напряжения на образцовом сопротивлении  $U_{01}$ .
6. Определить температуру стенки трубки  $t_2$  по показаниям измерителя температур (2).
7. Пункты 4 и 5 повторить для следующих значений напряжений, устанавливаемых на нити.
8. Убрать напряжение на нити. Выключить приборы и стенд.

### 6. Таблица результатов измерений.

Диаметр вольфрамовой проволоки  $d_1 = 0,15$  мм.

Внутренний диаметр трубки  $d_2 = 8$  мм.

Образцовое сопротивление  $R_0 = 0,1$  Ом.

Сопротивление нити  $R_{HK}$  при  $t_K$  °C \_\_\_\_\_ (измерить перед опытом).

Сопротивление нити при  $t_K = 21$  °C  $1.7$  Ом

Температурный коэффициент сопротивления вольфрама  $\alpha = (3,9 - 4,5)10^{-3} * 1/K$ .

Длина нити  $l = 360$  мм.

Таблица 1 - Измеренные величины

№ п/п	$T_1, C$	$T_1, K$	$T_2, C$	$T_2, K$	$U_R, B$	$U_0, мВ$	$I, A$	$Q, Вт$
1								
2								
3								
4								
5								

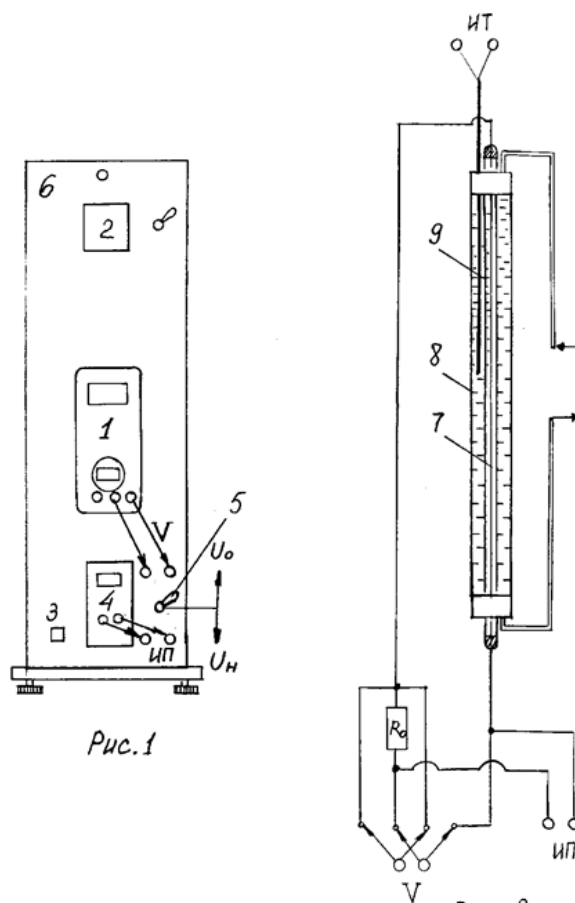


Рисунок 5.1 Схема экспериментальной установки

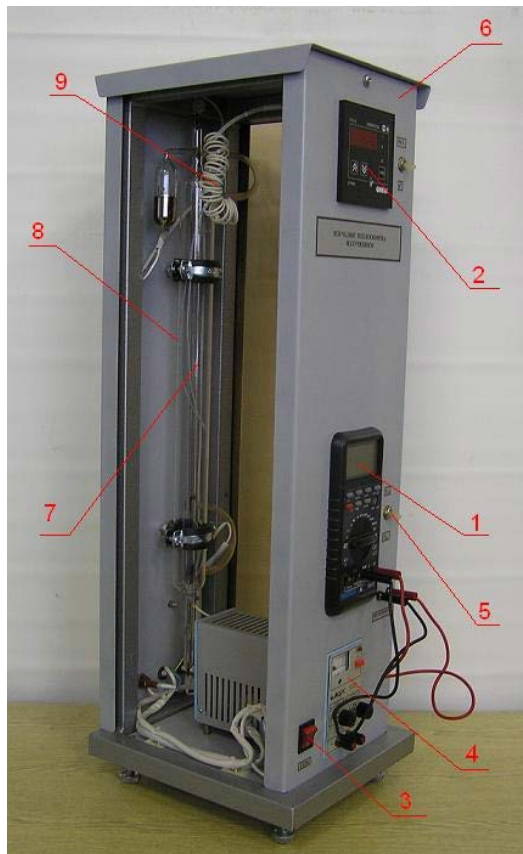


Рисунок 5.2 Экспериментальная установка

### Контрольные вопросы

1. Как соотносятся между собой скорости распространения тепла при передаче его теплопроводностью, свободной или вынужденной конвекцией и тепловым излучением?
2. Что представляют собой модели абсолютно черного, абсолютно белого и серого тел, используемые в расчете лучистого теплообмена?
3. Какие из тел могут считаться абсолютно прозрачными, диатермическими средами?
4. Какие способы защиты от теплового излучения может предложить современная техника?
5. Что представляет собой экранно – вакуумная изоляция и чем объясняется ее эффективность?
6. Какие сложности в расчетах теплообмена влечет нелинейная зависимость интенсивности излучения от температуры нагретой поверхности?
7. Может ли в этом случае в полной мере использоваться модели геометрически подобных разномасштабных тел для экспериментального определения характеристик теплообмена?

## VI. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ НА ОБОГРЕВАЕМОМ ЦИЛИНДРЕ

**Цель работы:** определение коэффициента теплоотдачи трубы при свободной конвекции воздуха и различных температурах поверхности трубы. Используются два метода расчета коэффициента: прямой - по экспериментальным данным о тепловом потоке и температурном напоре; косвенный – основанный на решении уравнения теплопроводности с помощью теории подобия.

### Основные теоретические сведения

Причиной возникновения свободной конвекции является неустойчивое распределение плотностей жидкости (газа), обусловленное неравномерностью нагрева. При этом температурный напор определяет разность плотностей и величину подъемной силы, а площадь поверхности – зону распространения процесса.

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

$$10^4 < GrPr < 10^7: Nu = 0.5(GrPr)^{0.25}, \text{ где} \quad (6.1)$$

критерий Нуссельта:  $Nu = ad/\lambda$ ;  
критерий Грасгофа:  $Gr = \beta g d^3 \Delta T / \nu^2$ ;  
критерий Прандтля:  $Pr = \mu c / \lambda$ , в которых

$\alpha$  - коэффициент теплоотдачи (характеризует условия теплообмена между жидкостью и поверхностью твердого тела [Вт /м<sup>2</sup> К]);

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности [Вт /м·К];

$d$  - характерный размер (диаметр трубы [м]);

$\beta$  - коэффициент объемного расширения жидкости (газа) [м];

$g$  - ускорение свободного падения [9.8 м/с<sup>2</sup>];

$\nu = \mu / \rho$  - кинематическая вязкость жидкости [м<sup>2</sup>/с];

$\mu$  - динамическая вязкость [Па·с];

$\rho$  - плотность [кг/м<sup>3</sup>];

$c$  - удельная массовая теплоемкость [Дж/кг·с].

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

1. Число  $Pr, \lambda, \nu$  в диапазоне температур от 20 до 100<sup>0</sup> С изменяются существенно поэтому для точности расчета следует пользоваться написанными ниже эмпирическими соотношениями или таблицами физических свойств воздуха.

$$Pr = -0.0002t + 0.7068$$

$$\lambda = 8 t 10^{-5} + 0.0244 \text{ [Вт/м} \cdot \text{К]}$$

$$\nu = (0.1015 t + 12.94)10^{-6} \text{ [м}^2\text{/с]}$$

2. Все физические константы, входящие в состав критериев, берутся при средней температуре жидкости ( $t$  – в градусах Цельсия).

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:

$$Nu = 0.5(GrPr)^{0.25}, \quad Gr = (gd^3\Delta T)/(v^2T)$$

где  $\Delta T$  - разница температур между окружающей средой и поверхностью трубы,  $T$  - средняя температура воздуха.

$$\alpha = Nu\lambda/d.$$

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

$$q = \alpha\Delta T \tag{6.2}$$

отсюда:

$$\alpha = q/\Delta T$$

где  $q$  - плотность теплового потока через наружную стенку трубы [Вт/м<sup>2</sup>].

Если считать, что теплоотдача осуществляется преимущественно путем конвекции (т.е. не учитывать излучение), то плотность теплового потока определяется по формуле:

$$q = Q/F = (U_H I_H)/(d l \pi), \tag{6.3}$$

где  $I_H = U_0/R_0$ ,

$R_0$  – образцовое сопротивление [Ом];

$U_0$  - перепад напряжения на образцовом сопротивлении [В];

$U_H$  - перепад напряжения на нагревателе [В];

$Q$  – теплота выделяемая нагревателем (Вт);

$F$  – площадь образующей цилиндрической поверхности трубы [ $\text{м}^2$ ];

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

$$t_{\text{ст}} = 1/5 (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5). \quad (6.4)$$

### **Схема экспериментальной установки и методика измерений.**

Лабораторная установка (Рисунок 6.1 и Рисунок 6.2) состоит из отрезка медной тонкостенной трубы 1, внешний диаметр которой равен 28мм. На поверхности трубы по её длине расположены 5 термопар  $t_1 \dots t_5$  с интервалом 100мм. Третья термопара  $t_3$  находится в центре трубы, термопары  $t_1$  и  $t_5$  находятся на расстоянии 10мм от концов трубы. Указанные термопары монтируются изнутри трубы. Труба устанавливается так, что спаи термопар находятся в верхних точках цилиндрической поверхности трубы. Еще одна термопара  $t_6$  находится снизу на середине трубы. На концах трубы находятся заглушки 2 из теплоизолирующего материала. Термопара  $t_0$  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  $U_{\text{н}}$  и падения 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  $U_{\text{н}}$  и падения напряжения на образцовом сопротивлении  $U_0$ . Все термопары подключены к измерителю 7 температуры 2ТРМ0, через переключатель 8. Включение установки производится тумблером 9, включение нагревателя – тумблером 10. Установка необходимого напряжения на нагревателе и его регулирование производится ручкой 4 ЛАТРа.

### **Порядок проведения эксперимента и расчеты**

**Внимание! Температура поверхности медного цилиндра не должна превышать 90С.**

1. Заземлить лабораторную установку (см. разъём на задней панели).
2. Подключить установку к сети 220В 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 80 - 100 В (использовать мультиметр).
5. При достижении температуры поверхности цилиндра 60-70<sup>0</sup>С уменьшить напряжение на нагревателе до 15 - 25В и выйти на стационарный режим, подождав некоторое время (показания температуры на термопаре 3 - середина трубы, верх – не должны изменяться значительно).
6. Провести измерения температур  $t_1 \dots t_6$ .
7. Измерить напряжение на образцовом сопротивлении, переключив тумблер 6 в соответствующее положение.
8. Повторить пункты 5 - 7, установив заданное преподавателем следующее значение напряжения на нагревателе. Полученные данные занести в таблицу результатов измерений.

**Данные установки и таблица наблюдений**

Внешний диаметр трубы , мм	28
Длина трубы, мм	420
Величина образцового сопротивления, Ом	0,1 (или 1)

Таблица1 - Измеренные величины

№№ п/п	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$U_H,$ В	$U_0,$ мВ	Р, Вт
1.										
2.										
.....										



