

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
"Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина"

Кафедра теоретических основ теплотехники

№

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ В УСЛОВИЯХ
СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ НА
ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЦИЛИНДРЕ**

Методические указания по выполнению
лабораторной работы по дисциплине
"Тепломассообмен"

Иваново 2017

Составители: В.В.БУХМИРОВ
М.В. ПРОРОКОВА
Т.Е. СОЗИНОВА

Редактор Ю.С. ПЛЕТНИКОВА

Методические указания содержат краткую теоретическую справку по изучаемому вопросу, описание лабораторного стенда, методику проведения и обработки результатов эксперимента.

Предназначены для студентов, изучающих курс “Тепломассообмен”.

Методические указания утверждены цикловой методической комиссией ТЭФ

Рецензент

кафедра теоретических основ теплотехники ФГБОУ ВО
"Ивановский государственный энергетический университет
имени В. И. Ленина".

1 Задание

1. Экспериментально определить средний коэффициент конвективной теплоотдачи от поверхности горизонтальной трубы к окружающему воздуху.

2. Рассчитать коэффициент конвективной теплоотдачи по известному критериальному уравнению.

3. Сравнить значение коэффициента теплоотдачи, полученного экспериментально, со значением коэффициента теплоотдачи, рассчитанному по критериальному уравнению.

4. Обработать результаты эксперимента в виде критериального уравнения вида $Nu = B \cdot Ra^m$.

2 Основы теории

2.1 Экспериментальное определение среднего коэффициента конвективной теплоотдачи

Теплоотдача – это процесс сложного теплообмена на границе раздела фаз, например, между твердой стенкой и окружающей средой [1].

График температурного поля при теплоотдаче между твердой стенкой и окружающей текучей средой показан на рис. 1.

Расчет теплоотдачи заключается в определении теплового потока, которым обмениваются стенка и окружающая среда.

Для условий лабораторного стенда сложный теплообмен от наружной поверхности трубы в окружающую среду происходит одновременно за счет конвективного теплообмена и теплового излучения. Такой процесс сложного теплообмена называют радиационно-конвективной теплоотдачей.

Конвективный теплообмен в условиях свободного движения текучей среды возникает вследствие разности плотностей слоев текучей среды, имеющих разную температуру. Под действием сил гравитации более легкие нагретые слои воздуха поднимаются вверх, а более тяжелые холодные слои опускаются вниз. Свободное движение возникает около поверхности теплообмена в пограничном слое толщиной δ_T (см. рис. 1), за пределами пограничного слоя воздух практически неподвижен.

Тепловое излучение представляет собой процесс распространения теплоты в пространстве электромагнитными волнами (по волновой теории) или фотонами (по квантовой теории).

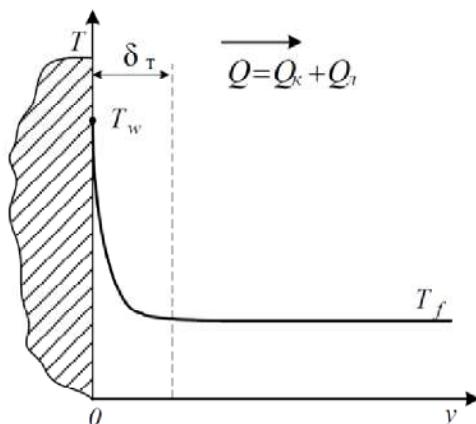


Рис.1. График температурного поля при теплоотдаче между твердой стенкой и окружающей средой

В стационарном режиме теплообмена теплота, отдаваемая поверхностью теплообмена, равна теплоте, получаемой от нагревателя, расположенного с внутренней стороны поверхности теплообмена (в трубе). Таким образом, электрическая мощность нагревателя $N_{эл}$ равна суммарному тепловому потоку от внешней поверхности теплообмена к окружающей среде:

$$N_{\text{эл}} = Q = Q_{\text{к}} + Q_{\text{л}}, \quad (1)$$

где Q – суммарный тепловой поток от внешней поверхности теплообмена к окружающей среде; $Q_{\text{к}}$ – тепловой поток конвекцией от внешней поверхности теплообмена к окружающему воздуху; $Q_{\text{л}}$ – тепловой поток излучением от внешней поверхности теплообмена к окружающим конструкциям.

