

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

№ 2372

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА
МЕТОДОМ НАГРЕТОЙ НИТИ**

Методические указания по выполнению
лабораторной работы по дисциплине
"Тепломассообмен"

Иваново 2016

Составители: В.В.БУХМИРОВ,
М.В. ПРОРОКОВА

Редактор Т.Е. СОЗИНОВА

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".

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА МЕТОДОМ НАГРЕТОЙ НИТИ

Методические указания по выполнению лабораторной работы
по дисциплине "Тепломассообмен"

Составители: БУХМИРОВ Вячеслав Викторович
ПРОРОКОВА Мария Владимировна

Редактор Т.В. Соловьёва

Подписано в печать

Формат 60x84¹/₁₆.

Печать плоская. Усл.печ.л. 0,93. 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

Задание

1. Экспериментально определить коэффициент теплопроводности воздуха при атмосферном давлении методом нагретой нити.

2. Сравнить экспериментальное значение коэффициента теплопроводности воздуха со справочными данными и сделать вывод о точности определения коэффициента теплопроводности воздуха.

Введение

Теплопроводностью называют процесс переноса теплоты в неоднородном поле температур, обусловленный взаимодействием микрочастиц вещества (атомов, молекул, электронов и т.п.).

В сплошной изотропной среде существует функциональная связь между тепловым потоком и градиентом температурного поля, которую называют законом теплопроводности Фурье:

$$\bar{Q} = -\lambda(T)\text{grad}(T)F, \quad (1)$$

где $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности вещества, зависящий от его температуры, Вт/(м·К); $\text{grad}(T)$ – градиент температурного поля, К/м; F – площадь поверхности теплообмена, м².

Для поверхностной плотности теплового потока уравнение Фурье запишется следующим образом:

$$\bar{q} = -\lambda(T)\text{grad}(T). \quad (2)$$

Знак "минус" в уравнениях (1) и (2) показывает, что векторы теплового потока и градиента температуры направлены в противоположные стороны. Градиент температурного поля направлен по нормали к изотермической по-

верхности в сторону возрастания температуры, а тепловой поток – в сторону ее убывания.

Коэффициент теплопроводности λ характеризует способность вещества проводить теплоту и является физическим параметром вещества. Коэффициент теплопроводности определяют экспериментально для каждого вещества в зависимости от температуры.

Для определения коэффициента теплопроводности газов был разработан *метод нагретой нити*, согласно которому коэффициент теплопроводности λ находят по значению теплового потока, выделяемого нагретой металлической нитью при постоянной температуре внешней (наружной) поверхности оболочки, в которую заключен газ (рис. 1).

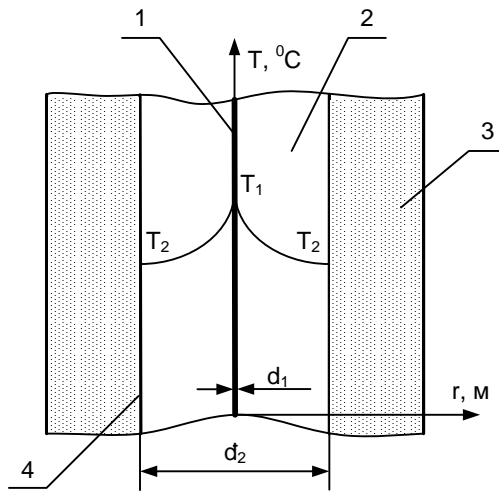


Рис. 1. Принципиальная схема реализации метода нагретой нити: 1 – металлическая нить; 2 – исследуемый газ; 3 – вода; 4 – стенка стеклянного баллона; T_1 , T_2 – температура на внутренней и внешней границе цилиндрического слоя газа; d_1 , d_2 – соответственно наружный диаметр нити и внутренний диаметр стеклянного баллона, в который заключен газ (внутренний и наружный диаметр цилиндрического слоя газа)

Тепловой поток в цилиндрической системе координат для стационарного режима теплопроводности (рис. 1) рассчитывают по формуле:

$$Q = \frac{\pi(T_1 - T_2)}{\frac{1}{2\lambda_{cp}} \ln \frac{d_2}{d_1}} L, \quad (3)$$