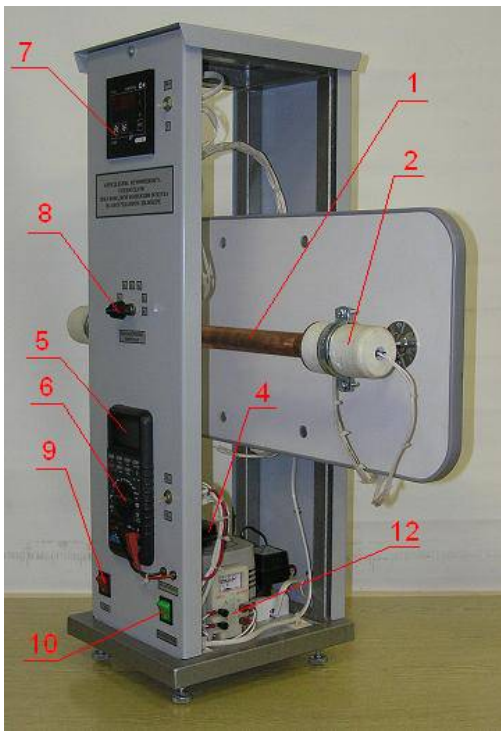


Рисунок 6.1  
Экспериментальная установка  
сбоку

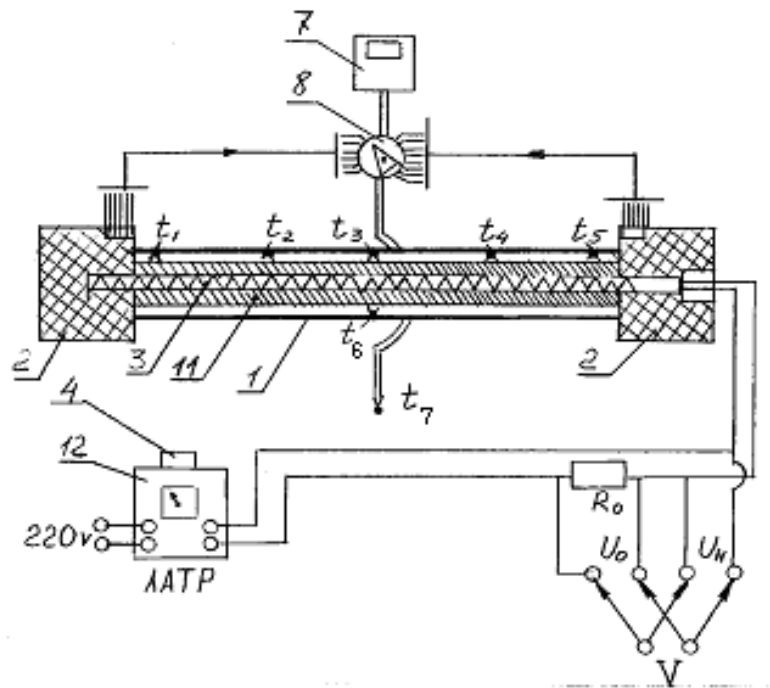


Рисунок 6.2 Схема экспериментальной  
установки

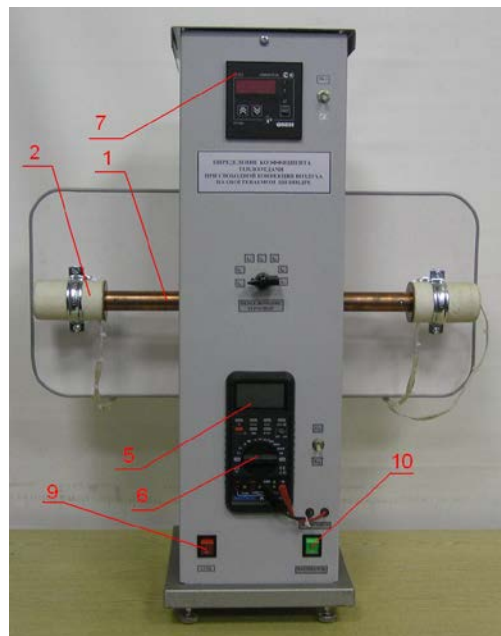


Рисунок 6.3 Экспериментальная установка спереди

### **Требования к содержанию отчета по работе**

Рекомендуется следующая структура отчета по лабораторной работе:

1. титульный лист;
2. задание к лабораторной работе;
3. описание схемы экспериментальной установки и методики расчёта;
4. анализ результатов и выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Какой вид теплообмена называется конвективным? Чем различаются теплообмен при вынужденной и свободной конвекции?
2. Уравнение Ньютона-Рихмана. Коэффициент теплоотдачи, его физический смысл. Факторы, влияющие на него.
3. Как изменяется локальный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_\varphi$  по окружности горизонтальной трубы?
4. Какой вид имеет уравнение подобия при естественной конвекции около горизонтальной трубы? Что характеризуют числа подобия, входящие в это уравнение?
5. Почему изменение наружного диаметра горизонтальной трубы приводит к изменению среднего коэффициента теплоотдачи при естественной конвекции?

## VII. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА МЕТОДОМ НАГРЕТОЙ НИТИ

**Цель работы:** экспериментальное определение коэффициента теплопроводности воздуха, находящегося вокруг нагретой электрическим током нити. В работе определяется электрическая мощность, выделяемая в нити и температура нити.

### Основные теоретические сведения

Передача тепла осуществляется тремя различными процессами: теплопроводностью, конвекцией или излучением. Предполагая, что последние два не дают вклада в процесс передачи тепла, рассмотрим свойства плотности потока тепла в одномерной среде с градиентом температуры.

**Плотностью потока тепла называется** вектор  $j$ , совпадающий по направлению с направлением распространения тепла и численно равный количеству тепла, проходящему в единицу времени через единичную площадь перпендикулярную к направлению потока. В рассматриваемой среде вектор  $j'$  может быть функцией, как координат, так и времени:  $j' = j(x, t)$ . Можно показать, что:

$$\frac{j'}{x} = -rc_V \frac{T}{t}, \quad (7.1)$$

где  $r$  – плотность вещества,  $c_V$  – удельная теплоемкость,  $T$  – температура среды.

Опытным путем установлено, что если на разных сторонах плоскопараллельной пластины толщиной  $l$  поддерживать температуры  $T_1$  и  $T_2$ , то тепловой поток распространяется в направлении от большей температуры к меньшей и равен:

$$j = C \frac{T_1 - T_2}{l},$$

где  $C$  – коэффициент теплопроводности, зависящий только от свойств среды и ее физического состояния. Переходя к пределу  $l = dx$ , получим **закон Фурье** для плотности теплового потока:

$$j = -C \frac{T}{x}. \quad (7.2)$$

Подставляя (7.2) в (7.1) получим уравнение теплопроводности:

$$rc_V \frac{T}{t} = \frac{CT}{x^2}. \quad (7.3)$$

Нагреваемая вольфрамовая нить находится в цилиндрическом стеклянном баллоне с двойными стенками, между которыми находится вода.

Температура воды и, следовательно, внутренней стенки баллона считается постоянной в течение опыта.

При нагревании нити создается разность температур вдоль радиуса трубки. Если разность температур поддерживать постоянной, то возникнет стационарное неравновесное состояние, при котором переносимый тепловой поток не изменяется. Для плотности теплового потока  $j$ , рассеиваемого за время  $dt$  через цилиндрическую поверхность площадью  $S = 2\pi rL$  можно записать следующее соотношение (закон Фурье):

$$j = \frac{dQ}{Sdt} = -C(T) \frac{T}{r}, \quad (7.4)$$

где  $r$  и  $L$  – радиус и длина цилиндра,  $C$  – коэффициент теплопроводности воздуха,  $T$  – температура воздуха.

Используя закон Фурье в цилиндрических координатах для данной задачи можно записать выражение для потока энергии  $dQ$ , рассеиваемой нитью за время  $dt$  за счёт теплопроводности через цилиндрическую поверхность произвольного радиуса  $r$  и длины  $L$ :

$$dQ = -\chi \cdot \frac{dT}{dr} \cdot 2\pi \cdot Lr \cdot dt, \quad (7.5)$$

где  $dT$  - перепад температуры по радиусу  $dr$ .

Интегрируя уравнение (7.5) получим выражение для мощности теплового потока, излучаемого цилиндрической поверхностью радиуса  $r_1$  через внутреннюю цилиндрическую поверхность трубки радиуса  $r_2 > r_1$ :

$$P = \frac{2\pi L}{\ln(r_2/r_1)} \cdot \int_{r_1}^{r_2} \chi(T_i) \cdot dT, \quad (7.6)$$

где  $r_1$  – радиус нити,  $r_2$  - радиус внутренней цилиндрической поверхности трубки, где находится нить,  $T_n$  – температура нити.

Условия эксперимента поддерживаются таким образом, что рассматриваемую задачу можно считать стационарной – температура  $T$  не меняется во времени, т.к. температура нити  $T_n$  и температура внутренней стенки  $T_c$  постоянны. При этом увеличение электрической мощности, выделяемой в нити на величину  $dP$  приводит к возрастанию ее температуры на  $dT_n$ . Следовательно, дифференцируя (7.6) по верхнему пределу, можно прийти к соотношению:

$$dP = \frac{2\pi L}{\ln(r_2/r_1)} \cdot \chi(T_i) \cdot dT_i. \quad (7.7)$$

Так как вблизи нити теплопроводность воздуха определяется температурой нити, то  $\chi T_i$  относится к температуре  $T_n$ . При возрастании температуры нити на  $dT_n$  дополнительный перенос тепловой мощности  $dP$  от

нити к стенке трубки определяется только теплопроводностью слоя воздуха вблизи нити. Из соотношения (7.7) получим:

$$\chi T_i = \frac{\ln(r_1/r_2)}{2\pi L \ln(r_2/r_1)} \cdot \frac{dP}{dT_i}. \quad (7.8)$$

Для определения производной  $dP/dT_H$  при температуре где определяется величина  $\chi T_i$ , необходимо знать зависимость  $P = f(T_H)$  или  $P = f(R_H)$  ( $R_H$  – сопротивление нити при температуре опыта), которую находят по экспериментальным данным (рисунок 7.1).

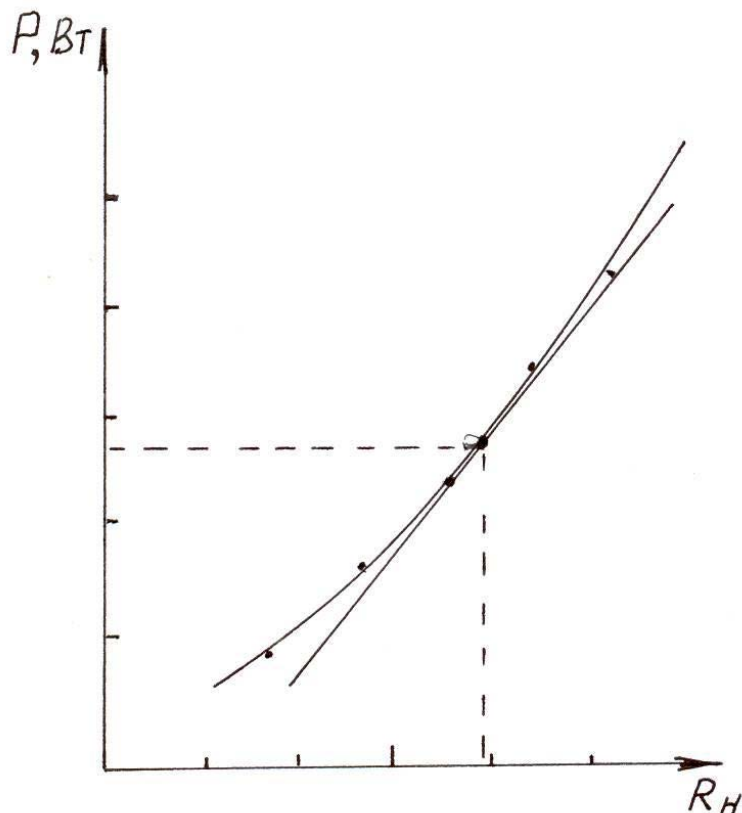


Рисунок 7.1 Примерный вид экспериментальной зависимости  $P = f(R_H)$

### Схема экспериментальной установки и методика измерений

Фотография экспериментальной установки приведена на рисунке 7.2.

- двухканальный измеритель температуры типа «2ТРМО», подключённый к хромель-копелевой термопаре;
- тумблер измерителя температуры;
- универсальный вольтметр (мультиметр) типа «МУ-67» и разъёмы «V» для подключения вольтметра;
- тумблер электропитания установки «СЕТЬ»;
- источник питания и разъёмы «ИП» для его подключения;

- тумблер « $U_0 - U_H$ » для переключения вольтметра на измерение падения напряжения на образцовом сопротивлении ( $U_0$ ) и напряжения на вольфрамовой проволоке ( $U_H$ ).



Рисунок 7.2 Фотография лабораторной установки

На рисунке 7.3 приведена принципиальная схема рабочего участка и электрическая схема питания лабораторной установки.

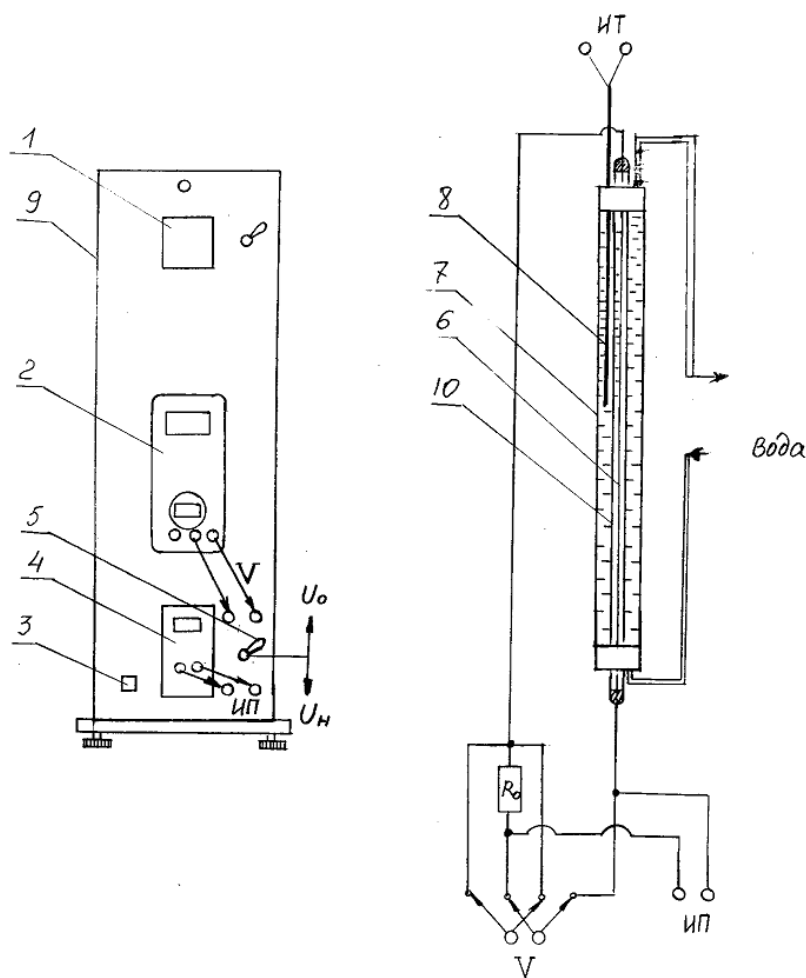


Рисунок 7.3. Принципиальная схема рабочего участка и электрическая схема питания установки

Нагреваемая вольфрамовая проволока-нить (6) находится в цилиндрическом стеклянном баллоне (7) с двойными стенками, между которыми находится вода, заполненная через виниловую трубку (на задней панели установки). Температура стенки этой трубки  $t_c$  считается равной температуре воды циркулирующей между двойными стенками и постоянной в течение опыта. Она определяется хромель-копелевой термопарой (8), соединённой с измерителем температуры (1). Баллон с нитью укреплен в модуле (9). Электропитание к вольфрамовой проволоке подводится от источника питания (4) через разъёмы «ИП». Последовательно с вольфрамовой проволокой включено образцовое сопротивление ( $R_o$ ) для определения величины электрического тока в цепи по измеренному значению падения напряжения на  $R_o$ . Для измерения напряжения на вольфрамовой проволоке  $U_R$  и напряжения на образцовом сопротивлении  $U_o$  к разъёмам «V» подключается мультиметр (2).

