

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА МЕТОДОМ НАГРЕТОЙ НИТИ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве методических указаний к лабораторной работе № 1-42*

САМАРА
Издательство СГАУ
2012

УДК 53(075)
ББК 22.313

Составители: *Н.М.Рогачев, С.И. Гусева*

Рецензент В.В. Б и р ю к, доктор технических наук, профессор

Измерение коэффициента теплопроводности воздуха методом нагретой нити: метод. указания к лаб. работе 1-42 / *Сост. Н.М.Рогачев, С.И. Гусева* – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – 16 с.

Содержат методические и инструктивные материалы, необходимые для выполнения лабораторной работы по измерению коэффициента теплопроводности воздуха методом нагретой нити. Приводится краткая теория и дается методика определения теплопроводности. Приведена схема экспериментальной установки и порядок выполнения работ, методика обработки полученных результатов; контрольные вопросы, список рекомендуемой литературы.

Предназначены для студентов всех факультетов.

УДК 53(075)
ББК 22.313

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2012

Лабораторная работа 1-42

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА МЕТОДОМ НАГРЕТОЙ НИТИ

Цель работы: изучение явления теплопроводности воздуха.

Приборы и принадлежности: установка ФПТ 1-3.

1. ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

Распространение теплоты в газах осуществляется тремя способами: тепловым излучением – переносом энергии электромагнитными волнами; конвекцией – переносом энергии за счет перемещения слоев газа в пространстве из областей с более высокой температурой в области с низкой температурой; теплопроводностью.

Теплопроводность – это процесс передачи теплоты от более нагретого слоя газа к менее нагретому слою за счет хаотического теплового движения молекул. При теплопроводности осуществляется непосредственная передача энергии от молекул с большей энергией к молекулам с меньшей энергией. Для стационарного процесса, при котором разность температур в слое газа не изменяется со временем, количество теплоты Q , которое переносится вследствие теплопроводности за время dt через поверхность площадью S , перпендикулярную к направлению переноса энергии, в направлении уменьшения температуры, определяется по закону Фурье:

$$Q = -\chi \cdot d\tau \cdot S \cdot dT/dr, \quad (1)$$

где χ – коэффициент теплопроводности;
 dT/dr – градиент температуры.

Согласно МКТ для идеального газа

$$\chi = \rho \langle \lambda \rangle \langle v \rangle c_v / 3, \quad (2)$$

здесь ρ – плотность газа;

$\langle \lambda \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекулы;

$\langle v \rangle = \sqrt{8RT/(\pi\mu)}$ – средняя арифметическая скорость теплового движения молекул;

c_v – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме.

Рассмотрим два коаксиальных цилиндра, пространство между ними заполнено газом, коэффициент теплопроводности которого χ надо измерить. Если внутренний цилиндр нагревать, а температуру наружного цилиндра поддерживать постоянной, ниже температуры нагревателя, то в кольцевом слое газа возникнет радиальный поток теплоты, направленный от внутреннего цилиндра к внешнему. При этом температура слоев газа, прилегающих к стенкам цилиндров, равна температуре стенок.

Количество теплоты, прошедшее за одну секунду через цилиндрический слой газа, можно определить с помощью *закона Фурье* (1).

На рис. 1 показано поперечное сечение этих цилиндров. В качестве внутреннего цилиндра служит натянутая металлическая нить. Температуры поверхностей и радиусы внешнего цилиндра и внутреннего цилиндра (нити) соответственно обозначим: T_1 , r_1 и T_2 , r_2 .

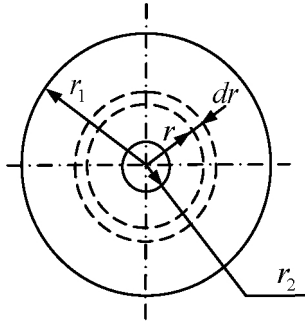


Рис. 1

При атмосферном давлении температура слоя газа, прилегающего к стенкам, равна температуре стенок. Следовательно, температура слоя газа, прилегающего к нити, соответствует T_2 , а прилегающего к стенке цилиндра – T_1 .

Выделим внутри газа кольцевой слой радиусом r , толщиной dr и длиной L . По закону Фурье (1) тепловой поток Q , т.е. количество теплоты, проходящее через этот слой за одну секунду, можно записать в виде

$$Q = -\chi \frac{dT}{dr} S = -\chi \frac{dT}{dr} \cdot 2\pi r L, \quad (3)$$

Это уравнение можно решить методом разделения переменных:

$$\frac{dr}{r} = -\frac{2\pi\chi L}{Q} dT, \quad (4)$$

Полагая $\chi = const$ в исследуемом диапазоне температур и интегрируя обе части уравнения (4), получаем

$$\int_{r_2}^{r_1} \frac{dr}{r} = -\frac{2\pi\chi L}{Q} \int_{T_2}^{T_1} dT,$$

откуда

$$\ln(r_2/r_1) = \frac{2\pi\chi L}{Q}(T_2 - T_1) \quad (5)$$

Из (5) находим формулу для определения коэффициента теплопроводности

$$\chi = \frac{Q \ln(r_1/r_2)}{2\pi L \cdot \Delta T}, \quad (6)$$

где χ – коэффициент теплопроводности исследуемого газа, отнесенный к средней температуре этого газа;

$\Delta T = T_2 - T_1$ – разность температур в слое газа.