Для условий эксперимента результирующий тепловой поток излучением от наружной поверхности трубы к окружающим лабораторный стенд предметам в помещении равен:

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon \sigma_0 (T_{\text{w}}^4 - T^4) F, \quad (2)$$

где ε – степень черноты поверхности теплообмена (трубы) [2]; $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана–Больцмана; T_{w} , T – абсолютные температуры поверхности трубы и поверхности окружающих предметов соответственно, К ; F – площадь наружной поверхности трубы, м^2 .

Принимая допущение о равенстве температуры предметов в помещении и температуры воздуха ($T = T_{\text{в}}$), получим

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon \sigma_0 (T_{\text{w}}^4 - T_{\text{в}}^4) F, \quad (3)$$

где $T_{\text{в}}$ – абсолютная температура окружающего воздуха, К .

Конвективный тепловой поток от наружной поверхности теплообмена найдем из формулы (1):

$$Q_{\text{к}} = Q - Q_{\text{л}}. \quad (4)$$

В инженерных расчетах тепловой поток при теплоотдаче находят по закону теплоотдачи Ньютона:

$$Q = \alpha (T_{\text{w}} - T_{\text{в}}) F, \quad (5)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; T_{w} – температура наружной поверхности, $^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{в}}$ – температура окру-

жающего воздуха, $^{\circ}\text{C}$; F – площадь поверхности теплообмена, м^2 .

Из формулы (5) можно определить значение коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{Q}{(T_w - T_b)F}, \quad (6)$$

где суммарный коэффициент теплоотдачи равен:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_l. \quad (7)$$

При этом конвективную и лучистую составляющие теплоотдачи при допущении $T = T_b$ находят по формуле (6) соответственно:

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{(T_w - T_b)F}, \quad (8)$$

$$\alpha_l = \frac{Q_l}{(T_w - T_b)F}. \quad (9)$$

где $F = \pi \cdot d_{\text{нар}} \cdot L$, $d_{\text{нар}}$ – наружный диаметр трубы, м; L – длина трубы, м.

2.2 Определение среднего коэффициента конвективной теплоотдачи по критериальным формулам

В инженерных расчетах коэффициент конвективной теплоотдачи рассчитывают по критериальным формулам для свободной конвекции около горизонтальных труб [1]. При свободном движении текучей среды форма критериального уравнения зависит от режима движения флюида. Для условий свободной конвекции критериальное уравнение имеет вид

$$\text{Nu} = f(\text{Ra}), \quad (10)$$

где Nu – определяемый критерий подобия; Ra – определяющий критерий подобия.

Критерий Нуссельта находят по формуле

$$Nu = \frac{\alpha_k R_0}{\lambda}, \quad (11)$$

где α_k – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К); R_0 – определяющий (характерный) размер, м; λ – коэффициент теплопроводности текучей среды, Вт/(м·К).

Критерий Рэлея по определению равен:

$$Ra = Gr \cdot Pr, \quad (12)$$

где Gr – критерий Грасгофа; Pr – критерий Прандтля.

Критерий Грасгофа находят по формуле

$$Gr = \frac{g R_0^3}{\nu^2} \beta \cdot \Delta T, \quad (13)$$

где $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения; ν – кинематический коэффициент вязкости текучей среды, м²/с; β – коэффициент объемного расширения флюида, 1/К; ΔT – разность между средней температурой стенки и температурой флюида, °С.

Теплофизические свойства текучей среды и критерий Прандтля находят при определяющей температуре T_0 в справочных таблицах [2].

Коэффициент объемного расширения капельных жидкостей приведен в справочных таблицах [2] в зависимости от температуры текучей среды, а для газов его рассчитывают по формуле

$$\beta = \frac{1}{T_0}, \quad (14)$$

где T_0 – определяющая температура газа, К.