Температурная зависимость сопротивления вольфрамовой нити от температуры  $t$  определяется выражением:

$$R_t = R_0(1 + \alpha T_i), \quad (7.9)$$

где  $R_0$  – сопротивление нити при температуре  $t = 0^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления нити  $\text{K}^{-1}$ ,  $T_{\text{H}}$  – температура нити по шкале Кельвина, связанная с температурой  $t_{\text{H}}$  по шкале Цельсия соотношением:

$$T_i = 253,15 + t_i.$$

Температурный коэффициент сопротивления  $\alpha$  зависит от температуры, но в интервале температуры от 0 до  $100^\circ\text{C}$  его можно считать постоянным. Для экспериментального определения  $\alpha$  необходимо выполнить измерения сопротивления  $R_{t1}$ ,  $R_{t2}$  при двух разных значениях температуры  $t_1$  и  $t_2$  соответственно:

$$R_{t1} = R_0(1 + \alpha T_1) \quad \text{и} \quad (7.10)$$

$$R_{t2} = R_0(1 + \alpha T_2). \quad (7.11)$$

Разделив выражение (7.10) на (7.11) будем иметь:

$$\frac{R_{t1}}{R_{t2}} = \frac{1 + \alpha T_1}{1 + \alpha T_2},$$

откуда

$$\alpha = \frac{R_{t1} - R_{t2}}{R_{t1}T_2 - R_{t2}T_1}.$$

На основании выражения (7.9) температура нити определяется из соотношения:

$$t_i = \frac{R_i - R_{0i}}{\alpha \cdot R_{0i}}, \quad ^\circ\text{C}, \quad (7.12)$$

где  $R_{0\text{H}}$  – сопротивление нити при  $t_{\text{H}} = 0^\circ\text{C}$ ,  $R_{\text{H}}$  – сопротивление нити при температуре опыта.

Мощность теплового потока, выделяемая на нити находится по напряжению  $U_{\text{H}}$ , измеренному на нити и силе тока  $I_{\text{H}} = U_0/R_0$  на образцовом сопротивлении  $R_0$ :

$$P = I_{\text{H}}U_{\text{H}}.$$

С учетом (7.12) выражение (7.8) для определения коэффициента теплопроводности воздуха примет вид:

$$\chi(R_i) = \frac{\ln(r_1/r_2)}{2\pi L \alpha R_{0\text{H}}} \cdot \frac{dP}{dR_{\text{H}}}, \quad (7.13)$$

где  $R_{\text{H}} = U_{\text{H}}/I_{\text{H}}$  – электрическое сопротивление вольфрамовой проволоки (нити) нагретой до температуры  $T_{\text{H}}$ .

При отсутствии данных для  $R_{0\text{H}}$  (сопротивление нити при  $t_{\text{H}} = 0^\circ\text{C}$ ) используются данные для  $R_{\text{HK}}$  при комнатной температуре  $t_{\text{K}} = 20^\circ\text{C}$ . При этом



формула (7.12) для расчёта температуры вольфрамовой проволоки приобретает вид:

$$t_i = \frac{1}{\alpha} \frac{R_i}{R_{HK}} - 1 + \frac{R_i}{R_{HK}} t_K. \quad (7.14)$$

### Порядок выполнения работы

1. Изучите состав лабораторной установки и ознакомьтесь с размещением приборов на рабочем месте.
2. Источник питания подключите к гнездам «ИП» на лицевой панели лабораторной установки соблюдая полярность (красный провод «+», черный «-»).
3. Мультиметр (вольтметр) подключите к гнездам «V» на лицевой панели лабораторной установки соблюдая полярность (красный провод «+», черный «-»).
4. Установите органы управления приборов в исходное состояние:
  - Тумблер «СЕТЬ» установите в положение «О».
  - Тумблер измерителя температуры «ВКЛ -  $t^0$ » установите в положение « $t^0$ ».
  - Тумблер « $U_0 - U_H$ » установите в положение « $U_0$ ».
  - На источнике питания поверните регулятор напряжения «VOLTAGE» против часовой стрелки до упора, а регулятор тока «CURRENT» по часовой стрелке до упора.
    - На источнике питания тумблер включения источника питания «I/O» установить в положение «О».
    - Переключатель режимов на мультиметре (вольтметре) установите в положение «OFF».
5. Подключите лабораторный модуль к электрической сети.

**Внимание! Перед проведением экспериментов внимательно ознакомьтесь с порядком выполнения работы (пункты 6-16).**

6. Включите электропитание установки - тумблер «СЕТЬ» установите в положение «I».
7. На источнике питания тумблер включения источника питания «I/O» установите в положение «I».
8. На мультиметре (вольтметре) переключателем режимов установите предел измерения постоянного напряжения «20V»

9. Тумблер измерителя температуры «ВКЛ -  $t^0$ » установите в положение «ВКЛ» при этом на индикаторе измерителя будет отображаться текущее значение температуры стенки трубки.
10. Плавно вращая регулятор напряжения «VOLTAGE» на источнике питания установите напряжение равное **0,5 В**. Текущее значение напряжения будет отображаться на цифровом индикаторе источника питания. Результат измерения  $U_{ин}$  занесите в таблицу 6.1.
11. Тумблер « $U_0 - U_H$ » установите в положение « $U_H$ ». По показаниям мультиметра (вольтметра) произведите отсчет напряжения на нити  $U_H$ . Результат измерения занесите в таблицу 1.
12. Тумблер « $U_0 - U_H$ » установите в положение « $U_0$ ». По показаниям мультиметра (вольтметра) произведите отсчет напряжения на образцовом сопротивлении  $U_0$ . Результат измерения занесите в таблицу 6.1.
13. Определите температуру стенки трубки  $t_C$  по показаниям измерителя температуры. Результат измерения текущего значения температуры занесите в таблицу 1.
14. Плавно изменяя регулятором «VOLTAGE» напряжение источника питания в интервале 0,5-4,0 В с шагом в 0,5 В повторить выполнение пунктов 11-13.
15. По окончании эксперимента установите органы управления лабораторной установки в исходное состояние:
  - Тумблер « $U_0 - U_H$ » установите в положение « $U_0$ ».
  - На источнике питания поверните регулятор напряжения «VOLTAGE» против часовой стрелки до упора, а регулятор тока «CURRENT» по часовой стрелке до упора.
    - На источнике питания тумблер включения источника питания «I/O» установить в положение «O».
    - Переключатель режимов мультиметре (вольтметре) установите в положение «OFF».
    - Тумблер измерителя температуры «ВКЛ -  $t^0$ » установите в положение « $t^0$ ».
    - Тумблер «СЕТЬ» установите в положение «O».
16. Отключите лабораторную установку от электрической сети.

Таблица 7.1 – Результаты измерений

№ п/п	$U_{\text{ип}}, \text{В}$	$t_c, ^\circ\text{C}$	$U_{\text{н}}, \text{В}$	$U_0, \text{мВ}$
1	0,5			
2	1,0			
3	1,5			
4	2			
5	2,5			
6	3,0			
7	3,5			
8	4,0			

### Обработка результатов измерения

1. Используя данные таблицы 7.1 для соответствующих значений напряжений источника питания  $U_{\text{ип}}$  рассчитайте силу тока на вольфрамовой нити по формуле  $I_{\text{н}} = U_0/R_0$ . Данные о значении образцового сопротивления  $R_0$  приведены в таблице 6.3. Результаты расчета силы тока  $I_{\text{н}}$  занесите в таблицу 7.2.

2. По формуле  $R_{\text{н}} = U_{\text{н}}/I_{\text{н}}$  рассчитайте сопротивление вольфрамовой нити при соответствующих значениях напряжений и силы тока. Результаты расчета сопротивления  $R_{\text{н}}$  занесите в таблицу 7.2.

3. Используя расчетные данные таблицы 7.2, определите температуру нити по её электрическому сопротивлению по формуле:

$$t_i = \frac{1}{\alpha} \frac{R_i}{R_{\text{нк}}} - 1 + \frac{R_i}{R_{\text{нк}}} t_{\text{к}}$$

Значения сопротивления нити  $R_{\text{нк}}$  при комнатной температуре  $t = 20^\circ\text{C}$  и температурного коэффициента сопротивления нити  $\alpha$  приведены в таблице 7.3. Результаты расчета температуры нити  $t_{\text{н}}$  по шкале Цельсия занесите в таблицу 7.2.

4. Используя соотношение  $T_i = 253,15 + t_i$ , определите температуру нити по термодинамической шкале Кельвина  $T_{\text{н}}$ . Результаты расчета температуры нити  $T_{\text{н}}$  занесите в таблицу 7.2.

5. По формуле  $P = I_{\text{н}}U_{\text{н}}$  рассчитайте электрическую мощность, выделяемую в нити при соответствующих значениях напряжений и силы тока. Результаты расчета занесите в таблицу 7.2.

6. Постройте график зависимости  $P = f(R_{\text{н}})$ . По графику, для произвольно выбранных двух точек определите приращение сопротивления  $\Delta R_{\text{н}}$  и

соответствующее ему приращение мощности  $\Delta P$ . Данные расчеты произвести для 5-6 пар точек. Результаты расчета приращений занесите в таблицу 7.2.

7. Рассчитайте коэффициент теплопроводности воздуха по формуле:

$$\chi(R_i) = \frac{\ln(r_1/r_2)}{2\pi L \alpha R_{0H}} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta R_H}$$

Значения радиуса нити  $r_1$ , радиуса внутренней цилиндрической поверхности трубки  $r_2$ , длине нити (трубки)  $L$ , сопротивления нити  $R_{HK}$  при комнатной температуре  $t = 20^\circ\text{C}$  и температурного коэффициента сопротивления нити  $\alpha$  приведены в таблице 7.3. Результаты расчета коэффициента теплопроводности воздуха занесите в таблицу 7.2.

8. Рассчитайте погрешность измерения коэффициента теплопроводности воздуха как для прямых измерений.

9. Постройте график зависимости  $P = f(T_H)$ . По наклону полученной прямой определите коэффициент теплопроводности воздуха, как тангенс угла наклона. Сравните его с ранее полученными данными и табличным значением.

10. Постройте график зависимости сопротивления вольфрамовой нити от температуры  $R_H = f(T_H)$ .

11. Сделайте выводы по каждому графику и полученным результатам.

Таблица 7.2 - Результаты расчета коэффициента теплопроводности воздуха

№ п/п	$U_{ип}, \text{В}$	$I_H, \text{А}$	$R_H, \text{Ом}$	$t_H, ^\circ\text{C}$	$T_H, \text{К}$	$P, \text{Вт}$	$\Delta R_H, \text{Ом}$	$\Delta P, \text{Вт}$	$\chi, \text{Вт/м К}$
1	1,5								
2	2,0								
3	2,5								
4	3,0								
5	3,5								
6	4,0								

Таблица 7.3

<b>Параметр</b>	<b>Значение</b>
Диаметр вольфрамовой проволоки	$d_1 = 0,11 \text{ мм}$
Внутренний диаметр трубки	$d_2 = 9 \text{ мм}$
Образцовое сопротивление	$R_o = 0,1 \text{ Ом}$
Сопротивление нити при 20°C	$R_{нк} = 3,2 \text{ Ом}$
Температурный коэффициент сопротивления вольфрама	$a = 4,5 \cdot 10^{-3}, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Длина нити	$L = 450 \text{ мм}$

### **Требования к содержанию отчета по работе**

Рекомендуется следующая структура отчета по лабораторной работе:

5. титульный лист;
6. задание к лабораторной работе;
7. описание схемы экспериментальной установки и методики расчёта;
8. анализ результатов и выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Уравнение теплопроводности. В чём его суть?
2. Что такое градиент температуры?
3. Что называется теплопроводностью?
4. От чего зависит теплопроводность?

