

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
ВОЗДУХА И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТЕПЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ ЕГО МОЛЕКУЛ**

Методические указания

**к лабораторной работе № 27
по дисциплине «Физика»**

Уфа 2012

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

Кафедра физики

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
ВОЗДУХА И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТЕПЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ ЕГО МОЛЕКУЛ

Методические указания

к лабораторной работе № 27
по дисциплине «Физика»

Уфа 2012

Составитель В.С. Осипов

УДК 534.023(07)

ББК 22.365(Я7)

Методические указания к лабораторной работе № 27 по дисциплине «Физика» «Определение коэффициента теплопроводности воздуха и кинематических характеристик теплового движения его молекул» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Сост. В.С. Осипов– Уфа, 2012, – 12 с.

В работе исследуется явление теплопроводности в газах. Определяется коэффициент теплопроводности воздуха, а также средняя длина свободного пробега и эффективный диаметр его молекул по данным косвенного измерения температуры нагретой спирали. Рассмотрены теория применяемого метода и принцип работы экспериментальной установки, дана методика выполнения измерений и расчетов, указана форма представления результатов.

Предназначены для студентов, изучающих дисциплину «Физика».

Ил. 2. Табл. 2. Библиогр.: 2 назв.

Рецензенты: канд. физ.-мат. наук, доцент Лазарев В.В.,
канд. тех. наук, доцент Тлявлин А.З.

©Уфимский государственный
авиационный технический университет, 2012

Содержание

Введение	4
1. Цель работы.....	4
2. Задачи.....	4
3. Теоретическая часть	4
4. Экспериментальная установка и принцип ее работы	8
5. Требования по технике безопасности	10
6. Задания.....	10
7. Методика выполнения заданий	10
8. Контрольные вопросы	11
9. Требования к содержанию и оформлению отчета	11
10. Критерии результативности выполнения лабораторной работы ..	12
Список литературы	12

Лабораторная работа № 27

Определение коэффициента теплопроводности воздуха и кинематических характеристик теплового движения его молекул

Введение

Теплообмен в газах может происходить разными способами, одним из которых является одно из явлений переноса – теплопроводность. В данной работе изучается теплопроводность воздуха. Рассматривается ее механизм в газах, закон теплопроводности (уравнение Фурье) и экспериментально находятся коэффициент теплопроводности воздуха и микропараметры теплового движения его молекул.

1. Цель работы

1. Изучение теплопроводности в газах.
2. Определение коэффициента теплопроводности воздуха, средней длины свободного пробега и эффективного диаметра его молекул.

2. Задачи

1. Закрепление знания явления теплопроводности и ее основного закона.
2. Определение коэффициента теплопроводности воздуха, средней длины свободного пробега и эффективного диаметра его молекул опытным путем.

3. Теоретическая часть

Процесс передачи энергии от одного тела к другому или от одной части тела другой, происходящий без совершения работы, называют теплопередачей или теплообменом, а передаваемую при этом энергию – количеством теплоты или просто теплотой. Этот процесс обусловлен различием температуры в различных областях тела или системы тел.

Различают три способа теплопередачи: теплопроводность, конвекцию и лучистый теплообмен.

Теплопроводностью называют перенос энергии в веществе из

областей с более высокой температурой в области с меньшей температурой, осуществляющийся в результате непосредственной передачи энергии теплового движения от частиц вещества (молекул, атомов, ионов, свободных электронов), обладающих большей энергией, частицам с меньшей энергией. При конвекции перенос энергии происходит за счет возникновения упорядоченности в движении большого числа частиц вещества, следствием чего является их направленное перемещение в пространстве. Конвекция наблюдается в газах, жидкостях и сыпучих средах. Лучистый теплообмен – это перенос энергии, обусловленных процессами испускания, распространения, рассеяния и поглощения электромагнитных волн.

Основным законом теплопроводности является закон Фурье, который можно записать в виде

$$dQ = -\alpha \frac{\partial T}{\partial x} dS dt, \quad (3.1)$$

где dQ – количество теплоты, переносимое за время dt в направлении оси x через площадку dS , расположенную перпендикулярно этой оси, $\frac{\partial T}{\partial x}$ – проекция вектора градиента

температуры на ось x , а α – коэффициент теплопроводности. Как видно из (3.1), его физический смысл заключается в том, что он равен количеству теплоты, переносимому в данном направлении за 1 с через перпендикулярно расположенную площадку площадью 1 м^2 при единичной проекции градиента температуры на ось вдоль взятого направления. Вектор градиента температуры T по определению градиента скалярной функции координат равен

$$\text{grad} T(x, y, z) = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{e}_y + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{e}_z, \quad (3.2)$$

где $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ – орты. Он направлен в сторону возрастания температуры. Теплота же переносится в сторону ее уменьшения, этим объясняется наличие минуса в (3.1).