Критерий Нуссельта для горизонтальных труб рассчитывают по нижеприведенным формулам.

А. Критериальная формула И.М. Михеевой [1]

При ламинарном режиме течения флюида ($Ra = 10^3 \div 10^8$) критерий Нуссельта находят по формуле

$$Nu = 0,5 \cdot Ra^{0,25} \cdot \varepsilon_t, \quad (15)$$

Определяющие параметры:

$T_0 = T_B$ – температура текучей среды (воздуха) вдали от поверхности теплообмена (за пределами теплового пограничного слоя);

$R_0 = d_{нар}$ – наружный диаметр трубы.

Поправку ε_t , учитывающую изменение физических свойств среды в зависимости от температуры, рассчитывают по формуле

$$\varepsilon_t = \left(\frac{Pr_B}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (16)$$

где критерий Прандтля Pr_B принимают по справочным данным [2] для текучей среды (воздуха) при определяющей температуре флюида T_0 , а критерий Прандтля Pr_w принимают по справочным данным [2] для текучей среды при температуре стенки T_w .

Б. Критериальная формула М.А. Михеева [1]

Критерий Нуссельта можно рассчитать по единой формуле для свободного течения флюида

$$Nu = C \cdot Ra^n, \quad (17)$$

где коэффициенты C и n в зависимости от режима течения приведены в таблице 1.

Определяющие параметры:

$T_0 = 0,5 \cdot (T_B + T_w)$ – средняя температура пограничного слоя;

$R_0 = d_{нар}$ – наружный диаметр трубы.

Таблица 1 – Значения констант С и n в формуле (17)

Ra	Режим течения	С	n
$< 10^{-3}$	пленочный	0,5	0
$10^{-3} \div 5 \cdot 10^2$	переходный от пленочного к ламинарному	1,18	1/8
$5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$	ламинарный и переходный к турбулентному	0,54	1/4
$> 2 \cdot 10^7$	турбулентный	0,135	1/3

3 Экспериментальная установка

Принципиальная схема рабочего участка экспериментальной установки и ее внешний вид показаны соответственно на рисунках 2 и 3.

Рабочий участок экспериментальной установки (см. рис. 2) включает медную тонкостенную трубу **1**, длина и внешний диаметр которой составляют соответственно 600 мм и 45 мм. Электронагреватель **2** расположен внутри трубы вдоль ее оси в цилиндрическом термостате **3**. Торцевые поверхности медной трубы изолированы заглушками **4** из материала с низким коэффициентом теплопроводности.

Для измерения температуры на внешней поверхности трубы зачеканены шесть хромель-копелевых термопар $T_1 \div T_6$: термопары $T_1 \div T_5$ – в верхней части трубы с шагом 100 мм, термопара T_6 – в нижней части трубы. Для измерения температуры воздуха предназначена термопара T_{cp} , расположенная за пределами теплового пограничного слоя.

Термопары $T_1 \div T_6$ и T_{cp} подключены к измерителю температуры **5** типа 2ТРМ0 через переключатель **6**.

Электронагреватель **2** через образцовое сопротивление R_0 подключен к источнику переменного напряжения – лабораторному автотрансформатору (ЛАТР) **7**. Значение напряжения, подаваемого на нагреватель, устанавливается регулятором **8**.