## VIII. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМА

**Цель работы:** экспериментальное определения коэффициента температуропроводности металлического образца при охлаждении в термостате с постоянной температурой среды.

### Основные теоретические сведения

Связь между временными и пространственными изменениями температуры в любой точке тела, в которых происходит процесс теплопроводности устанавливается уравнением теплопроводности. Для тела, в котором отсутствуют источники тепла, оно принимает вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 t, \quad (8.1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ . Он является физическим параметром вещества и является мерой теплоинерционных свойств тела. При прочих равных условиях выравнивание температур во всех точках тела будет происходить быстрее, чем больше коэффициент температуропроводности.

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad (8.2)$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности;  $c$  – удельная теплоёмкость вещества;  $\rho$  - плотность вещества.

Решение уравнения (8.1) производится с помощью рядов Фурье. Для различных краевых условий результаты получаются различными, но методология решения, в основном, одинакова. Искомая функция уравнения (8.1) зависит от большого числа переменных, но при более глубоком анализе решений оказывается, что эти переменные можно сгруппировать в три безразмерных комплекса. Эти комплексы являются критериями подобия:

$$\frac{\alpha l}{\lambda} = Bi - \text{критерий Био,}$$

$$\frac{\alpha \tau}{l^2} = F_0 - \text{критерий Фурье,}$$

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

## Методы регулярного режима для исследования тепловых свойств веществ

### 1 Применение метода регулярного режима для нахождения коэффициента теплоотдачи

При малых  $Bi$  температура на поверхности тела незначительно отличается от температуры на его оси. Это возможно 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):

$$\frac{1}{\vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = -m. \quad (8.3)$$

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

$$m = \psi \frac{\bar{\alpha} F}{c} \quad (8.4)$$

Формула (5) отражает содержание первой теоремы Кондратьева:

**Темп охлаждения (нагревания) однородного и изотропного тела при конечном значении коэффициента теплоотдачи пропорционален коэффициенту теплоотдачи, площади поверхности тела и обратно пропорционален его теплоёмкости.**

Множитель  $\psi$  называется коэффициентом неравномерности распределения температуры. **В случае медленного нагрева металлических образцов  $\psi = 1$ .**

А.В. Лыковым было показано, что регулярный режим определяется не только определёнными температурными полями, возникающими в нагреваемом или охлаждаемом теле, но и потоками тепла через его поверхность. Поэтому при нагревании металлических образцов нет необходимости различать регулярные режимы первого, второго и третьего рода. В качестве общего свойства теплового регулярного режима можно принять соотношение

$$-\frac{d\bar{t}}{d\tau} = m(t_{AE} - t), \quad (8.5)$$

где  $\bar{t}$  - средняя по объёму температура тела;  $t_{AE}$  - температура среды.

Из соотношений (8.3) и (8.5) следует

$$\bar{\alpha} = \frac{c_{\text{об}} \rho m}{(t_{AE} - t)} \frac{d\bar{t}}{d\tau}. \quad (8.6)$$

## 2 Применение метода регулярного теплового режима первого рода для определения коэффициента температуропроводности металлов

Экспериментальный метод определения температуропроводности, требующий условия  $Bi \rightarrow \infty$  не всегда осуществим при исследовании тел с высокой теплопроводностью, для которых  $Bi < 10$ . В этом случае применяется метод двух точек, в котором используется важнейшее свойство регулярного режима, состоящее в том, что температурное поле в образце при его охлаждении в среде с постоянной температурой остаётся подобным самому себе. Следовательно, отношение температур для двух произвольных точек тела будет равно постоянной величине, не зависящей от времени:

$$\frac{\vartheta_1}{\vartheta_2} = b, \text{ где } 0 \leq b \leq 1. \quad (8.7)$$

Величина  $b$  и темп охлаждения  $m$  определяются из опыта. Для этого строятся графики зависимостей  $\ln \theta_1 = f_1(\tau)$  и  $\ln \theta_2 = f_2(\tau)$ .

На регулярном участке получаются два отрезка параллельных прямых, угловой коэффициент которых определяет темп охлаждения. Значение  $b$  определяется из тех же графиков по соотношению

$$y = \ln \theta_1 - \ln \theta_2. \quad (8.8)$$

с учётом (8.7):

$$b = e^{-y} \quad (8.9)$$

Температуропроводность исследуемого образца рассчитывается из соотношения

$$\alpha = \frac{mK}{P^2}, \quad (8.10)$$

где:  $P$  - безразмерная величина

$$P = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\infty}} \leq 1 \quad (8.11)$$

и  $K$  - коэффициент формы

$$K = \frac{1}{\left(\frac{\varepsilon_{\infty}}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l}\right)^2} \quad (8.12)$$

где:  $l = R$  - радиус цилиндра;  $\varepsilon$  - постоянная, определяемая из граничных условий при решении уравнения (8.1) для  $Bi < 10$ ;  $\varepsilon_{\infty}$  - постоянная, определяемая из граничных условий при решении уравнения (8.1) для  $Bi = \infty$  (практически  $\geq 100$ ).



В формуле (8.10) величину  $P^2$  заменяют на функцию  $\Phi(y)$ , которая приведена в таблице 8.1. Следовательно, соотношение (8.10) можно записать в виде:

$$\alpha = \frac{mK}{\Phi(y)}, \quad (8.13)$$

Для расчёта темпа охлаждения из экспериментальных данных используется один из графиков (например  $\ln \theta_1 = f_1(\tau)$ )

$$m = \frac{\ln \vartheta_{11} - \ln \vartheta_{12}}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (8.14)$$

а для расчёта коэффициента формы соотношение

$$K = \frac{1}{\left(\frac{2,4048}{R}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{l}\right)^2}. \quad (8.15)$$

Таблица 8.1 - Значение функции  $\Phi(y)$

y	$\Phi(y)$	y	$\Phi(y)$
0,03	0,023	0,22	0,147
0,04	0,030	0,25	0,165
0,05	0,037	0,30	0,196
0,07	0,051	0,35	0,228
0,10	0,072	0,4	0,252
0,12	0,0860	1	0,527
0,15	0,105	2	0,808
0,17	0,118	3	0,927
0,20	0,137	0,5	0,301

Данный метод предполагает предварительное знание коэффициента формы образца, но при этом отпадает необходимость измерения координат двух точек в теле, в которых измеряется температура.

### Схема экспериментальной установки и методика измерений

Схема экспериментальной установки приведена на Рисунке 8.1 и Рисунке 8.2. На передней панели находятся два двухканальных измерителя температуры (1,2) типа ТРМ200, подключённые к трём хромель-копелевым термопарам. Первый канал измерителя (1) подключён к термопаре (5), измеряющей температуру цилиндрического образца (11) в середине на его оси. Первый канал измерителя температуры (2) подключён к термопаре (3), измеряющей температуру внутри цилиндра (11) на расстоянии 16мм от его оси. Второй канал измерителя (2) подключён к термопаре (4), измеряющей температуру

воды в термостате (12) вблизи цилиндра. На передней панели также находятся тумблёр (6) включения электропитания установки, тумблер (17) насоса термостата (25), тумблер (9) включения нагревателя термостата (26), тумблер (20) включения питания электропечи (в данном исполнении заменён на клавишу включения регулятора мощности 10 подводимой к электропечи 19), регулятора мощности (10) электропечи (19), 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 величин температур с последующей обработкой экспериментальных данных.

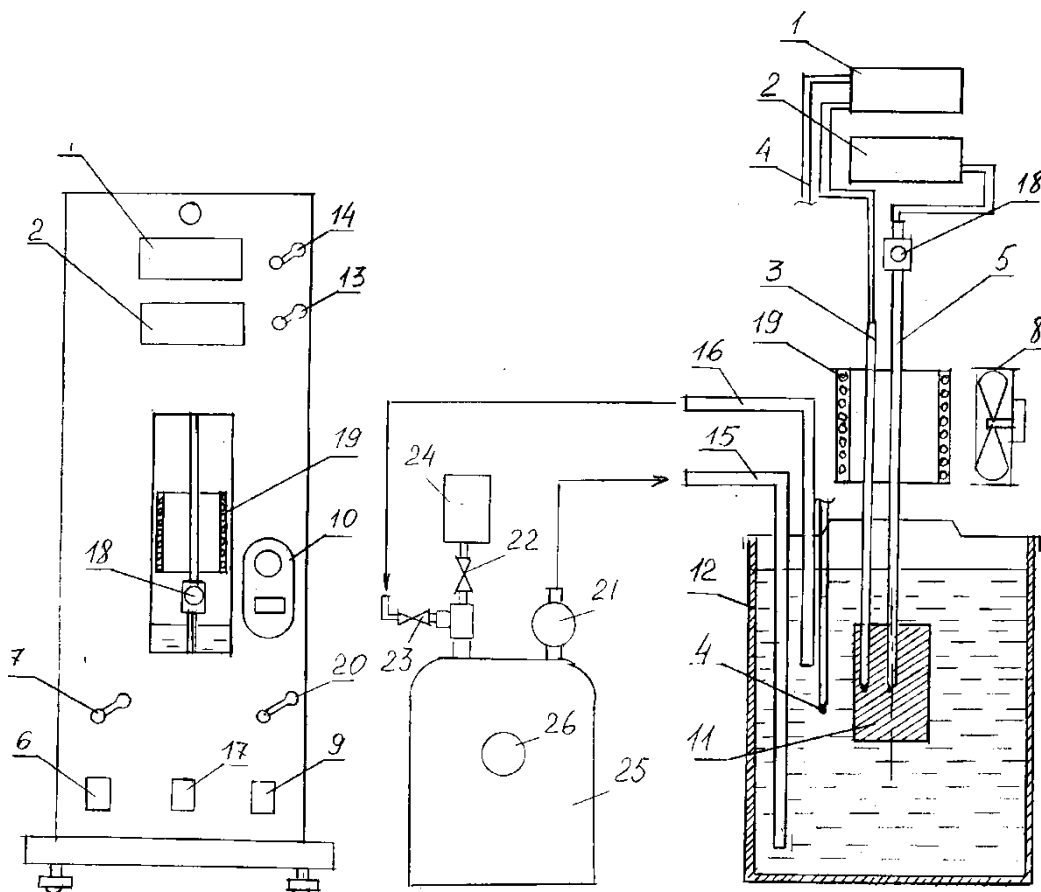


Рисунок 8.1 Экспериментальная установка

Рисунок 8.2 Схема экспериментальной установки

**Подготовка установки к работе.**

**Подготовка термостата (25) и линии циркуляции.**

1. Открыть вентиль (22) и закрыть вентиль (23) термостата (25). Заполнить полностью термостат (25) дистиллированной водой через

расширительный бачок (или штуцер) (24). В термостате не должно остаться воздуха.

## **2. Обязательно закрыть вентиль (22)!!!**

3. Заполнить дистиллированной водой ёмкость (12) примерно на 5/6 её высоты.
4. Соединить виниловую трубку (16) со штуцером вентиля (23) термостата (25), виниловую трубку (15) со штуцером насоса (21) термостата (25).
5. Открыть вентиль (23).
6. Подключить установку к компьютеру через преобразователь интерфейса. (при использовании ПК).

## **Проверка системы термостатирования**

1. Заземлить корпус установки и подключить её к лабораторной сетевой розетке.
2. Подключить циркуляционный насос (21) и нагреватель (26) термостата (25) к соответствующим сетевым розеткам электропитания на задней панели установки.
3. Отключить регулятор температуры (10), повернув диск регулирования против часовой стрелки до щелчка. Включить электропитание установки тумблером (6), измерители температуры тумблерами (13) и (14).
4. 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.
5. 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).

## **Порядок выполнения работы**

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.
7. Измерения можно проводить с подключённым компьютером через преобразователь интерфейса.

**Данные установки и таблица результатов измерений**

Диаметр образца:  $d = 35\text{мм.}$   
 Длина образца:  $l = 70\text{мм.}$   
 Расстояние между спаями двух термопар:  $15\text{мм.}$   
 Материал: нержавеющая сталь AISI-304  
 Масса образца:  $535\text{г.}$

Таблица экспериментальных данных

№ п/п	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{сек}$
1				
...				



Рисунок 8.3 Экспериментальная установка

**Требования к содержанию отчета по работе**

Рекомендуется следующая структура отчета по лабораторной работе:

1. титульный лист;
2. задание к лабораторной работе;
3. описание схемы экспериментальной установки и методики расчёта;
4. анализ результатов и выводы по работе.

### **Контрольные вопросы для допуска к работе**

1. Сформулируйте уравнение нестационарной теплопроводности;
2. Какие виды теплопередачи наблюдаются в данной работе?
3. Дайте определение коэффициента температуропроводности и укажите его размерность;
4. Каковы признаки наступления регулярной стадии нагрева (охлаждения) тела?
5. Какие физические величины необходимо измерить в ходе выполнения работы?
6. Какой физический смысл имеет коэффициент температуропроводности?
7. Был ли в ходе проведения эксперимента достигнут регулярный тепловой режим? Обоснуйте ответ.
8. С какой целью проводится измерение температуры в двух точках каждого образца?

