

ПЕРВОЕ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ РОССИИ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра общей и технической физики

**ОТЧЕТ**

по лабораторной работе № 17

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГАЗА  
МЕТОДОМ НАГРЕТОЙ НИТИ

Автор: студент гр. \_\_\_\_\_ (Шифр группы) \_\_\_\_\_ (подпись) \_\_\_\_\_ (ФИО)

Дата: \_\_\_\_\_

Проверил: \_\_\_\_\_ (подпись) \_\_\_\_\_ (ФИО)

Санкт-Петербург

2022

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

определить коэффициент теплопроводности воздуха методом нагретой нити при атмосферном давлении и различных температурах поверхности вертикальной цилиндрической трубки

## КРАТКОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Явление, изучаемое в работе: явление переноса энергии между молекулами газов (явление теплопроводности)

Нарушение равновесия приводит к переносу из одних мест среды в другие вещества (диффузия), импульса (вязкость), энергии или тепла (теплопроводность). Эти явления носят название *явлений переноса*.

Интенсивность процесса характеризуется потоком той или иной величины.

*Поток* любой физической величины - это её количество, переносимое в единицу времени через воображаемую поверхность, перпендикулярно направлению переноса.

*Плотностью потока* физической величины называется ее количество, переносимое в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярно направлению переноса.

*Коэффициент теплопроводности* - физическая величина, характеризующая и численно равная плотности потока энергии при градиенте температуры равном единице.

*Закон теплопроводности Фурье*: вектор плотности теплового потока, передаваемого теплопроводностью, пропорционален вектору градиента температуры

$$\bar{q} = -\chi \text{grad}T,$$

где  $\chi$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{grad}T$  – градиент температуры.

*Метод нагретой нити*. Метод применяется для изучения процессов теплообмена в лабораторных условиях. Нить представляет собой проволоку, натянутую вдоль оси вертикального цилиндра. Нить цилиндра нагревается электрическим током  $I$ . После того как устанавливается стационарный режим, температура нити перестанет

изменяться. Выделяющееся при этом тепло полностью отдается в окружающую среду.

Закон Джоуля-Ленца: количество тепла, выделившегося в проводнике при прохождении по нему тока, определяется по формуле

$$Q = I^2 R,$$

где  $Q$  – поток тепла,  $I$  – сила тока,  $R$  – сопротивление

Сопротивление нити:

$$R = \rho \frac{4l}{\pi d^2},$$

где  $\rho$ ,  $l$ ,  $d$  – удельное сопротивление, длина и диаметр нити

Зависимость электрического сопротивления от температуры:

$$R = R_0 + \alpha R_0 \Delta t,$$

где  $\alpha$  – коэффициент температурного сопротивления,  $\Delta t$  – разность температур у поверхностей проволоки  $T_r$  и цилиндра  $T_R$

## ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

Поток тепла, переносимый воздухом с проволоки:

$$Q = R \left( \frac{10}{11} I \right)^2,$$

где  $Q$  – поток тепла,  $[Q] = \text{Вт}$ ,

$R$  – сопротивление,  $[R] = \text{Ом}$ ,

$I$  – сила тока,  $[I] = \text{А}$ .

Температура поверхности проволоки:

$$T_r = T_{\text{окр}} + \frac{R - R_0}{R_0 * \alpha},$$

где  $T_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды (воздуха),  $[T_{\text{окр}}] = \text{К}$ ,

$R$  – сопротивление,  $[R] = \text{Ом}$ ,

$R_0$  – сопротивление проволоки при комнатной температуре,  $[R_0] = \text{Ом}$ ,

$\alpha$  – коэффициент температурного сопротивления,  $\alpha = 4,6 * 10^{-3} \text{ Ом/град}$ .