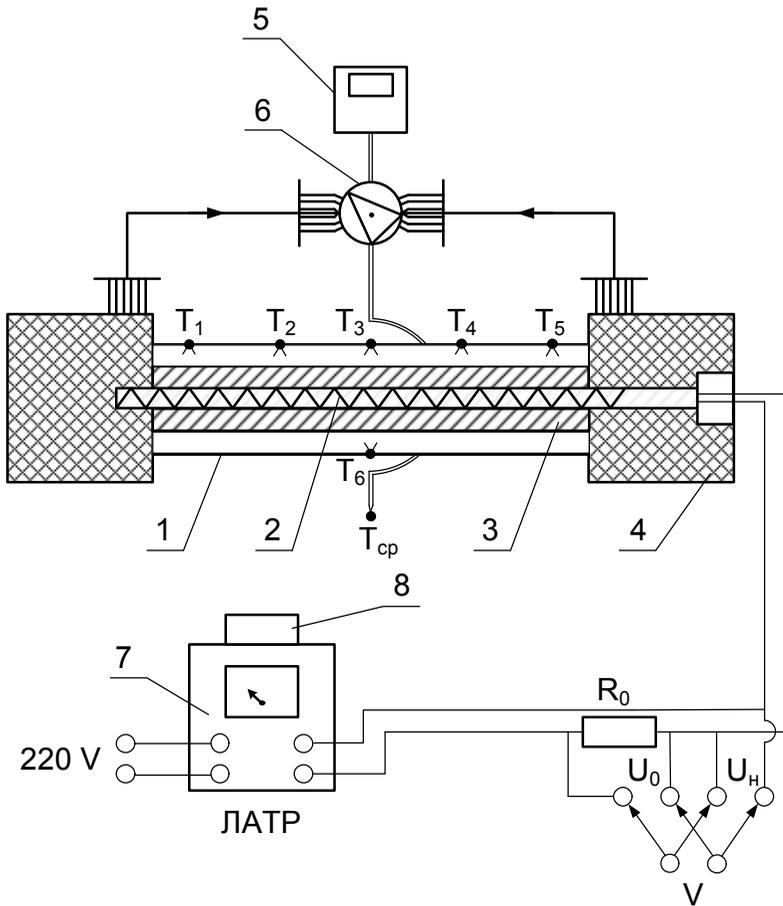


Рис. 2. Принципиальная схема рабочего участка экспериментальной установки:

1 – медная тонкостенная труба; 2 – электронагреватель; 3 – цилиндрический термостат; 4 – теплоизолирующая заглушка; 5 – измеритель температуры 2ТРМ0; 6 – переключатель измерителя температуры; 7 – ЛАТР; 8 – регулятор ЛАТРа

На передней панели лабораторной установки **9** (см. рис. 3) расположены тумблер питания установки **10**, тумблер источника питания электронагревателя **11**, мультиметр **12** с тумблером переключения **13** на измерение напряжения на нагревателе U_H и на образцовом сопротивлении U_0 , тумблер включения измерителя температур **14**.

Сбор и первичная обработка экспериментальных данных производят при помощи персонального компьютера **15**.

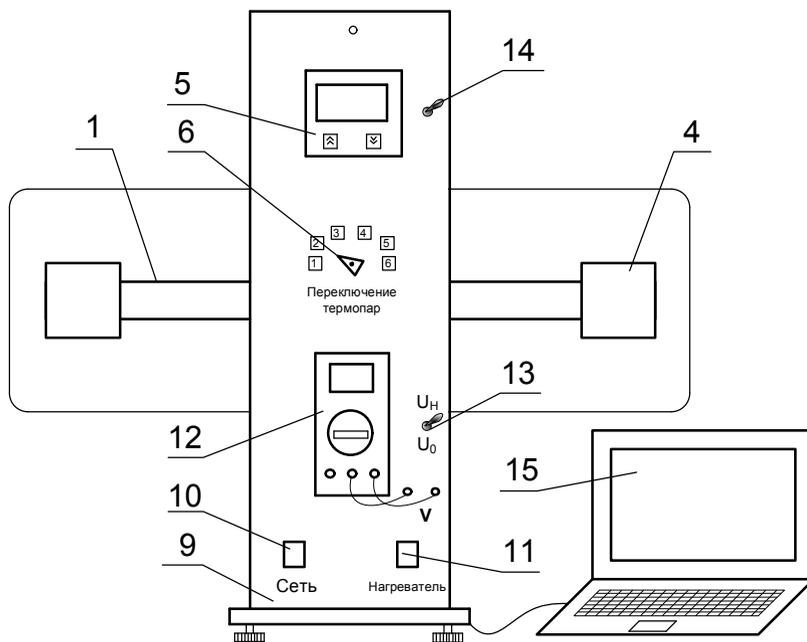


Рис. 3. Внешний вид экспериментальной установки:

1 – медная тонкостенная труба; 5 – измеритель температуры 2ТРМ0; 6 – переключатель измерителя температуры; 9 – передняя панель лабораторной установки; 10 – тумблер электропитания установки; 11 – тумблер источника питания электронагревателя; 12 – мультиметр; 13 – тумблер для переключения мультиметра; 14 – тумблер включения измерителя температур; 15 – персональный компьютер

4 Порядок проведения эксперимента

Внимание! Экспериментальную установку включает и выключает инженер или преподаватель!