## IX. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЁМКОСТИ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

**Цель работы:** освоить принципы определения удельной теплоемкости при постоянном давлении методом протока; определить удельную теплоемкость воздуха при постоянном давлении; изучить методы измерения разности температур и расхода воздуха.

### Основные теоретические сведения

Теплоемкостью тела  $C$  называют отношение бесконечно малого количества тепла  $\delta Q$ , полученного телом, к соответствующему приращению  $dT$  его температуры

$$C = \frac{\delta Q}{dT}. \quad (9.1)$$

Теплоемкость  $c$  тела массой в 1кг называют удельной (измеряется в единицах [Дж/(кг · К)]), теплоемкость одного моля вещества  $C$  называют молярной (измеряется в единицах [Дж/(моль · К)]). Очевидно, что  $C = \mu \cdot c$ , где  $\mu$  - молярная масса (кг/моль).

Так же, как и количество тепла, теплоемкость есть функция процесса, и приобретает однозначный смысл при указании условий нагрева. То есть при одной и той же величине  $\delta Q$  приращение температуры  $dT$  будут разными в зависимости от того, как меняются внешние параметры (объем  $V$ , давление  $P$  и т. д.) в процессе нагрева. Соответственно разными будут и теплоемкости, измеренные в разных процессах. На основании формулы

$$\delta Q = dU + \delta A = dU + PdV,$$

где  $U$  – внутренняя энергия системы,  $A$  – работа, перепишем уравнение (9.1)

$$C = \frac{dU + PdV}{dT}, \quad (9.2)$$

и поскольку

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T dV,$$

получим

$$C = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V + \left[\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T + P\right] \frac{dV}{dT}. \quad (9.3)$$

В термодинамике особое значение имеют теплоемкости  $C_V$  и  $C_P$  в процессах с фиксированным объемом образца ( $V = const$ ) и при фиксированном давлении ( $P = const$ ). Из соотношения (9.3) очевидно, что

$$C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V.$$

В свою очередь, при постоянном давлении формула (9.3) переходит в

$$C_P = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V + \left[\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T + P\right] \left(\frac{dV}{dT}\right)_P. \quad (9.4)$$

В настоящей работе удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении  $C_P$  определяется экспериментально следующим образом.

### **Схема экспериментальной установки и методика измерений**

Схема экспериментальной установки приведена на Рисунке 9.1. На передней панели находится двухканальный измеритель температур (5) 2ТРМО, подключённый к двум хромель-копелевым термопарам  $t_1$  и  $t_2$  (Рисунок 9.2), источник питания постоянного тока (3), ротаметр (4), тумблёр «Сеть», тумблёр включения компрессора (2), разъёмы (8) для подключения вольтметра (мультиметра) (9), переключатель (7) для измерения напряжения  $U_H$  на нагревателе и падения напряжения  $U_0$  на образцовом сопротивлении  $R_0$ .

На Рисунке 9.2 приведена схема рабочего участка. Воздух при температуре  $t_1$  подаётся компрессором (11) через холодильник (12) и ротаметр (4) по трубке (14), заключённой в вакуумированную оболочку (15). В трубке (14) находится нихромовый нагреватель (16) к которому последовательно подключено образцовое сопротивление  $R_0 = 0,1$  Ом. Протекая через трубку (14), воздух нагревается. Нагреватель питается от источника постоянного тока (3). Напряжение на нагревателе  $U_H$  и напряжение на образцовом сопротивлении  $U_0$  измеряется вольтметром (мультиметром). При этом тумблер (7) поочередно переключается в положение  $U_H$  и  $U_0$ . Температура воздуха на входе в сосуд Дьюара  $t_1$  и температура воздуха на выходе  $t_2$  из трубки (14) после нагрева измеряется прибором 2ТРМО (см. инструкцию по эксплуатации). Объёмный расход воздуха  $G$  измеряется ротаметром (4).

### **Порядок проведения эксперимента**

1. Подсоединить мультиметр (9) с помощью проводов к разъёмам (8) на передней панели установки.
2. Включить питание установки тумблером «Сеть», измеритель температуры (5) тумблером (6), компрессор тумблером (2).
3. Включить питание нагревателя кнопочным выключателем (3) источника питания и установить первое значение напряжения  $U_H = 3$ В.
4. Включить мультиметр и измерить точное значение  $U_H$  и  $U_0$ , переключая тумблер (7) в соответствующие положения.

5. Через 4-5 минут (по достижении стационарного режима) произвести отсчёт температур  $t_1$  и  $t_2$  по измерителю 2ТРМО и объёмного расхода воздуха  $G$  по ротаметру (4).
6. Пункты 3-5 повторить для следующих значений напряжения на нагревателе :

$$U_H = 4, 5, 6, 7 \text{ В.}$$

### Измеренные и расчётные величины

Измеренные величины:

$t_2$  – температура холодного воздуха на входе в Дьюар;

$t_1$  - температура нагретого воздуха на выходе из Дьюара;

$G$  – объёмный расход нагреваемого воздуха;

$U_H$  – напряжение на нагревателе, В;

$U_0$  - напряжение на образцовом сопротивлении, мВ.

Расчётные величины:

$m = G\rho_B$  – массовый расход воздуха ( $\rho_B$  – плотность воздуха);

$I = U_0/R_0$  – ток в нагревателе;

$Q = U_H I$  – мощность, выделяемая нагревателем;

$C_P = \frac{Q_P}{m \cdot (t_1 - t_2)}$ , Дж/(кг · °К) - удельная теплоёмкость воздуха при

постоянном давлении.

### Данные установки и таблица результатов эксперимента

Величина образцового сопротивления:  $R_0 = 0,1 \text{ Ом.}$

Таблица - Результаты измерений

№ п/п	$t_1$	$t_2$	$\Delta t$	$U_H, \text{ В}$	$U_0, \text{ мВ}$	$I, \text{ А}$	$Q, \text{ Вт}$	$G, \text{ м}^3/\text{с}$
1								
2								
3								
4								
5								

Для нахождения Удельной теплоёмкости воздуха при постоянном давлении строится график зависимости

$$Q = f(\Delta t)$$

и определяются параметры линейной функции



$$Q = C_p \cdot m(t_2 - t_1) + Q_{\text{потерь}},$$

$$y = kx + b, \text{ где } y = Q; k = C_p \cdot m; b = Q_{\text{потерь}}.$$

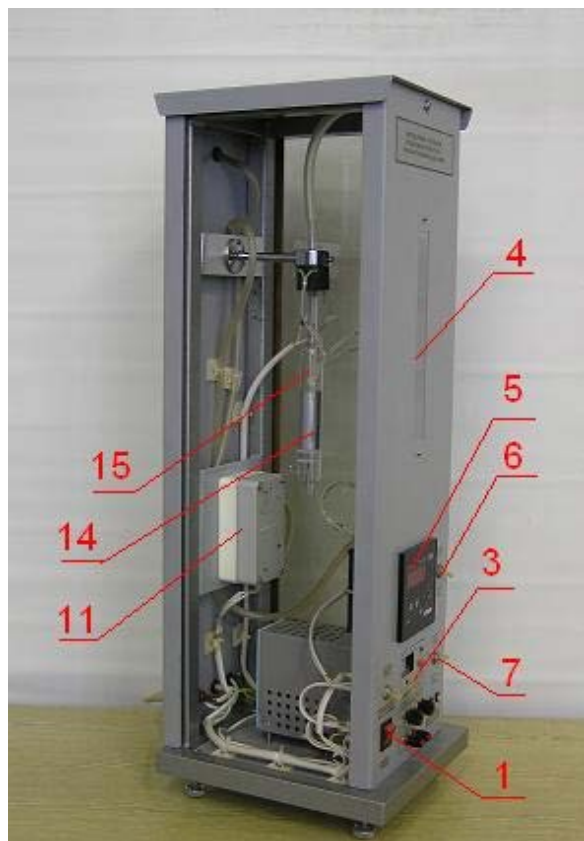


Рисунок 9.1 Экспериментальная установка

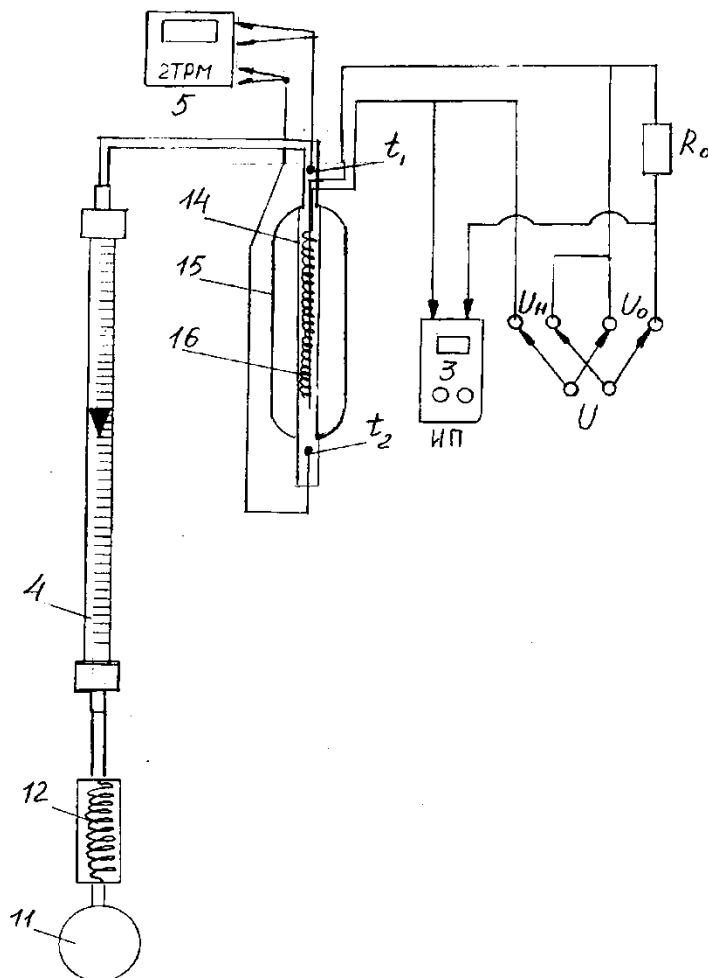


Рисунок 9.2 Схема экспериментальной установки

### Требования к содержанию отчета по работе

Рекомендуется следующая структура отчета по лабораторной работе:

1. титульный лист;
2. задание к лабораторной работе;
3. описание схемы экспериментальной установки и методики расчёта;
4. анализ результатов и выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определения теплоемкости вещества, удельной и молярной теплоемкости. Какова связь между удельной и молярной теплоемкостями.

2. Как Вы понимаете утверждение, что теплоемкость газа есть функция процесса?
3. Выведите формулу для молярной теплоемкости идеального газа при постоянном давлении. Рассчитайте значение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении.
4. Объясните метод проточного калориметрирования для измерения удельной теплоемкости газов при постоянном давлении. Почему нагревание газа при его течении в трубке можно рассматривать как процесс при постоянном давлении?
5. Дайте определение массовому расходу воздуха. Как определяется массовый расход в данном эксперименте?
6. Какими факторами можно объяснить различие в значениях удельной теплоемкости воздуха, полученных экспериментально и теоретически?

## Х. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЁРДЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СЛОЯ

**Цель работы:** экспериментально определить коэффициент теплопроводности текстолита методом цилиндрического слоя.

### Основные теоретические сведения

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 допущения уравнение теплопроводности выглядит так:

$$\frac{d^2t}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dt}{dr} = 0; \quad (10.1)$$

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 (10.1).

$$t = t_{c1} - (t_{c1} - t_{c2}) \frac{\ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)}. \quad (10.2)$$

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

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dr} F, \quad (10.3)$$

где  $F = 2\pi r l$ .

Следовательно,

$$Q = \frac{2\pi r l (t_{c1} - t_{c2})}{\ln(r_2/r_1)}, \quad \text{Вт.} \quad (10.4)$$

Из (4) следует:

$$\frac{Q}{\pi d_1 l} = q_1 = \frac{2\lambda(t_{c1} - t_{c2})}{\ln(r_2/r_1)} \quad \frac{dt}{dr} = \frac{2\lambda(t_{c1} - t_{c2})}{\ln(r_2/r_1)} \quad (10.5)$$

- удельный тепловой поток через внутреннюю поверхность;

$$\frac{Q}{\pi d_2 l} = q_2 = \frac{2\lambda(t_{c1} - t_{c2})}{\ln(r_2/r_1)} \quad (10.6)$$

- удельный тепловой поток через внешнюю поверхность;

$$\frac{Q}{l} = q_1 = \frac{2\pi\lambda(t_{c1} - t_{c2})}{\ln(r_2/r_1)} \quad (10.7)$$

- линейная плотность теплового потока.

**Схема экспериментальной установки и методика измерений**

Схема экспериментальной установки приведена на Рисунке 10.1. На передней панели находится восьмиканальный измеритель температуры (1) типа УКТ-38, подключённый к 6 хромель-копелевым термопарам, тумблер (5) включения УКТ-38, универсальный вольтметр (2) типа МУ-68 с автоматическим переключением пределов измерений, тумблёр электропитания установки (3), разъёмы (V) для подключения мультиметра (2), тумблёр (6) для переключения вольтметра на измерение падения напряжения на образцовом сопротивлении ( $U_0$ ) и напряжения на цилиндрическом нагревателе ( $U_H$ ). Регулируемый источник питания ЛАТР (4) включается тумблером (7).