Рассмотрим распространение тепла в газе, заключенном между двумя коаксиальными (соосными) цилиндрическими поверхностями протяженностью l , на которых поддерживается постоянная температура. Пусть на внутренней поверхности с радиусом r_1 , она

равна T_1 , а на внешней с радиусом $r_2 - T_2$. Если $T_1 > T_2$, то будет происходить стационарный, т.е. не меняющийся со временем, процесс передачи теплоты от внутренней поверхности в внешней. При $r_2 \ll l$ температура газа и модуль ее градиента в любой точке пространства между поверхностями будет зависеть только от одной переменной – расстояния между точкой и общей осью поверхностей, а сам вектор градиента во всех точках будет направлен вдоль радиальной прямой, перпендикулярной оси, в ее сторону (рис. 3.1).

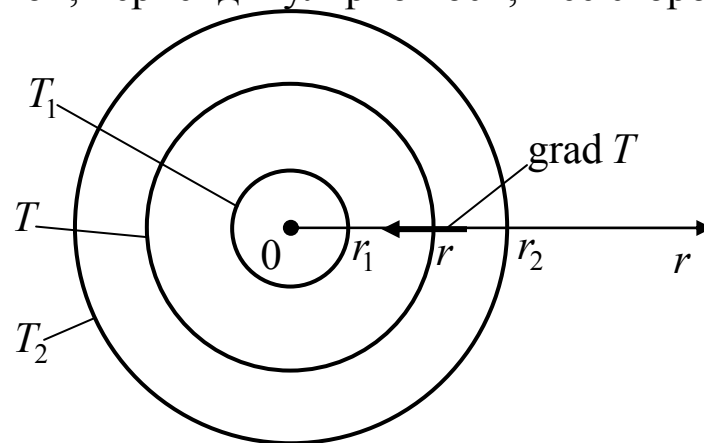


Рис. 3.1

В этом случае количество теплоты dQ , переносимое за время dt через некий участок dS произвольно взятой цилиндрической поверхности радиуса r ($r_1 < r < r_2$) с площадью S , соосной рассматриваемым, согласно закону Фурье будет равно

$$dQ = -\alpha \frac{dT}{dr} dS dt, \quad (3.3)$$

а тепловой поток (энергия, переносимая за 1 с через всю поверхность S)

$$q = \frac{dQ}{dt} = -\int_S \alpha \frac{dT}{dr} dS. \quad (3.4)$$

Так как производная $\frac{dT}{dr}$ для всех участков одна и та же, то

$$q = -\alpha \frac{dT}{dr} \int_S dS = -\alpha \frac{dT}{dr} S = -\alpha \frac{dT}{dr} 2\pi r l. \quad (3.5)$$

В стационарном режиме тепловой поток с течением временем не меняется. В таком случае переменные в уравнении (3.5) можно разделить

$$q \frac{dr}{r} = -2\pi l \alpha dT. \quad (3.6)$$

Проинтегрируем это уравнение

$$\int_{r_1}^{r_2} q \frac{dr}{r} = - \int_{T_1}^{T_2} 2\pi l \alpha dT. \quad (3.7)$$

Получим

$$q \ln \frac{r_2}{r_1} = 2\pi l \alpha (T_1 - T_2). \quad (3.8)$$

откуда

$$\alpha = \frac{q \ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi l (T_1 - T_2)}. \quad (3.9)$$

При $r_2 \ll l$ можно полагать, что для поддержания температуры внутренней поверхности постоянной исходящий от нее тепловой поток q равен мощности N , выделяемой нагревателем этой поверхности. Таким образом, зная геометрические размеры системы из двух достаточно длинных тонких коаксиальных трубок, подводимую к внутренней трубке мощность и разность температур их поверхностей в стационарном режиме подвода тепла, с помощью формулы (3.9) можно вычислить коэффициент теплопроводности газа, находящегося между трубками, а затем и кинематические характеристики теплового движения его молекул: их среднюю длину свободного пробега λ и эффективный диаметр d .

Из молекулярно-кинетической теории идеального газа следует, что

$$\lambda = \frac{3\alpha}{iP} \sqrt{\frac{\pi M T}{2R}}, \quad (3.10)$$

$$d = \sqrt{\frac{ik}{3\pi\alpha} \sqrt{\frac{RT}{\pi M}}}, \quad (3.11)$$

где i определяется числом степеней свободы молекул газа, P и M – его давление и молярная масса, $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ – газовая

постоянная, $k = 1,38 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – постоянная Больцмана.