1. Ознакомиться с устройством экспериментальной установки. Изучить методику проведения эксперимента.
2. Подготовить журнал наблюдений.
3. О готовности к проведению эксперимента сообщить преподавателю.
4. Включить питание установки тумблером 10.
5. Включить питание электронагревателя установки тумблером 11.
6. Подать напряжение на нагреватель при помощи регулятора 8 ЛАТРа (напряжение устанавливает инженер или преподаватель).
7. Включить измеритель температуры 5 тумблером 14.
8. Включить мультиметр 12, установив ручку переключателя на измерение переменного напряжения (~).
9. Переключить тумблер 13 на измерение напряжения на нагревателе U_n . Записать показания мультиметра 12 в журнал наблюдений.
10. Переключить тумблер 13 в положение U_0 на измерение напряжения на образцовом сопротивлении. Записать показания мультиметра 12 в журнал наблюдений.
11. Выполнить измерения температур $T_1 \div T_6$ и T_{cp} при помощи измерителя температур 5 и переключателя 6, заполняя соответствующие ячейки журнала наблюдений.
12. Выполнять пункты 9 \div 11 каждые 5 \div 10 мин (по указанию преподавателя) до достижения стационарного режима теплообмена, который характеризуется неизменным значением температур в течение трех измерений.
13. Установить следующее значение напряжения на нагревателе. Повторить пункты 9 \div 12.
14. Об окончании эксперимента доложить преподавателю или инженеру.

5 Журнал наблюдений

Лабораторную работу выполнил студент группы _____

_____ Дата _____
ФИО Подпись

Выполнение работы подтверждаю _____
Подпись преподавателя/инженера

№	$U_{н},$ В	$U_{0},$ В	$T_{1},$ $^{\circ}\text{C}$	$T_{2},$ $^{\circ}\text{C}$	$T_{3},$ $^{\circ}\text{C}$	$T_{4},$ $^{\circ}\text{C}$	$T_{5},$ $^{\circ}\text{C}$	$T_{6},$ $^{\circ}\text{C}$	$T_{ср},$ $^{\circ}\text{C}$
1									
2									
3									
4									
5									

6 Обработка результатов эксперимента

Экспериментальное определение коэффициента конвективной теплоотдачи

1. Рассчитать тепловой поток от внешней поверхности трубы к воздуху:

$$Q = N_{эл} = I \cdot U_{н} = \frac{U_0}{R_0} U_{н}, \quad (18)$$

где $R_0 = 1 \text{ Ом}$ – величина образцового сопротивления.

2. Определить среднюю температуру поверхности медной трубы

$$T_w = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 T_i, \quad (19)$$

где i – номер точки измерения температуры поверхности; T_i – значение температуры поверхности трубы в точке измерения.

3. Рассчитать тепловой поток с поверхности каждой трубы: излучением по формуле (3) и конвекцией по формуле (4).

4. По формуле (8) рассчитать экспериментальное значение коэффициента конвективной теплоотдачи.

Определение коэффициента конвективной теплоотдачи по критериальным формулам

Коэффициент конвективной теплоотдачи около горизонтальных труб можно определить по критериальным уравнениям И.М. Михеевой и М.А. Михеева (см. раздел 2.2).

Коэффициент конвективной теплоотдачи по критериальным формулам определяют следующим образом.

1. Выбрать критериальную формулу для расчета коэффициента теплоотдачи.