где T_1 – температура внутренней поверхности цилиндрического слоя газа, принимаемая равной температуре нагретой нити, $^{\circ}\text{C}$ (K); T_2 – температура наружной поверхности цилиндрического слоя газа, принимаемая постоянной и равной температуре жидкости, окружающей стеклянный баллон с исследуемым газом, $^{\circ}\text{C}$ (K); λ_{cp} – средний коэффициент теплопроводности газа в интервале температур ($T_2 \div T_1$), Вт/(м·K); L – длина участка теплопроводности, м; d_1 , d_2 – внутренний и наружный диаметр цилиндрического слоя газа, м.

Среднеинтегральное значение коэффициента теплопроводности в интервале температур ($T_2 \div T_1$) по определению рассчитывают по выражению:

$$\lambda_{cp} = \frac{\int_{T_2}^{T_1} \lambda(T) dT}{T_1 - T_2}. \quad (4)$$

Подставив формулу (4) в (3) и выразив искомую зависимость коэффициента теплопроводности от температуры, получим:

$$\int_{T_2}^{T_1} \lambda(T) dT = Q \frac{1}{2\pi L} \ln \frac{d_2}{d_1}. \quad (5)$$

При постоянной температуре T_2 (нижний предел интегрирования), дифференцируя уравнение (5) по T_1 , получим

основную расчетную формулу экспериментального метода нагретой нити:

$$\lambda(T_1) = \left(\frac{1}{2\pi L} \ln \frac{d_2}{d_1} \right) \frac{dQ}{dT_1} = D \frac{dQ}{dT_1}, \quad (6)$$

где D – постоянная лабораторного стенда, м^{-1} :

$$D = \frac{1}{2\pi L} \ln \frac{d_2}{d_1}. \quad (7)$$

Использование формулы (6) для экспериментального определения зависимости коэффициента теплопроводности от температуры возможно только в том случае, когда температура внешней оболочки газа (T_2) остается постоянной. Для выполнения этого условия стеклянный баллон с нагретой нитью окружен водой.

Температуру нагретой нити T_1 рассчитывают, используя линейную зависимость электрического сопротивления материала нити (вольфрам) от температуры:

$$R_k = R_0^0(1 + \alpha T_k) \quad (8)$$

и

$$R_1 = R_0^0(1 + \alpha T_1), \quad (9)$$

где R_k – электрическое сопротивление вольфрама при комнатной температуре, Ом; R_0^0 – электрическое сопротивление вольфрама при температуре $T = 0$ °С; α – температурный коэффициент сопротивления вольфрамовой проволоки, К^{-1} ; T_k – комнатная температура, °С; R_1 – электрическое сопротивление нагретой нити, Ом; T_1 – температура нагретой нити, °С.

Исключая из системы уравнений (8) – (9) величину R_0^0 , получим формулу для расчета температуры нагретой нити:

$$T_1 = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R_l}{R_k} - 1 \right) + \frac{R_l}{R_k} T_k. \quad (10)$$

Таким образом, для экспериментального определения коэффициента теплопроводности воздуха необходимо:

- в ходе эксперимента определить несколько значений температуры нити T_1 и теплового потока Q при различных значениях падения напряжения на вольфрамовой нити U_n ;
- аппроксимировать зависимость Q от T_1 аналитической зависимостью $Q = f(T_1)$;
- продифференцировать зависимость $Q = f(T_1)$ и по формуле (6) получить искомую зависимость коэффициента теплопроводности воздуха от температуры.

При этом если $Q = f(T_1)$ аппроксимировать линейной зависимостью:

$$Q(T_1) = aT_1 + b, \quad (11)$$

то коэффициент теплопроводности воздуха будет постоянной величиной, не зависящей от температуры нити:

$$\lambda(T_1) = D \frac{d}{dT_1} (aT_1 + b) = D \cdot a. \quad (12)$$

Если $Q = f(T_1)$ аппроксимировать полином второго порядка:

$$Q(T_1) = aT_1^2 + bT_1 + c, \quad (13)$$

то зависимость коэффициента теплопроводности воздуха от температуры будет линейной:

$$\lambda(T_1) = D \frac{d}{dT_1} (aT_1^2 + bT_1 + c) = D(aT_1 + b). \quad (14)$$

Достоинством *метода нагретой нити* является то обстоятельство, что при проведении эксперимента определя-

ется истинное значение коэффициента теплопроводности $\lambda(T_1)$ при контролируемой температуре T_1 .