Коэффициент теплопроводности:

$$\chi = \frac{Q}{2 \pi l (T_r - T_R)} * \ln \frac{r_R}{r_r},$$

где  $Q$  – поток тепла,  $[Q] = \text{Вт}$ ,

$l$  – длина цилиндра,  $[l] = \text{м}$ ,

$T_r$  – температура газа у поверхности цилиндра,  $[T_r] = \text{К}$ ,

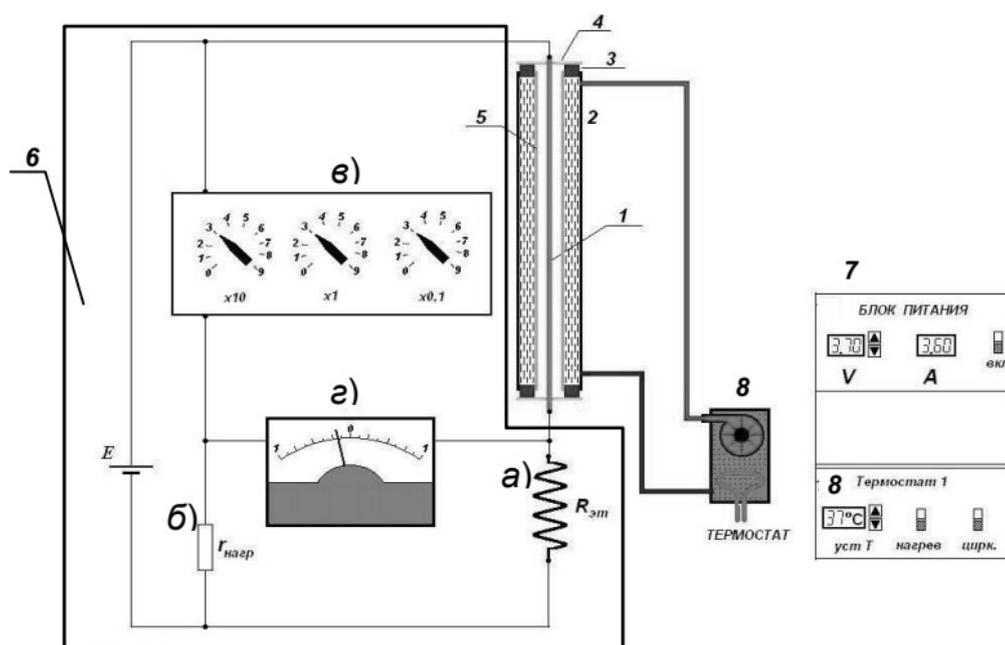
$T_R$  – температура газа у поверхности нити,  $[T_R] = \text{К}$ ,

$r_R$  – радиус цилиндра,  $[r_R] = \text{м}$ ,

$r_r$  – радиус нити,  $[r_r] = \text{м}$ ,

$\chi$  – коэффициент теплопроводности,  $[\chi] = \frac{\text{Вт}}{\text{м} * \text{К}}$ .

## СХЕМА УСТАНОВКИ



Вертикальная цилиндрическая трубка длиной  $l$  с двойными стенками и с натянутой внутри проволокой; магазин сопротивлений; эталонное  $R_{\text{ст}} = 3,5$  Ом и нагрузочное  $r_{\text{н}} = 35$  Ом сопротивление; гальванометр; источник питания; термостат.

Нить 1 (проволока) натянута между упорами 3, 4 внутри трубки 2. Трубка 5 имеет двойные стенки, между которыми циркулирует вода с заданной температурой. Температура стенок трубки поддерживается термостатом 8, который управляется с пульта управления с надписью "8 термостат 1". Нить 1 включена в схему измерительного моста Уинстона 6, состоящего из эталонного а) и нагрузочного б) сопротивлений, магазина сопротивлений в) и гальванометра г). Параметры моста подобраны таким образом, что при балансе моста сопротивление магазина сопротивлений в 10 раз больше сопротивления нити. Вся схема подключена к источнику питания  $E$ , параметры которого задаются с пульта 7.

## ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОГРЕШНОСТЕЙ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Коэффициент теплопроводности:

$$\Delta \chi = \sqrt{\left(\frac{\delta \chi}{\delta R} \cdot \Delta R\right)^2 + \left(\frac{\delta \chi}{\delta I} \cdot \Delta I\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{R_0 \cdot \alpha \cdot \left(\frac{10}{11} \cdot I\right)^2}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (R - R_0)^2} \cdot \ln\left(\frac{r_R}{r_r}\right) \cdot \Delta R\right)^2 + \left(\frac{R_0 \cdot \alpha \cdot R \cdot \left(\frac{10}{11}\right)^2 \cdot I}{\pi \cdot l \cdot (R - R_0)} \cdot \ln\left(\frac{r_R}{r_r}\right) \cdot \Delta I\right)^2}$$

где  $R$  – значение результата измерения сопротивления,  $[R] = \text{Ом}$ ,

$\Delta R$  – приборная погрешность сопротивления,  $[\Delta R] = \text{Ом}$ ,

$R_0$  – сопротивление проволоки при комнатной температуре,  $[R_0] = \text{Ом}$ ,

$I$  – значение результата измерения силы тока,  $[I] = \text{А}$ ,

$\Delta I$  – приборная погрешность силы тока,  $[\Delta I] = \text{А}$ ,

$l = 0,5 \text{ м}$  – длина проволоки,

$\alpha = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/град}$  – коэффициент температурного коэффициента,

$r_r = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$  – радиус проволоки,

$r_R = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  – радиус внутренней стенки цилиндра.