В работе исследуемым газом является воздух, являющийся, как известно, смесью газов, состоящую в основном из азота и кислорода. Доля первого составляет $\approx 78\%$, второго – $\approx 22\%$. При таком составе молярная масса воздуха получается равной $29 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$. Молекулы азота и кислорода двухатомные. В условиях работы они остаются жесткими, т.к. при измеряемых температурах колебательное движение атомов в них не возбуждается. В этом случае $i = 5$ (сумме числа поступательных и числа колебательных степеней свободы двухатомной молекулы).

4. Экспериментальная установка и принцип ее работы

В установке имеется система из двух достаточно длинных стеклянных трубок разного диаметра с закрытыми торцами, соосно закрепленных на подставке. На внутреннюю трубку по всей ее длине намотана спираль из медной проволоки. При пропускании через спираль электрического тока она будет нагреваться до некоторой температуры, зависящей от силы тока. При не очень сильном нагревании температура внешней трубки будет мало отличаться от температуры охватывающей ее среды, т.е. от комнатной температуры воздуха в помещении. Выделяемая в спирали мощность по закону Джоуля-Ленца равна

$$N = I^2 R_c, \quad (4.1)$$

где R_c – сопротивление спирали. Оно изменяется с температурой по линейному закону

$$R_c = R_0(1 + \alpha t), \quad (4.2)$$

где R_0 – сопротивление при 0°C , α – температурный коэффициент сопротивления меди, равный $4,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, t – температура в градусах Цельсия. При комнатной температуре t_k сопротивление спирали равно

$$R_k = R_0(1 + \alpha t_k). \quad (4.3)$$

Из (4.2) и (4.3) находим разность температур поверхностей трубок ΔT

$$\Delta T = T_1 - T_2 = t - t_k = \frac{R_c - R_k(1 + \alpha t_k)}{\alpha R_k}. \quad (4.4)$$

В установке предусмотрена возможность изменения

сопротивления спирали с помощью мостовой схемы, собранной в комплексе с питающимися от сети источником постоянного тока и пультом управления в одном функциональном блоке.

Электрическая схема установки изображена на рис. 4.1, на котором ИПТ – источник постоянного тока, мА – миллиамперметр, Г – нуль-гальванометр, R_c – спираль, R_m – магазин сопротивлений, R_1 и R_2 – сопротивления.

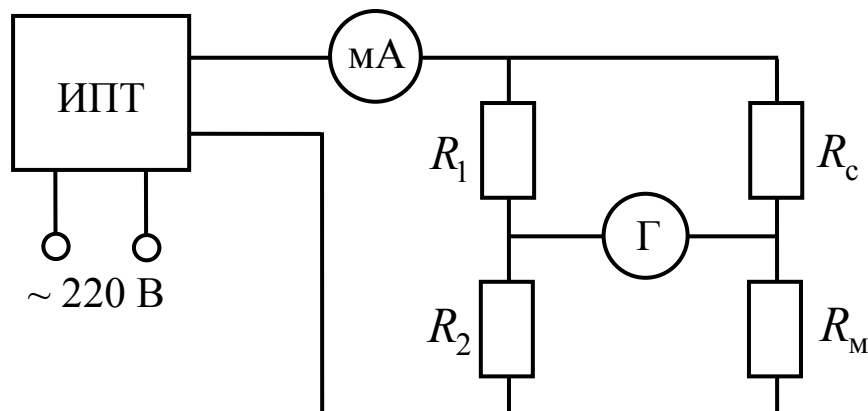


Рис. 4.1

Сопротивления R_1 и R_2 моста подобраны так, что сила тока через спираль в два раза меньше силы тока I_A через миллиамперметр. Принимая во внимание это обстоятельство и (4.1), для стационарного режима работы установки, в котором $q = N$, формула (3.9) преобразуется к виду

$$\alpha = \frac{I_A^2 R_c \ln \frac{r_2}{r_1}}{8\pi l \Delta T}. \quad (4.5)$$

Необходимо отметить, что при прохождении тока через мост сопротивления R_1 , R_2 и магазина наряду со спиралью тоже будут нагреваться. Однако изменениями этих сопротивлений в нашем случае можно пренебречь, т.к. температурный коэффициент сопротивления материалов, из которых они изготовлены, намного меньше, чем у меди.

Создаваемая в системе трубок разность температур не превышает 10 К, что исключает возникновение конвекционных потоков в воздухе между ними.

5. Требования по технике безопасности

1. Прежде чем приступить к измерениям, внимательно ознакомьтесь с установкой и порядком проведения измерений.