На Рисунке 10.2 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) Рисунок 1. Выход от ЛАТР соединяется с нагревателем электрическим кабелем через заднюю панель. Последовательно с нагревателем включено образцовое сопротивление ( $R_0$ ) Рисунок 10.2 для определения величины электрического тока в цепи по измеренному значению падения напряжения на  $R_0$ .

На внутренней и наружной поверхности исследуемых образцов расположены шесть хромель-копелевых термопар (по 3 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.

## Порядок проведения эксперимента

Измеряемые величины:

$U_H$  – 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;

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

## Проведение измерений

1. Подключить выход ЛАТР к кабелю нагревателя, расположенного на задней панели установки.
2. Подключить вход ЛАТР к розетке 220В, находящейся на задней панели установки.
3. Снять выходное напряжение на ЛАТР, повернув регулятор напряжения ЛАТР против часовой стрелке до упора.
4. Проверить заземление установки и подсоединить установку к сети 220В.
5. Включить тумблер (3) питания установки, тумблер (7) питания нагревателя и тумблер (5) питания УКТ-38.
6. Установить напряжение на нагревателе  $U_H = 60В$  регулятором напряжения ЛАТР.
7. Подождать 4-5 минут для получения стационарного режима.
8. Снять показания  $U_H$  и  $U_0$  установив переключатель в соответствующее положение.
9. Снять показания  $t_{ij}$ . При этом измеритель температуры УКТ-38 автоматически и последовательно переключается с одной термопары на другую.
10. Занести полученные данные в подготовленную таблицу.
11. Повторить пункты 6-10 устанавливая на нагревателе другие значения напряжения.

## Данные установки

Длина рабочего участка:

$$l = 365 \text{ мм.}$$

Диаметр заделки внутренних термопар:

$$d_1 = 22 \text{ мм.}$$

Диаметр заделки внешних термопар:

$$d_2 = 34 \text{ мм.}$$

Величина образцового сопротивления:

$$R_0 = 0,10 \text{ Ом.}$$

Таблица 1 - Результаты измерений

№	$U_H$	$U_0$	$t_{11}$	$t_{21}$	$t_{12}$	$t_{22}$	$t_{13}$	$t_{23}$
1								
2								
3								
.....								
N								

**Расчётные соотношения**

$$\frac{Q}{l} = q_1 = \frac{2\pi\lambda(t_{c1}-t_{c2})}{\ln(r_2/r_1)}, \text{ где} \quad (10.8)$$

$$Q = U_H \times I_H; \quad I_H = U_0/R_0; \quad (10.9)$$

$$t_{c1} = (t_{11} + t_{12} + t_{31})/3; \quad t_{c2} = (t_{21} + t_{22} + t_{21})/3; \quad (10.10)$$

$$\lambda = \frac{Q \cdot \ln(r_2/r_1)}{2\pi l(t_{c1}-t_{c2})}. \quad (10.11)$$

Таблица 2 - Расчеты

№	$Q$	$t_{c1}$	$t_{c2}$	$\lambda$
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.

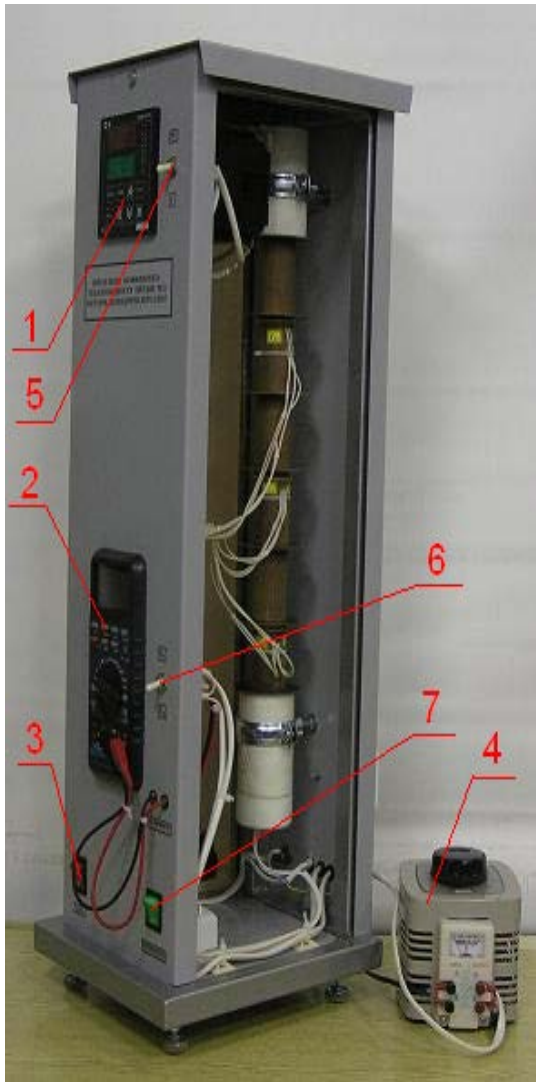


Рисунок 10.1 Экспериментальная установка

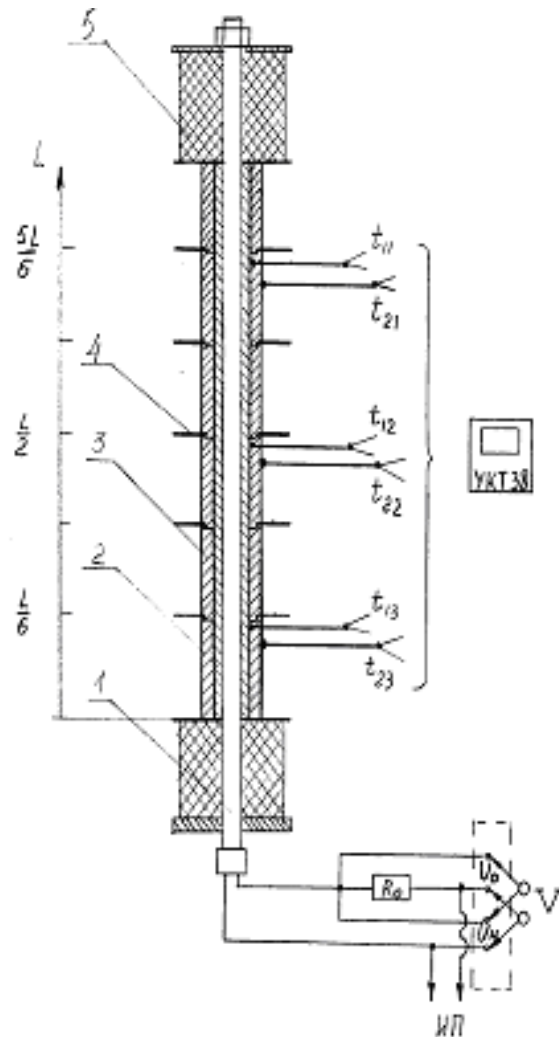


Рисунок 10.2 Схема экспериментальной установки

### Требования к содержанию отчета по работе

Рекомендуется следующая структура отчета по лабораторной работе:

1. титульный лист;
2. задание к лабораторной работе;
3. описание схемы экспериментальной установки и методики расчёта;
4. анализ результатов и выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение температурного поля. Назовите характеристики температурного поля.
2. Опишите одномерное стационарное температурное поле в неограниченном цилиндре. Дайте его графическое изображение.

3. Как изменяется градиент температуры по толщине цилиндрической стенки при стационарном тепловом потоке в случае, когда коэффициент теплопроводности  $\lambda$  не зависит от температуры?
4. Дайте объяснение понятиям: тепловой поток, поверхностная плотность теплового потока, линейная плотность теплового потока; приведите их единицы измерения.
5. Охарактеризуйте процесс теплопроводности.
6. Сформулируйте закон теплопроводности Фурье.
7. Что характеризует коэффициент теплопроводности?
8. Напишите дифференциальное уравнение теплопроводности для цилиндра в стационарном режиме.
9. Дайте характеристику условий однозначности. С какой целью они задаются?
10. Назовите способы задания граничных условий для решения дифференциального уравнения теплопроводности? Перечислить и дать краткое определение.
11. Что характеризует коэффициент температуропроводности?
12. Укажите связь между коэффициентом теплопроводности, коэффициентом температуропроводности и удельной объемной материалов?
13. Поясните принцип работы экспериментальной установки и назначение отдельных элементов установки.
14. Перечислите измерительные приборы и дайте характеристику измеряемых величин, указав единицы измерения.
15. Опишите порядок обработки экспериментальных данных для определения коэффициента теплопроводности.
16. С какой целью при проведении эксперимента необходимо дождаться стационарного режима теплопроводности?



## **XI. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ТЕЧЕНИИ НАГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ («ТРУБА В ТРУБЕ»)**

**Цель работы:** исследование закономерностей теплопередачи при вынужденной конвекции на примере теплообменника типа «труба в трубе».

### **Основные теоретические сведения**

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

На Рисунке 1 показана схема рекуперативного теплообменника типа «труба в трубе». Температура теплоносителей изменяется под действием теплопередачи от одного к другому, а также к окружающей среде. Теплоноситель во внутренней трубе отдает тепловой поток  $Q_{отд}$ , равный разности потоков энтальпии на входе и выходе из трубы:

$$Q_{отд} = G_1 c_{p1} (t_1 - t_2).$$

Соответственно, во внешней трубе теплоноситель воспринимает поток:

$$Q_{воспр} = G_2 c_{p2} (t_4 - t_3).$$

Здесь  $c_{p1}$  и  $c_{p2}$  – изобарные удельные теплоемкости теплоносителей (в данном случае как в первом, так и во втором контуре теплоносителем является вода, и, считая, что ее теплоемкость слабо меняется на участке теплообмена, принимаем  $c_{p1} = c_{p2} = 4180$  Дж/(кг·К);  $G_1$  и  $G_2$  – массовые расходы теплоносителей, определяемые по объемному расходу  $V$  и плотности воды  $\rho = 994$  кг/м<sup>3</sup>.

$$G = V\rho.$$

Разность отданного и воспринятого теплового потока образует потери тепла в окружающее пространство:

$$Q_{пот} = Q_{отд} - Q_{воспр}.$$

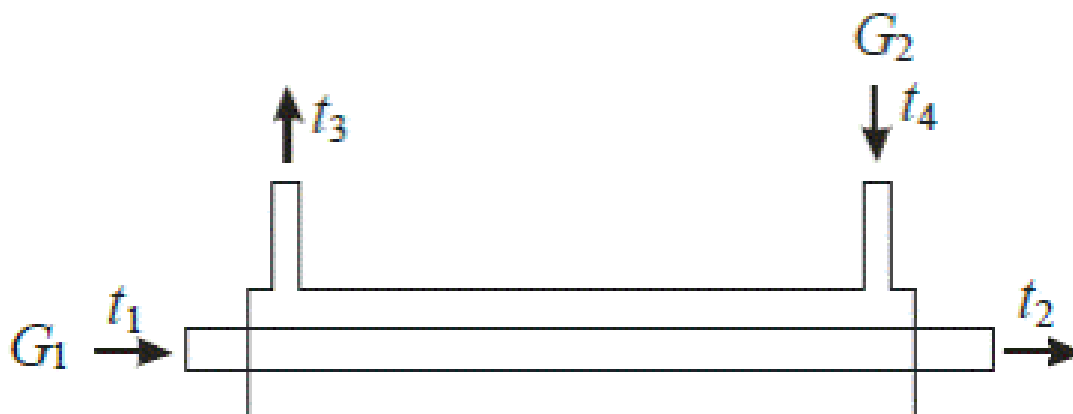


Рисунок 11.1 Схема рекуперативного теплообменника типа «труба в трубе» (противоточное движение теплоносителей). Обозначены температуры теплоносителя на входе и выходе и расходы теплоносителей

Потери тепла в условиях данной установки происходят из внешней трубы за счет естественной конвекции. Целью работы является изучение теплообмена между теплоносителями, поэтому основным определяемым параметром является отданный поток тепла. Уравнение теплопередачи между средами, разделенными цилиндрической стенкой, выглядит следующим образом:

$$Q_{\text{отд}} = \pi l k \Delta t,$$

где  $l$  – длина поверхности теплообмена (наименьшее из длин внутренней и внешней трубы);  $\Delta t$  – среднелогарифмический температурный напор.