2. В соответствии с выбранным критериальным уравнением найти определяющие параметры:

– определяющий размер R_0 ;

– определяющую температуру T_0 , по значению которой из справочных таблиц [2] необходимо выписать кинематический коэффициент вязкости ν , критерий Прандтля Pr , коэффициент теплопроводности λ . По формуле (14) найти коэффициент объемного расширения β .

3. Рассчитать критерий Грасгофа по формуле (13).

4. Найти критерий Рэлея по формуле (12).

5. По значению критерия Рэлея определить режим течения воздуха около трубы в соответствии с выбранным критериальным уравнением.

6. По критериальной формуле рассчитать безразмерный коэффициент конвективной теплоотдачи – критерий Нуссельта в зависимости от режима течения.

7. Найти коэффициент конвективной теплоотдачи по формуле

$$\alpha_k = \text{Nu} \frac{\lambda}{R_0}. \quad (20)$$

8. Сравнить значения коэффициента теплоотдачи, полученные по формуле (8) и по формуле (20):

$$\varphi = \frac{|\alpha_k^{\text{эксп}} - \alpha_k^{\text{крит}}|}{\alpha_k^{\text{крит}}} \cdot 100\%. \quad (21)$$

Обработка результатов эксперимента в виде критериального уравнения

Получим критериальное уравнение для условий свободной конвекции в виде

$$\text{Nu} = B \cdot \text{Ra}^m, \quad (22)$$

где B и m – эмпирические коэффициенты.

Для этого эмпирические коэффициенты B и m найдем по следующему алгоритму.

1. Назначим определяющие параметры:

- в качестве определяющего размера для горизонтальной трубы зададим наружный диаметр трубы $R_0 = d_{\text{нар}}$;
- в качестве определяющей температуры примем температуру пограничного слоя

$$T_0 = 0,5 \cdot (T_{\text{в}} + T_{\text{w}}). \quad (23)$$

Из справочных таблиц [2] при определяющей температуре найдем теплофизические свойства воздуха: ν , λ , Pr . Рассчитаем β по формуле (14).

2. Для каждого режима нагрева трубы рассчитаем критерий Рэлея Ra_1 и Ra_2 по формуле (12) и критерий Нуссельта Nu_1 и Nu_2 по формуле (11).

3. Запишем в табл. 2 значения критериев Ra_1 и Ra_2 , Nu_1 и Nu_2 и их логарифмы $lg Ra_1$, $lg Ra_2$, $lg Nu_1$ и $lg Nu_2$.

4. В логарифмических координатах ($lg Ra$, $lg Nu$) необходимо нанести опытные точки на график (рис.4).

Получим прямую линию:

$$lg Nu = lg B + m lg Ra, \quad (24)$$

5. Находим значения эмпирических коэффициентов

$$m = \frac{lg Nu_1 - lg Nu_2}{lg Ra_1 - lg Ra_2}, \quad (25)$$

$$B = \frac{Nu_1}{Ra_1^m} = \frac{Nu_2}{Ra_2^m}. \quad (26)$$

Таблица 2 – Журнал обработки результатов эксперимента

Ra_1	Ra_2	Nu_1	Nu_2	$lg Ra_1$	$lg Ra_2$	$lg Nu_1$	$lg Nu_2$

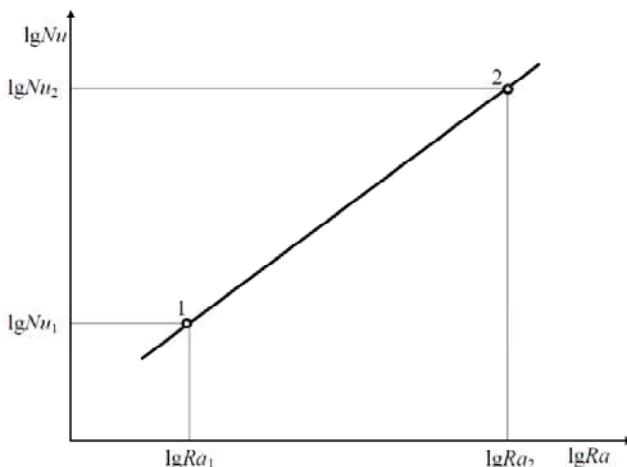


Рис. 4. К расчету коэффициентов аппроксимации B и m

6. Запишем критериальную формулу (22) с полученными эмпирическими коэффициентами B и m .