Замечание. Зная тепловой поток Q и температуру на внутренней (T_1) и внешней (T_2) поверхности цилиндрической газовой оболочки можно, используя формулу (3), найти среднее значение коэффициента теплопроводности воздуха в интервале температур ($T_2 \div T_1$):

$$\lambda_{\text{ср}} = Q \frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi(T_1 - T_2)L}. \quad (15)$$

Этот метод определения среднего значения коэффициента теплопроводности называют «методом цилиндрического слоя».

Экспериментальная установка

Внешний вид экспериментальной установки показан на рис. 2. На передней панели **4** расположены тумблер питания установки **1**, универсальный вольтметр **2** типа МУ-67 с тумблером переключения **6** на измерение падения напряжения на вольфрамовой нити U_n и на образцовом сопротивлении U_0 , двухканальный измеритель температуры **3** типа 2ТРМО с тумблером включения **5**, подключенный к хромель-копелевой термопаре. Источник питания **ИП** включают тумблером **8**. Универсальный вольтметр подключен к рабочему участку экспериментальной установки через разъемы **V**. Необходимое падение напряжения на вольфрамовой нити задают регулятором **7**. Сбор и первичная обработка экспериментальных данных производят при помощи персонального компьютера **9**.

Рабочий участок экспериментальной установки показан на рис. 3 и включает в себя вольфрамовую нить **3** диаметром $d_1 = 0,14$ мм и длиной $L = 420$ мм, закрепленную вертикально

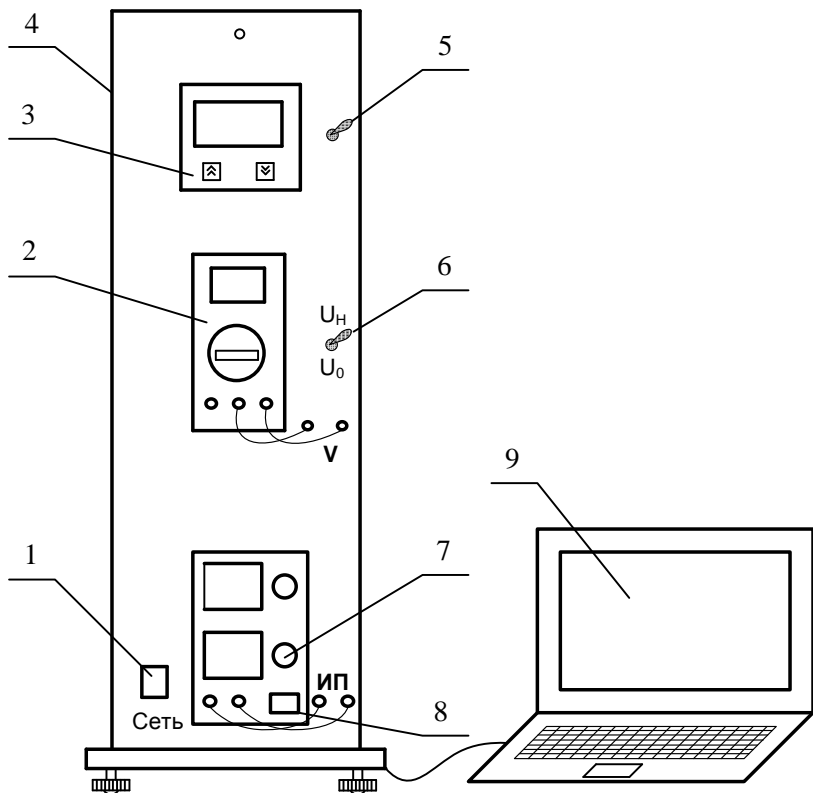


Рис.2. Экспериментальная установка (внешний вид):