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}}\right)},$$

$$\Delta t_{\max} = \max(|t_1 - t_2|, |t_3 - t_4|); \Delta t_{\min} = \min(|t_1 - t_2|, |t_3 - t_4|).$$

Коэффициент теплопередачи при сопряженном теплообмене:

$$k = \left( \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{1}{\alpha_2 d_2} \right), \quad (11.1)$$

где  $d_1, d_2$  – внутренний и внешний диаметры внутренней трубы;

$\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи на внутренней и внешней стороне внутренней трубы;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности стали. Трубы сделаны из нержавеющей стали, для которой  $\lambda = 14,4 + 0,016 \cdot \bar{t}$ . Среднюю температуру стали найдем следующим образом:

$$\bar{t} = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4)/4.$$

Приведем критериальные соотношения для теплоотдачи на стенках внутренней трубы. Для ламинарных режимов течения,  $Re \leq 2300$ , как для внутренней, так и для внешней стенки справедливо критериальное соотношение:

$$Nu = 1,55(Re \cdot Pr \cdot l_0/l) \cdot 1/3, \quad (11.2)$$

описывающее как случай цилиндрической трубы (внутренняя), так и кольцеобразной (внешняя). В соотношении (11.1)  $d_1$  является диаметром, если оно используется для внутренней трубы, и расстоянием между стенками кольцевого канала, если оно используется для внешней. В качестве пространственного масштаба, входящего в безразмерные критерии, принято  $d_1$ .

В турбулентном режиме течения,  $Re \geq 104$ , для внутренней трубы справедливо соотношение:

$$Nu = 0,021 \cdot Re \cdot 0,8 \cdot Pr \cdot 0,43, \quad (11.3)$$

для внешней:

$$Nu = 0,017 \cdot Re \cdot 0,8 \cdot Pr \cdot 0,4 \cdot d_3/d_2, \quad (11.4)$$

где  $d_3$  – внутренний диаметр внешней трубы. При вычислении чисел Рейнольдса скорость среды определяется по ее расходу  $V$  как  $w = V/F$ ;

где  $F$  – площадь сечения канала. Коэффициенты теплоотдачи определяются по числу Нуссельта, при этом теплопроводность жидкости рассчитывается при температуре, равной средней из температур на входе и выходе:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda_{ж}}{l_0}; \lambda_{ж} = \lambda_{ж}(\bar{t}).$$

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

### Схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка (Рисунок 11.2) состоит из следующих элементов:

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;
- 13.  $K_1, K_2, K_3, K_4$  – вентили, регулирующие режимы течения (прямоток или противоток) и расход воды во внешней трубе рабочего участка;
- 14. ВМ – вентили Маевского, предназначенные для удаления воздуха из системы.

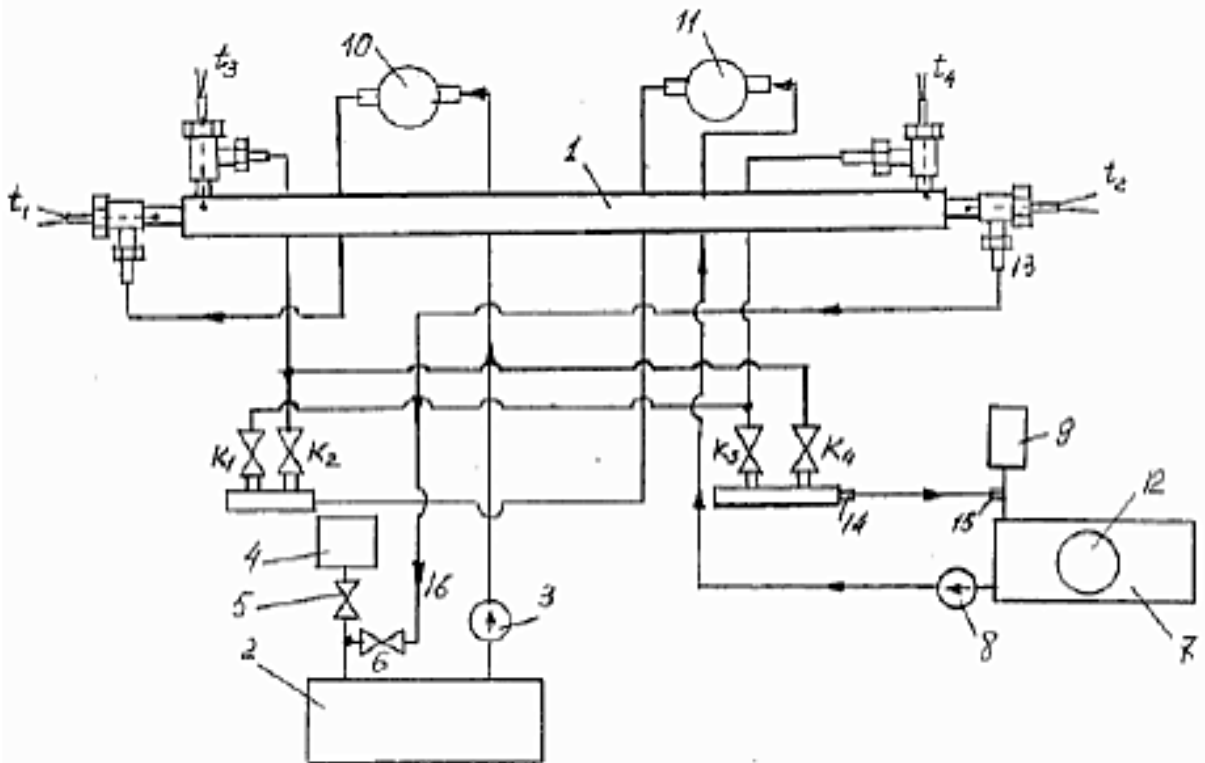


Рисунок 11.2 Схема экспериментальной установки и подключения водяных контуров и термопар

### Порядок проведения эксперимента

1. Соединить шлангом насос 3 и расходомер 10 (рисунок 3).
2. Соединить шлангом вентиль 6 и штуцер 13.
3. Соединить шлангом штуцер 14 и штуцер 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  $K_1, K_2, K_3, K_4$  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  $K_1$ ,  $K_4$  и открыть вентили  $K_2$ ,  $K_3$ .
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  $K_3$  отрегулировать необходимый расход воды во внешней трубе рабочего участка в режиме «Прямоток».
18. Для установки режима «Противоток» во внешней трубе рабочего участка закрыть вентили  $K_2$ ,  $K_3$  и открыть вентили  $K_1$ ,  $K_4$ .
19. Вентилем  $K_4$  отрегулировать необходимый расход воды во внешней трубе рабочего участка в режиме «Противоток».

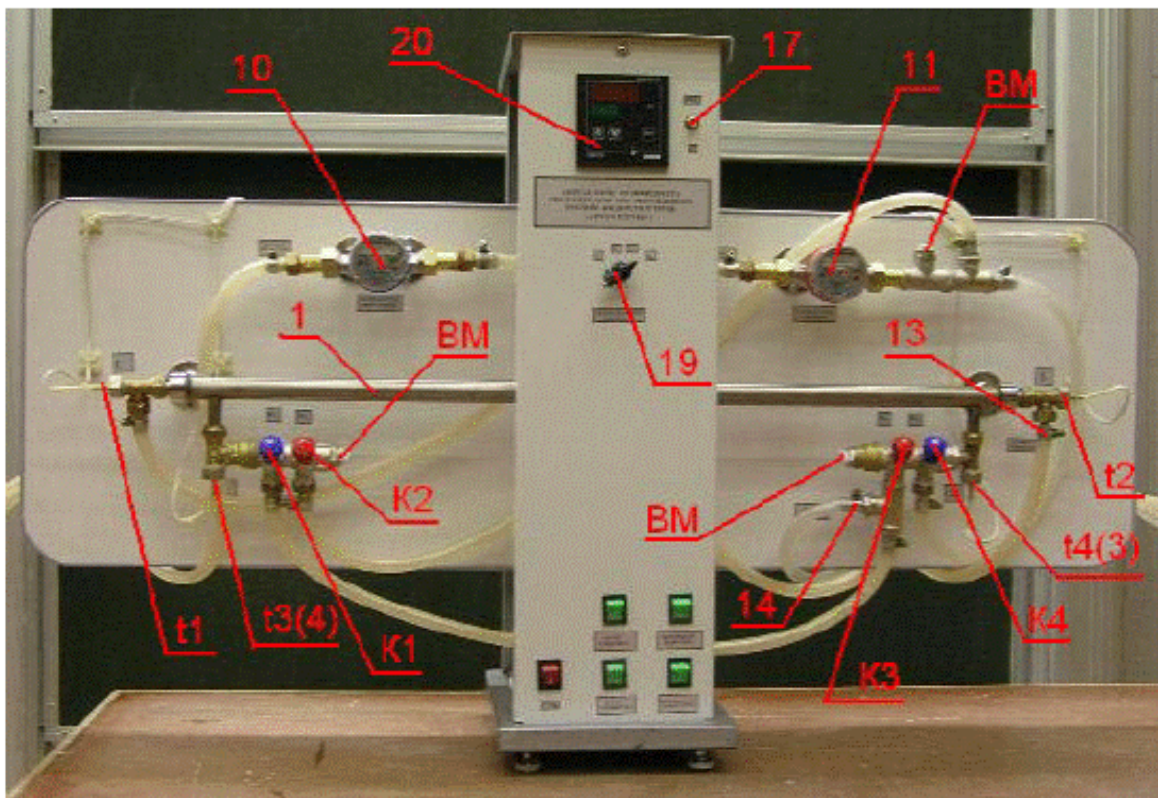
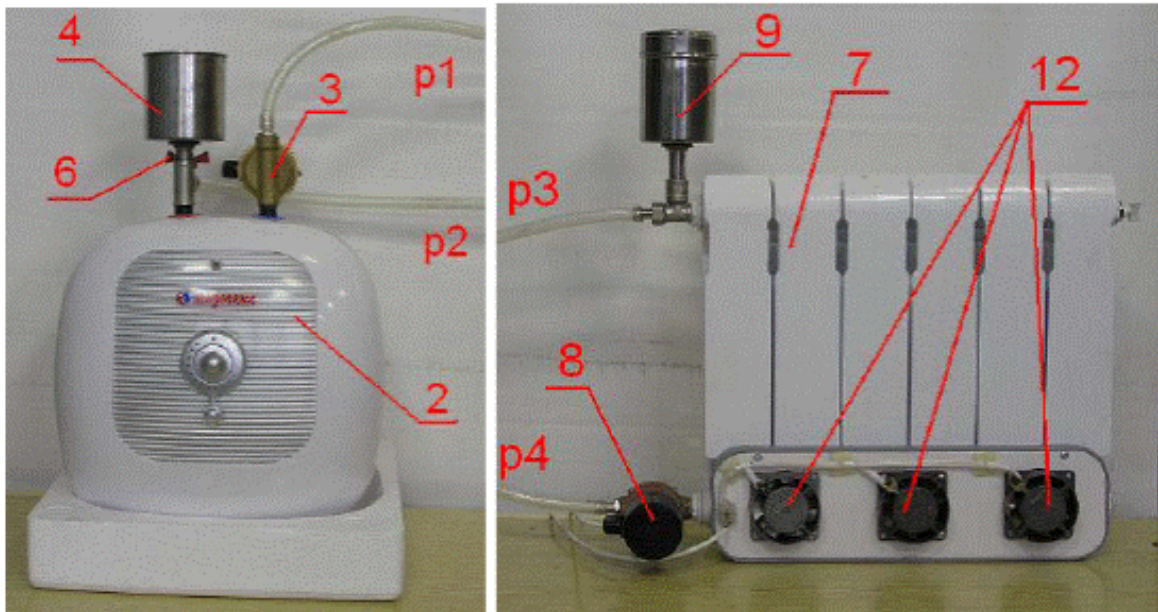


Рисунок 11.3 Внешний вид стенда

20. После установки нужного режима течения воды во внешней трубе рабочего участка и требуемых расходов ( $15-20\text{см}^3$  в секунду, см. паспорт расходомера), включить водоподогреватель 2 тумблером «Нагрев».

21. Включить измеритель температуры 20 тумблером 17.

22. Включить вентилятор холодильника тумблером 18 «Вентилятор холодильника».
23. 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.
24. Включить секундомер и произвести отсчёт показаний расходомеров.
25. Выключить секундомер и произвести отсчёт показаний расходомеров. При этом определить промежуток времени, за который через сечения труб прошли соответствующие объёмы воды.

Результаты измерений заносятся в таблицу 11.1:

Таблица 11.1- Результаты измерений

№ опыта	Первое показание расходомера	Второе показание расходомера	Интервал времени	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$

### Обработка результатов измерений

1. Определить расходы воды, деля разницу показаний счетчиков объема на интервал времени измерения.
2. Определить потоки энтальпии воды на входе и выходе из внутренней и внешней труб, умножая расход на плотность воды, ее удельную теплоемкость и температуры.
3. Определить мощности теплоотдачи от труб, вычитая потоки энтальпии на выходе из потоков на входе.
4. Определить теоретические значения коэффициентов теплоотдачи по соотношениям (11.1, 11.2, 11.3, 11.4).