### Исходные данные:

$l = 0,5 \text{ м}$  – длина проволоки,

$\alpha = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/град}$  – коэффициент температурного коэффициента,

$r_r = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$  – радиус проволоки,

$r_R = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  – радиус внутренней стенки цилиндра.

$T_{\text{окр}} = 293 \text{ К}$

### Погрешности прямых измерений:

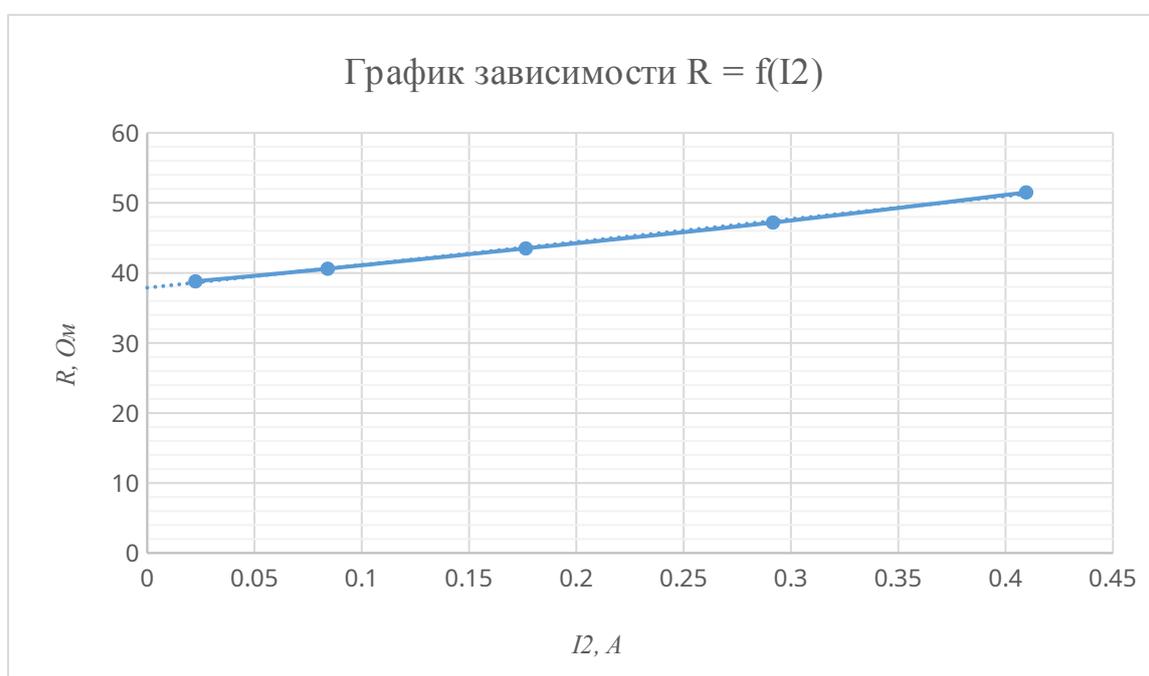
$\Delta R = 0,05 \text{ Ом}$ ,

$\Delta I = 0,01 \text{ А}$ ,

$\Delta T = 1 \text{ К}$ .