1 – тумблер электропитания установки; 2 – универсальный вольтметр; 3 – двухканальный измеритель температуры; 4 – корпус лабораторной установки; 5 – тумблером включения измерителя температуры; 6 – тумблер для переключения вольтметра; 7 – регулятор падения напряжения на вольфрамовой нити; 8 – тумблер включения источника питания

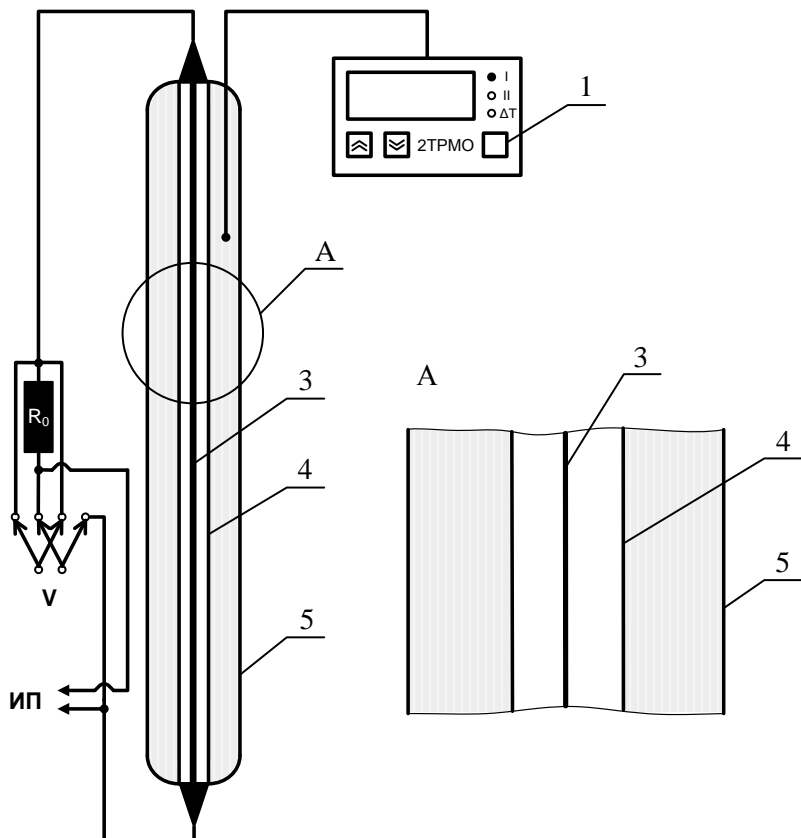


Рис. 3. Принципиальная схема рабочего участка экспериментальной установки:

- 1 – двухканальный измеритель температур типа 2ТРМО;
 2 – хромель-копелевая термопара; 3 – вольфрамовая нить; 4 –
 стеклянная колба с воздухом; 5 – стеклянная колба с водой

в стеклянном баллоне с двойными стенками **5**, между которыми находится вода. Во внутреннюю колбу **4**, наружный диаметр которой составляет $d_2 = 9$ мм, помещен исследуемый газ (воздух). Вольфрамовая нить подключена к источнику питания **ИП**. Последовательно с нитью в электрическую цепь включено образцовое сопротивление $R_0 = 1$ Ом, необходимое для определения силы тока I_n в цепи.

Температуру воды T_2 в стеклянном баллоне, окружающем нить, измеряют двухканальным измерителем температур **1** типа 2ТРМО, подключённым к хромель-копелевой термопаре **2**.

Для определения падения напряжения на нити U_n и на образцовом сопротивлении U_0 в цепь включается универсальный вольтметр **V**.

Окно программы для сбора и первичной обработки экспериментальных данных приведено на рис. 4.

Порядок проведения эксперимента

Внимание! Экспериментальную установку включает и выключает инженер или преподаватель!

1. Ознакомиться с устройством экспериментальной установки и окном программы сбора и первичной обработки экспериментальных данных. Изучить методику проведения эксперимента.

2. Подготовить журнал наблюдений.

3. О готовности к проведению эксперимента сообщить преподавателю.