2. Обязательно проверьте соединение и изоляцию проводов, идущих к спирали.

3. Не оставляйте без присмотра включенную установку. По окончании измерений ручку регулировки тока поверните влево до упора и выключите установку.

6. Задания

1. Измерить сопротивление спирали при пяти различных значениях текущего через нее тока.

2. Вычислить разность температур поверхностей трубок при разных сопротивлениях спирали.

3. Рассчитать коэффициент теплопроводности воздуха и относительную ошибку полученного значения.

4. Вычислить среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр его молекул.

7. Методика выполнения заданий

1. Убедитесь, что ручка регулировки силы тока через миллиамперметр повернута против часовой стрелки до упора. Включите установку и дайте прогреться спирали 5-6 минут, чтобы установился стационарный режим передачи тепла. После этого, вращая декады магазина сопротивлений (начиная с десятков Ом), добейтесь нулевого значения тока через гальванометр. Сопротивление магазина при этом будет практически равно сопротивлению спирали R_k при комнатной температуре t_k , т.к. в этом случае ток I_k через спираль настолько мал, что нагреванием ее можно пренебречь. Запишите измеренное значение R_k .

2. Поворачивая ручку регулировки тока вправо, установите максимально возможный ток I_{max} . Выждав опять 5-7 минут, измерьте сопротивление спирали при этом токе, пользуясь магазином сопротивлений так же, как и при токе I_k .

3. Аналогичным образом измерьте сопротивление спирали при трех равностоящих друг от друга значениях тока в интервале от I_k до I_{max} . После установок каждого из них измерение проводите по

прошествии 5-6 минут, необходимых для установки стационарного режима теплообмена.

4. Для всех токов по формулам (4.4) и (4.5) вычислите ΔT и α , а затем среднее значение $\alpha_{\text{ср}}$ и его относительную погрешность.

5. Определите температуру $t_{\text{к}}$ и давление P воздуха в лаборатории по находящимся в ней термометру и барометру.

6. Подставляя значения $\alpha_{\text{ср}}$, P и $T_{\text{к}} = t_{\text{к}} + 273$ в (3.10) и (3.11), рассчитайте λ и d .

8. Контрольные вопросы

1. Что называют теплообменом? Количеством теплоты?
2. Какими способами может происходить теплопередача?
3. Что такое теплопроводность?
4. Сформулируйте закон Фурье.
5. Что такое тепловой потока?
6. Что представляет собой градиент температуры? Как он направлен?
7. Что называют средней длиной свободного пробега молекул и их эффективным диаметром?
8. Какова теоретическая основа применяемого в работе метода?

9. Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет должен содержать:

1. Номер, название и цель работы.
2. Теоретическую основу метода и расчетные формулы.
3. Электрическую схему установки.
4. Данные измерений и вычисления.
5. Результаты измерений и расчетов, представленные в форме табл. 1 и 2.
6. Заключение по итогам работы.

Таблица 1

N	I , мА	$R_{\text{с}}$, Ом	ΔT , К	α , $\frac{\text{мВт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
1	$I_{\text{к}}$	$R_{\text{к}}$		
2				
3				
4				
5				
	I_{max}			

Таблица 2

T_k, K	$P, \text{кПа}$	$\alpha_{\text{ср}}, \frac{\text{мВт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\delta \alpha, \%$	$\lambda, \text{мкм}$	$d, \text{нм}$

10. Критерии результативности выполнения лабораторной работы

1. Знание понятий теплообмена, его способов, закона Фурье, теплового потока, градиента температуры и теории используемого в работе метода определения коэффициента теплопроводности.
2. Правильность выполнения измерений и вычислений.
3. Достоверность полученных результатов.
4. Соответствие отчета предъявляемым к нему требованиям.

Список литературы

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. Т. 1. – СПб.: Издательство «Лань», 2007. – С. 261, 269-273, 281-285.
2. *Детлаф А.А., Яворский Б.М.* Курс физики. – М.: Academia, 2008. – 1. С. 96, 97, 114-120.

Составитель ОСИПОВ Валерий Сергеевич

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
ВОЗДУХА И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТЕПЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ ЕГО МОЛЕКУЛ

Методические указания

к лабораторной работе № 27
по дисциплине «Физика»

Подписано в печать 2012. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Печать плоская. Гарнитура Nimes New Roman Cyt.

Усл. печ. л. 1,1. Усл.-кр.-отт. 1,1. Уч-изд.л. 0,9.

Тираж 300 экз. Заказ №

ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный
технический университет

Редакционно-издательский комплекс УГАТУ

450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12