Таким образом, для определения коэффициента теплопроводности необходимо знать разность температур в слое газа и величину теплового потока Q .

В экспериментальной установке тепловой поток Q создается путем нагрева нити (вольфрамовой проволоки длиной $l = (402 \pm 1)$ мм) постоянным током и определяется по формуле:

$$Q = I^2 R_n = \frac{U_p \cdot U_n}{R_p}, \quad (7)$$

где U_n – падение напряжения на нити;

U_p – падение напряжения на эталонном резисторе;

R_p – сопротивление эталонного резистора, $R_p = 10$ Ом.

Разность температур нити и трубки $\Delta T = T_H - T_T$, где T_H – температура нити, T_T – температура трубки, равная температуре окружающего воздуха.

Температура трубки в процессе эксперимента принимается постоянной, т.к. ее поверхность обдувается с помощью вентилятора потоком воздуха.

Температура нити тем выше, чем больше протекающий по ней ток. С повышением температуры меняется сопротивление нити, из-

меряемое методом сравнения падений напряжений на нити и на эталонном резисторе. Разность температур нити и трубки определяется по формуле:

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{U_n}{U_p} - \frac{U_{n_0}}{U_{p_0}} \right) \cdot (1 + \alpha t)}{\frac{U_{n_0}}{U_{p_0}} \cdot \alpha}, \quad (8)$$

где U_n – падение напряжения на нити в нагретом состоянии;

U_{n_0} – падение напряжения на нити при температуре окружающего воздуха (при рабочем токе не более 10 мА);

U_p – падение напряжения на эталонном резисторе при нагреве нити;

U_{p_0} – падение напряжения на эталонном резисторе при температуре окружающего воздуха;

α – температурный коэффициент сопротивления;

t – температура воздуха в $^{\circ}\text{C}$.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для определения коэффициента теплопроводности воздуха используется экспериментальная установка ФПТ-3, схема которой приведена на рис. 2.

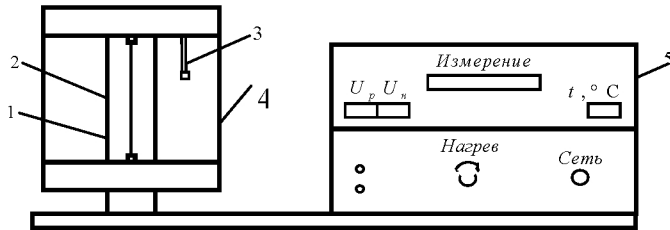


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Рабочий элемент состоит из стеклянной трубки 1, заполненной воздухом, по оси которой натянута тонкая вольфрамовая проволока 2. В течение эксперимента температура трубки поддерживается постоянной, что обеспечивается принудительной циркуляцией воздуха с помощью вентилятора между трубкой и кожухом рабочего элемента 4. Для измерения температуры трубки предназначен полупроводниковый термометр 3.

Узел «Измерение» 5 осуществляет замер падения напряжения на эталонном резисторе U_p , падение напряжения на нити U_n , а также замер температуры окружающего воздуха t °C.

Узел «Нагрев» осуществляет включение и регулирование нагрева нити. Подключение установки к сети питающего напряжения осуществляется с помощью выключателя «Сеть».

Геометрические размеры рабочего элемента: внутренний диаметр трубки $D=(26\pm 1)\text{мм}$, диаметр нити $d = 64 \cdot 10^{-5}\text{м}$, длина трубки

$l=(402\pm 1)\text{мм}$, а также температурный коэффициент сопротивления материала нити (вольфрама) $\alpha = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$.

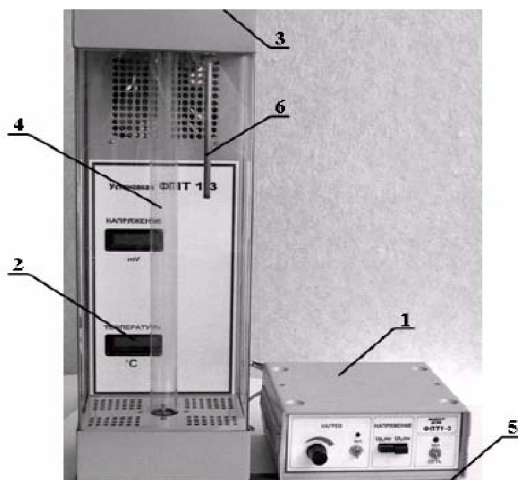


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки ФПТ1-3.

1 – блок приборов, 2 – цифровой термометр, 3 – блок рабочего элемента, 4 – вольфрамовая проволока, 5 – стойка, 6 – датчик температуры (термопара).