4. Тумблером **5** (рис. 2) включить двухканальный измеритель температуры и зафиксировать в журнале наблюдений комнатную температуру T_k .

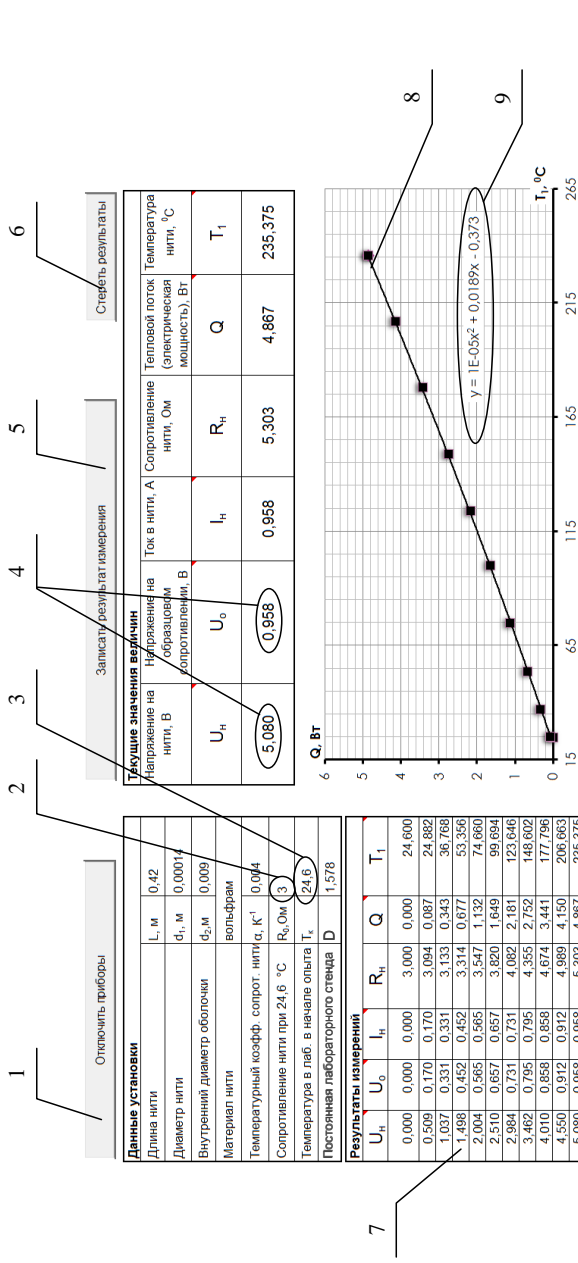


Рис. 4. Внешний вид окна программы для сбора и первичной обработки экспериментальных данных:
 1 – кнопка подключения программы к измерительным приборам лабораторного стенда; 2 – ячейка фиксации сопротивления нити в начале эксперимента; 3 – ячейка фиксации начальной температуры нити; 4 – ячейки записи текущего падения напряжения на вольфрамовой нити и на образцовом сопротивлении; 5 – кнопка записи экспериментальных данных; 6 – кнопка удаления экспериментальных данных; 7 – таблица экспериментальных данных; 8 – график зависимости теплового потока, выделяемого нагретой нитью, от ее температуры; 9 – уравнение аппроксимации зависимости $Q = f(T_1)$ полиномом второго порядка

5. Переключить универсальный вольтметр на измерение сопротивления (Ω), зафиксировать в журнале наблюдения значение сопротивления вольфрамовой нити R_k при комнатной температуре T_k .

6. Переключить универсальный вольтметр на измерение падения напряжения ($V=$), тумблер 6 (рис. 2) при этом должен находиться в положении U_n .

7. Тумблером 8 (рис. 2) включить источник питания. Занести в программу сбора данных начальное значение падения напряжения на вольфрамовой нити ($U_n = 0$ В) и, переключив тумблер 6 (рис. 2) в положение U_0 , начальное значение падения напряжения на образцовом сопротивлении ($U_0 = 0$ В). Нажатием клавиши «Записать результат измерения» зафиксировать текущие значения экспериментальных величин в таблице 7 (рис. 4).