Результаты расчетов заносятся в таблицу 11.2:

Таблица 11.2 - Результаты измерений

№ опыта	$V_{\text{внеш}}$	$Re_{\text{внеш}}$	$\alpha_{\text{внеш}}$	$V_{\text{внут}}$	$Re_{\text{внут}}$	$\alpha_{\text{внут}}$	$k_{\text{эксп}}$	$k_{\text{теор}}$

### Требования к содержанию отчета по работе

Рекомендуется следующая структура отчета по лабораторной работе:

1. титульный лист;
2. задание к лабораторной работе;
3. описание схемы экспериментальной установки и методики расчёта;
4. анализ результатов и выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие виды теплопередачи реализуются в данной лабораторной установке?
2. Сформулируйте принцип измерения расхода, используемый в данной установке;
3. Какой метод измерения температур используется в данной лабораторной установке?
4. Какие физические величины необходимо измерить в ходе выполнения работы?
5. Сформулируйте закон Ньютона–Рихмана.
6. Должен ли коэффициент теплопередачи расти с увеличением расхода жидкости, падать или оставаться постоянным?
7. Дайте определение коэффициента теплопередачи;
8. Дайте определение коэффициента теплоотдачи и укажите его размерность;
9. Сформулируйте принципы прямоточной и противоточной схемы теплообмена. Какая из схем обеспечивает более эффективную теплопередачу и почему?
10. С какой целью данная методика предусматривает проведение серии измерений при различных значениях расхода жидкости?
11. Ламинарный или турбулентный режим течения реализуется в условиях эксперимента во внешней и внутренней трубах?
12. В ламинарном или турбулентном режиме течения достигается большее значение коэффициента теплоотдачи? Обоснуйте ответ;



## ХII. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ МЕТОДОМ РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМА

**Цель работы:** исследование процесса нестационарной теплопроводности на предмете тела, испытывающего охлаждение в регулярном режиме.

Установка предназначена экспериментального определения коэффициента теплоотдачи при медленном нагревании (охлаждении) металлических цилиндрических образцов в воздушном термостате.

### Основные теоретические сведения

Связь между временными и пространственными изменениями температуры в любой точке тела, в которых происходит процесс теплопроводности устанавливается уравнением теплопроводности. Для тела, в котором отсутствуют источники тепла, оно принимает вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 t, \quad (12.1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с. Он является физическим параметром вещества и является мерой теплоинерционных свойств тела. При прочих равных условиях выравнивание температур во всех точках тела будет происходить быстрее, чем больше коэффициент температуропроводности.

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad (12.2)$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности;  $c$  – удельная теплоёмкость вещества;  $\rho$  - плотность вещества.

Решение уравнения (12.1) производится с помощью рядов Фурье. Для различных краевых условий результаты получаются различными, но методология решения, в основном, одинакова. Искомая функция уравнения (12.1) зависит от большого числа переменных, но при более глубоком анализе решений оказывается, что эти переменные можно сгруппировать в три безразмерных комплекса. Эти комплексы являются критериями подобия:

$$\frac{\alpha l}{\lambda} = Bi - \text{критерий Био,}$$

$$\frac{\alpha \tau}{l^2} = Fo - \text{критерий Фурье,}$$

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

При изменении температуры среды, в которой нагревается тело по линейному закону и при постоянном тепловом потоке поглощаемым телом имеет место условия

$$t_{AE} = t_O + b\tau \text{ и } \alpha = \text{const.} \quad (12.3)$$

При этом температура в любой точке тела является линейной функцией времени, а распределение температур – параболой. Этот режим нагревания носит название регулярного режима второго рода или квазистационарного теплового режима.

При малых  $Bi$  температура на поверхности тела незначительно отличается от температуры на его оси. Это возможно 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):

$$\frac{1}{\vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = -m. \quad (12.4)$$

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

$$m = \psi \frac{\bar{\alpha}F}{c}. \quad (12.5)$$

Формула (12.5) отражает содержание первой теоремы Кондратьева:

**Темп охлаждения (нагревания) однородного и изотропного тела при конечном значении коэффициента теплоотдачи пропорционален коэффициенту теплоотдачи, площади поверхности тела и обратно пропорционален его теплоёмкости.**

Множитель  $\psi$  называется коэффициентом неравномерности распределения температуры. **В случае медленного нагрева металлических образцов  $\psi = 1$ .**

А.В. Лыковым было показано регулярный режим определяется не только определёнными температурными полями, возникающими в нагреваемом или охлаждаемом теле, но и потоками тепла через его поверхность. Поэтому при нагревании металлических образцов нет необходимости различать регулярные режимы первого, второго и третьего рода. В качестве общего свойства теплового регулярного режима можно принять соотношение

$$-\frac{d\bar{t}}{d\tau} = m(t_{Ж} - \bar{t}), \quad (12.6)$$

где  $\bar{t}$  - средняя по объёму температура тела;  $t_{Ж}$  - температура среды.

Из соотношений (12.5) и (12.6) следует

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{F \cdot \psi} \frac{C_{уд} \cdot M}{(\bar{t} - t_{ж})} \frac{d\bar{t}}{d\tau}, \quad (12.7)$$

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

### **Схема экспериментальной установки и методика измерений**

Схема экспериментальной установки приведена на Рисунке 12.1. На передней панели находятся два двухканальных измерителя температуры (1, 2) типа ТРМ200, подключённые к трём хромель-копелевым термопарам. Первый канал измерителя (1) подключён к термопаре (5), измеряющей температуру дюралевого образца  $t_1$ . Первый канал измерителя (2) подключён к термопаре (4), измеряющей температуру в центре медного образца  $t_2$ , а второй канал подключён к термопаре (3), измеряющей температуру воздуха в термостате  $t_3$ . На передней панели также находятся тумблер (6) включения электропитания установки, тумблер (9) включения циркуляционного насоса термостата (8), тумблер (7) включения нагревателя термостата (водоподогревателя) (10), устройство подъёма (11) образцов из термостата (12), тумблер (13) включения вентилятора.



Рисунок 12.1 Внешний вид стенда

На Рисунке 12.2 приведена принципиальная схема термостатирования цилиндрических образцов (13). Процесс нагрева двух образцов в воздушном термостате контролируется термопарами (4) и (5), размещёнными в центре образцов. Температура воздуха в термостате измеряется термопарой (3).

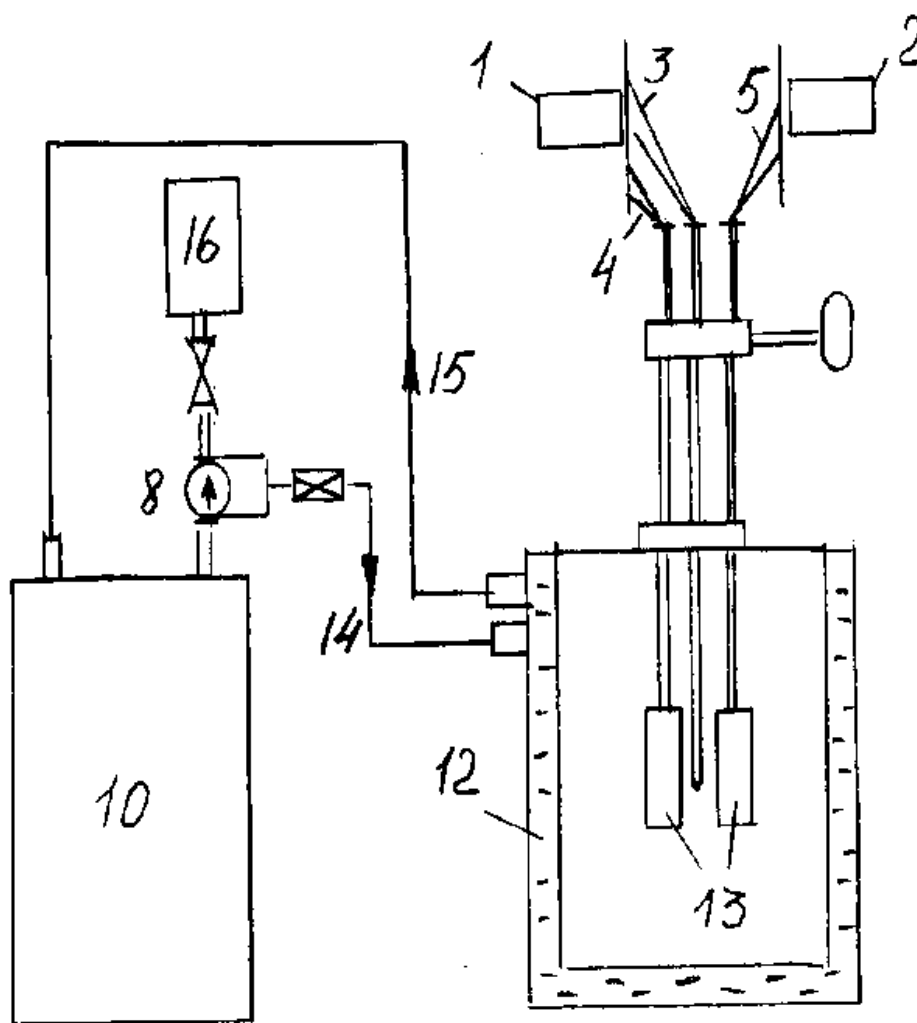


Рисунок 12.2 Схема экспериментальной установки

### Подготовка установки к работе

1. Подключить циркуляционный насос (8) и водоподогреватель (10) к соответствующим сетевым розеткам электропитания на задней панели установки.
2. Соединить подводящую воду трубку (14) и отводящую воду трубку (15) с соответствующими штуцерами на термостате (12) на задней панели установки.
3. Заполнить водоподогреватель дистиллированной водой (около 10 л.) через расширительный бачок (16). При этом трубка (15) должна быть отсоединена от водоподогревателя (10).
4. Заземлить корпус установки и подключить её к лабораторной сетевой розетке. Включить электропитание установки тумблером (6). Периодически включая и выключая циркуляционный насос тумблером (9), удалить воздух из системы термостатирования.

### Порядок выполнения работы

1. Включить установку тумблером (6), циркуляционный насос тумблером (9), водоподогреватель тумблером (7).
2. Установить регулятором, находящимся под верхней крышкой водоподогревателя нужный режим нагрева.
3. Включить тумблерами (17) и (18) измерители температуры (1) в дюралевом образце  $t_1$  и измерителя температуры (2) в медном образце  $t_2$ , и воздуха в термостате  $t_3$ .
4. Включить секундомер или подготовить часы.
5. Через каждые 30 секунд произвести отсчёт показаний измерителя температуры среды  $t_3$  и образцов  $t_1$ ,  $t_2$ . Прибор (2) производит автоматический опрос двух термопар ( $t_3$ ) и ( $t_2$ ) с интервалом четыре секунды.

### Данные установки и таблица результатов измерений

Диаметр образцов

$d = 18\text{мм}$

Длина образцов

$l = 70\text{мм}$

Масса медного образца

$m_M = 159\text{г}$

Масса дюралевого образца

$m_D = 49\text{г}$

Таблица 12.1 Экспериментальные данные

№	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{сек}$
1				
2				
3				
4				
5				

### Данные установки

Размеры образцов:

$D = 18\text{мм}, L = 70\text{мм}$

Расположение термопар:

№ 1 в медном образце;

№ 2 в дюралевом образце;

№ 3 в воздухе вблизи образцов.

Максимальная температура

$60 - 65^\circ\text{C}$

## **Требования к содержанию отчета по работе**

Рекомендуется следующая структура отчета по лабораторной работе:

5. титульный лист;
6. задание к лабораторной работе;
7. описание схемы экспериментальной установки и методики расчёта;
8. анализ результатов и выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Сформулируйте уравнение нестационарной теплопроводности;
2. Какие виды теплопередачи наблюдаются в данной работе?
3. Дайте определение коэффициента температуропроводности и укажите его размерность;
5. Каковы признаки наступления регулярной стадии нагрева (охлаждения) тела?
6. Какие физические величины необходимо измерить в ходе выполнения работы?
7. Какие два предельных режима теплообмена с окружающей средой должны реализовываться в данной экспериментальной методике?
8. Какие физические величины измеряются на данной лабораторной установке непосредственно, а какие – косвенным образом?
9. Какие методы используются в данной лабораторной работе для определения температур?
10. Нарушение, каких указаний данной методики приведет к получению неверного значения коэффициента температуропроводности?
11. Какой физический смысл имеет коэффициент температуропроводности?
12. С какой целью проводится измерение температуры в двух точках каждого образца?
13. Сравните теоретическую оценку отклонения временной зависимости температуры от кривой регулярного режима с экспериментальной кривой;

## Список использованных источников

1. Ландау Л.Д. Гидродинамика [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – ФИЗМАТЛИТ, 2015. - 736с.
2. Галиуллин Р.Г. Течение вязкой жидкости и теплообмен тел в звуковом поле [Текст] / Р.Г. Галлиулин, В.Б. Репин, Р.К. Халитов - Казань: Изд-во КГУ. - 1978. с 128.
3. Брюханов О. Н. и др. Тепломассообмен [Текст] / О. Н. Брюханов , С.Н. Шевченко Учебник - Москва: ООО "Научно-издательский центр ИНФРА-М", 2012 - 464с.
4. Шиляев М. И. Аэродинамика и тепломассообмен газодисперсных потоков [Текст] / М. И. Шиляев Учебное пособие: 2 - Москва: ООО "Научно-издательский центр ИНФРА-М", 2015 - 288с.
5. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л. Г. Лойцянский учебник: Издание 7-е, исправленное - Москва: Дрофа, 2003 - 840с.
6. Моргунов К. П. Механика жидкости и газа: учебное пособие [Текст] / К. П. Моргунов 2-е изд., испр. и доп. - Лань, 2018 - 208с.