7 Содержание отчета о выполнении лабораторной работы

Отчет о выполнении лабораторной работы должен содержать:

- задание на выполнение лабораторной работы;
- принципиальную схему экспериментального стенда;
- журнал наблюдений;
- обработку результатов опыта: экспериментальное определение значения коэффициента конвективной теплоотдачи, расчет коэффициента конвективной теплоотдачи по критериальной формуле и критериальное уравнение $Nu = B \cdot Ra^m$, полученное в результате эксперимента;
- выводы по работе.

8 Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятий «конвекция», «конвективный теплообмен», «конвективная теплоотдача».

2. Какие виды теплообмена происходят в данной лабораторной установке.

3. Напишите закон конвективной теплоотдачи, поясните входящие в него величины.

4. Поясните физический смысл коэффициента теплоотдачи. Укажите его размерность.

5. Поясните механизм возникновения свободной конвекции.

6. Какие режимы движения текучей среды наблюдаются при свободной конвекции около горизонтальной трубы.

7. Проанализируйте критериальные уравнения для свободной конвекции и поясните влияние физических величин на величину коэффициента теплоотдачи.

8. Дайте определение критерия подобия. На какие группы подразделяются критерии подобия?

9. Назовите способы вывода критериев подобия.

10. Объясните алгоритм получения критериального уравнения?

11. Дайте характеристику понятий «определяющий размер», «определяющая температура».

12. Напишите формулу и поясните физический смысл критерия Нуссельта.

13. Напишите формулу и поясните физический смысл критерия Грасгофа.

14. Объясните способ определения коэффициента объемного расширения для газов и жидкостей?

15. Напишите формулу и поясните физический смысл критерия Прандтля.

16. Напишите формулу и поясните физический смысл критерия Рэлея.

17. Как влияет направление теплового потока (от стенки к текучей среде или от текучей среды к стенке) на коэффициент теплоотдачи? Как направление теплоотдачи учитывают в критериальных формулах?

18. Поясните принцип работы и назначение элементов экспериментальной установки.

19. Перечислите измерительные приборы и дайте характеристику измеряемых величин, указав единицы их измерения.

20. Поясните принцип измерения теплового потока в данной лабораторной работе.

21. Поясните методику экспериментального определения коэффициента конвективной теплоотдачи.

22. Поясните методику расчета коэффициента конвективной теплоотдачи по критериальным формулам.

23. Напишите в общем виде критериальное уравнение для свободной конвекции.

24. Опишите сложный теплообмен на поверхности труб.

9 Библиографический список

1. **Бухмиров, В.В.** Тепломассообмен для бакалавров: учеб. пособие / В.В. Бухмиров / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2014. – 360 с.

2. **Бухмиров, В.В.** Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассообмен»: учеб. пособие / В.В. Бухмиров, Д.В. Ракутина, Ю.С. Солнышкова / ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2009. – 102 с.

10 Содержание

1	Задание	3
2	Основы теории	3
3	Экспериментальная установка	9
4	Порядок проведения эксперимента	12
5	Журнал наблюдений	13
6	Обработка результатов эксперимента	13
7	Содержание отчета о выполнении лабораторной работы	17
8	Контрольные вопросы	17
9	Библиографический список	19

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ В УСЛОВИЯХ
СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОМ
ЦИЛИНДРЕ**

Методические указания по выполнению лабораторной работы
по дисциплине "Тепломассообмен"

Составители: БУХМИРОВ Вячеслав Викторович
ПРОРОКОВА Мария Владимировна
СОЗИНОВА Татьяна Евгеньевна

Редактор Т.В. Соловьёва

Подписано в печать Формат 60x84¹/₁₆.

Печать плоская. Усл.печ.л. . Тираж 100 экз. Заказ №
ФГБОУ ВО "Ивановский государственный энергетический уни-
верситет имени В.И.Ленина"

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