8. Переключить тумблер 6 (рис. 2) в положение U_n и регулятором 7 (рис. 2) увеличить падение напряжения на вольфрамовой нити на $0,5 \div 1$ В. При достижении стационарного режима, который наступает приблизительно через 60 с, снова занести в программу сбора данных значения U_n и U_0 .

9. Эксперимент повторить 8-10 раз (см. п. 8) до достижения падения напряжения на вольфрамовой нити $U_n = 5$ В.

10. Сообщить преподавателю или инженеру о завершении эксперимента.

11. Оформить журнал наблюдений.

Журнал наблюдений

Лабораторную работу выполнил студент группы _____

_____ Дата _____

ФИО

Подпись

Выполнение работы подтверждаю _____

Подпись преподавателя/инженера

Температура вольфрамовой
нити при $U_n = 0$ В

$T_k =$ _____ $^{\circ}\text{C}$

Электрическое сопротивление
вольфрамовой нити при T_k

$R_k =$ _____ Ом

№	U_n , В	U_0 , В	№	U_n , В	U_0 , В
1			6		
2			7		
3			8		
4			9		
5			10		

Обработка результатов эксперимента

1. Рассчитать постоянную лабораторного стенда D по формуле (7):

$$D = \frac{1}{2\pi L} \ln \frac{d_2}{d_1}.$$

2. Для каждого значения падения напряжения U_n рассчитать тепловой поток, выделяемый нагретой нитью. В стационарном режиме тепловой поток от поверхности нити равен электрической мощности:

$$Q = N_{эл} = U_n \cdot I = U_n \cdot \frac{U_0}{R_0}, \quad (16)$$

где U_n – падение напряжения на вольфрамовой нити, В;
 U_0 – падение напряжения на образцовом сопротивлении, В;
 $R_0 = 1$ Ом – величина образцового сопротивления.

3. Для каждого значения падения напряжения U_n рассчитать температуру вольфрамовой нити T_1 по формуле (10). При этом значение электрического сопротивления нагретой нити равно:

$$R_1 = \frac{U_n}{I_n} = \frac{U_n}{U_0} R_0. \quad (17)$$

Температурный коэффициент сопротивления вольфрама равен $\alpha = 0,004$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

4. Построить в масштабе график зависимости теплового потока от температуры нагретой нити $Q = f(T_1)$.

5. Аппроксимировать зависимость $Q = f(T_1)$ полиномами первого и второго порядка. Для полинома первого порядка отметить на графике две точки, подставить значения Q и T_1 для этих точек в уравнения (11) и, решив систему из двух уравнений, определить коэффициенты a и b . Для полинома второго порядка отметить на графике три точки, подставить значения Q и T_1 для этих точек в уравнения (13) и, решив систему из трех уравнений, определить коэффициенты a , b и c .

6. Записать зависимости коэффициента теплопроводности воздуха от температуры нагретой нити в виде (12) и (14).

7. Сравнить экспериментальную зависимость коэффициента теплопроводности воздуха от температуры с данными из справочной литературы (табл. 1).

Таблица 1. Коэффициент теплопроводности сухого воздуха

$T, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	$T, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	$T, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	$T, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$
20	2,59	60	2,90	100	3,21	180	3,78
30	2,67	70	2,96	120	3,34	200	3,93
40	2,76	80	3,05	140	3,49	250	4,27
50	2,83	90	3,13	160	3,64	300	4,60

Контрольные вопросы

1. Дайте определение температурного поля. Назовите характеристики температурного поля.
2. Сформулируйте закон теплопроводности Фурье.
3. Что характеризует коэффициент теплопроводности?
4. Поясните принцип работы экспериментальной установки и назначение отдельных элементов установки.
5. Перечислите измерительные приборы и дайте характеристику измеряемых величин, указав единицы измерения.
6. Опишите порядок обработки экспериментальных данных для определения коэффициента теплопроводности.
7. С какой целью при проведении эксперимента необходимо достигать стационарного режима теплопроводности?
8. Напишите формулу расчета теплового потока через цилиндрический слой в стационарном режиме теплообмена.

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.