Общий вид экспериментальной установки показан на рис. 3. Рабочий элемент установки 3 представляет собой стеклянную вертикально расположенную трубку, заполненную воздухом, вдоль оси трубки натянута вольфрамовая проволока 4. Температура воздуха вокруг трубки измеряется датчиком температуры 6 и регистрируется цифровым термометром. На передней панели блока приборов 1 установлен цифровой вольтметр, с помощью которого измеряется падение напряжения на эталонном резисторе U_p и на проволоке U_n . Значение напряжения на проволоке устанавливается регулятором «Нагрев», расположенном в блоке приборов 1.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включите установку тумблером «Сеть». Включите тумблер «Нагрев».

2. Нажмите кнопку U_p и установите рукояткой «Нагрев» падение напряжения на эталонном резисторе $U_p = 1,5$ В.

3. Подождите две минуты для стабилизации теплового режима рабочего элемента и нажмите кнопку U_n , чтобы определить падение напряжения на нити U_n .

4. Повторите измерения по пунктам 2-3 для следующих значений падений напряжений: $U_p = 2,5; 3,5; 4,5; 5,5; 6,5$ В. Результаты занесите в табл. 1.

5. После измерений выведите ручку «Нагрев» в крайнее левое положение. Отключите тумблер «Нагрев», после чего отключите установку тумблером «Сеть».

6. Рассчитайте разность температур по формуле (8) и определите коэффициент теплопроводности по формуле:

$$\chi = \frac{Q \ln(D/d)}{2\pi l \Delta T} = \frac{QA}{\Delta T}, \quad (9)$$

где D – внутренний диаметр трубки;

d – диаметр нити;

l – длина нити,

$$A = \frac{\ln \frac{D}{d}}{2\pi \cdot l} = 1,467 \frac{1}{m}.$$

Значения величин U_{p0} и U_{n0} даны в табл. 1.

7. Для каждого режима рассчитайте коэффициент теплопроводности воздуха χ по формуле (9) и занесите полученные значения в табл. 1.

8. Выключите установку тумблером «Сеть».

Таблица 1

№ п/п	$U_{po},$ мВ	$U_{no},$ мВ	$t_0,$ °C	$U_p,$ В	$U_{n,},$ В	$\Delta T,$ К	Q, Дж	$\chi,$ Вт/(м·К)
1	42,6	15,7						
2								
3								
4								
5								
6								

4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Найдите среднее арифметическое значение коэффициента теплопроводности воздуха $\langle \chi \rangle = \sum \chi_i / n$, где n – число измерений.

2. Оцените абсолютную случайную погрешность отдельных измерений $\Delta \chi_i = \langle \chi \rangle - \chi_i$.

3. Вычислите среднюю квадратичную погрешность:

$$S_{\langle \chi \rangle} = \sqrt{\sum (\Delta \chi_i)^2 / (n-1) \cdot n}.$$

4. Определите границы доверительного интервала: $\Delta \chi = t_{\alpha, n} \cdot S_{\langle \chi \rangle}$. Для нахождения $t_{\alpha, n}$ используйте таблицы коэффициентов Стьюдента. Доверительную вероятность α примите равной 0,95.

5. Запишите результаты измерений в виде:

$$\chi = \langle \chi \rangle \pm \Delta \chi; n = 6, \alpha = 0,95.$$

6. Определите относительную погрешность измерений коэффициента теплопроводности воздуха.

7. Проведите сравнение полученного результата с табличным значением $\chi = 0,0262$ Вт/(м·К), приведенным для температуры воздуха $T = 300$ К.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите возможные способы передачи теплоты.
2. В чем заключается сущность явления теплопроводности? Какая величина переносится при теплопроводности?
3. Какая величина называется тепловым потоком? В каких единицах она измеряется?
4. Какой формулой описывается поток теплоты, перенесенный при теплопроводности?
5. Какой физический смысл коэффициента теплопроводности? В каких единицах измеряется эта величина?
6. Напишите формулу для коэффициента теплопроводности идеального газа.
7. Объясните понятие градиента температуры.
8. В чем заключается метод нагретой нити для определения коэффициента теплопроводности газов?
9. Выведите расчетную формулу для определения коэффициента теплопроводности методом нагретой нити.
10. Как определяется разность температур проволоки и наружной трубки в данной работе?
11. Как оценить среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр молекул газа, используя явление теплопроводности?
12. Как зависит от температуры и давления коэффициент теплопроводности газа?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев, И.В. Курс физики: в 3-х т. Т.1./ И.В. Савельев. – М., 1989.
2. Матвеев, А.Н. Молекулярная физика / А.Н. Матвеев. – М., 1987.
3. Кикоин, И.К. Молекулярная физика / И.К. Кикоин, А.К. Кикоин. – М., 1976.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Вводная часть	3
2. Экспериментальная установка	8
3. Порядок выполнения работы	10
4. Обработка результатов измерений	12
5. Контрольные вопросы.....	13
Список использованной литературы	14

Учебное издание

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА МЕТОДОМ НАГРЕТОЙ НИТИ

*Методические указания
к лабораторной работе № 1-42*

Составители: ***Николай Михайлович Розачев
Светлана Ивановна Гусева***

Редактор И.И. Спиридонова
Вёрстка - И.И. Спиридонова

Подписано в печать 02.011.2012. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ . Арт. М30/2012.

Самарский государственный аэрокосмический университет.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.