## Результаты измерений

Физическая величина	$T_{окр}$	$U$	$I$	$R$
	$K$	$B$	$A$	$Ом$
1	293	1	0,15	38,8
2		2	0,29	40,6
3		3	0,42	43,5
4		4	0,54	47,2
5		5	0,64	51,5



$R_0 = 38 \text{ Ом}$  – сопротивление проволоки при комнатной температуре

**Результаты измерений и вычислений зависимости  
сопротивления проволоки от протекающего тока**

	$T_R$	$U$	$I$	$R$	$Q$	$T_r$	$T_{cp}$	$\chi$
	°C	$B$	$A$	$Ом$	$Bm$	$K$	$K$	$Bm/$ $m*K$
1	20	1	0,15	38,8	0,72	297,58	295,29	0,220
		3	0,42	43,5	6,34	324,46	308,73	0,281
		5	0,64	51,5	17,43	370,23	331,62	0,315
		7	0,8	61,4	32,48	426,87	359,93	0,339
		9	0,92	72,1	50,43	488,08	390,54	0,361
		11	1,03	83	72,77	550,44	421,72	0,394
		13	1,11	93,8	95,51	612,22	452,61	0,418
2	40	1	0,15	40	0,74	304,44	298,72	0,091
		3	0,41	44,9	6,24	332,47	312,74	0,221
		5	0,62	53,2	16,90	379,96	336,48	0,271
		7	0,79	63	32,49	436,02	364,51	0,317
		9	0,91	73,5	50,30	496,09	394,54	0,346
		11	1,01	84,2	70,99	557,30	425,15	0,375
		13	1,1	95	95,00	619,09	456,04	0,407
3	60	1	0,14	42,2	0,68	317,03	305,01	0,040
		3	0,4	46,9	6,20	343,92	318,46	0,170
		5	0,61	54,8	16,85	389,11	341,05	0,245
		7	0,77	64,4	31,56	444,03	368,51	0,292
		9	0,9	74,8	50,07	503,53	398,26	0,332
		11	1	85,4	70,58	564,17	428,58	0,363
		13	1,09	96,1	94,36	625,38	459,19	0,396
4	80	1	0,14	44,5	0,72	330,19	311,59	0,027
		3	0,39	49,1	6,17	356,50	324,75	0,136
		5	0,6	56,7	16,87	399,98	346,49	0,220
		7	0,76	66,1	31,55	453,76	373,38	0,274
		9	0,89	76,3	49,95	512,11	402,55	0,318
		11	0,99	86,8	70,31	572,18	432,59	0,351
		13	1,08	97,3	93,79	632,24	462,62	0,386

### ПРИМЕР РАСЧЕТА:

Поток тепла:  $Q = R \left( I \frac{10}{11} \right)^2 = 38,8 * (0,15 * 10/11)^2 = 0,72 \text{ Вт}$

Температура поверхности проволоки:  $T_r = T_{окр} + \frac{R - R_0}{R_0 * \alpha} = 293,15 + (38,8 - 38) / (38 * 4,6 * 10^{-3}) = 297,73 \text{ К}$

Среднеарифметическая температура:  $T_{cp} = \frac{T_r + T_{окр}}{2} = (297,73 + 293,15) / 2 = 295,44 \text{ К}$

Коэффициент теплопроводности:  $\chi = \frac{Q * \ln \frac{r_R}{r_r}}{2 \pi l (T_r - T_{окр})} = 0,72 * \ln (4 * 10^{-3} / 5 * 10^{-5}) / (2 * 3,14 * 0,5 * (297,73 - 293,15)) = 0,22 \frac{\text{Вт}}{\text{м} * \text{К}}$

Погрешность коэффициента теплопроводности:

$$\Delta \chi = \sqrt{\left( \frac{R_0 \cdot \alpha \cdot \left( \frac{10}{11} \cdot I \right)^2}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (R - R_0)^2} \cdot \ln \left( \frac{r_R}{r_r} \right) \cdot \Delta R \right)^2 + \left( \frac{R_0 \cdot \alpha \cdot R \cdot \left( \frac{10}{11} \right)^2 \cdot I}{\pi \cdot l \cdot (R - R_0)} \cdot \ln \left( \frac{r_R}{r_r} \right) \cdot \Delta I \right)^2} = \sqrt{\left( \frac{38 * 4,6 * 10^{-3} * \left( \frac{10}{11} * 0,15 \right)^2}{2 * 3,14 * 0,5 * (38,8 - 38)^2} * \ln \left( \frac{4 * 10^{-3}}{5 * 10^{-5}} \right) \cdot \Delta R \right)^2 + \left( \frac{38 * 4,6 * 10^{-3} * 38 * \left( \frac{10}{11} \right)^2 * 0,15}{\pi * 0,5 * (38,8 - 38)} * \ln \left( \frac{4 * 10^{-3}}{5 * 10^{-5}} \right) \cdot \Delta I \right)^2}$$

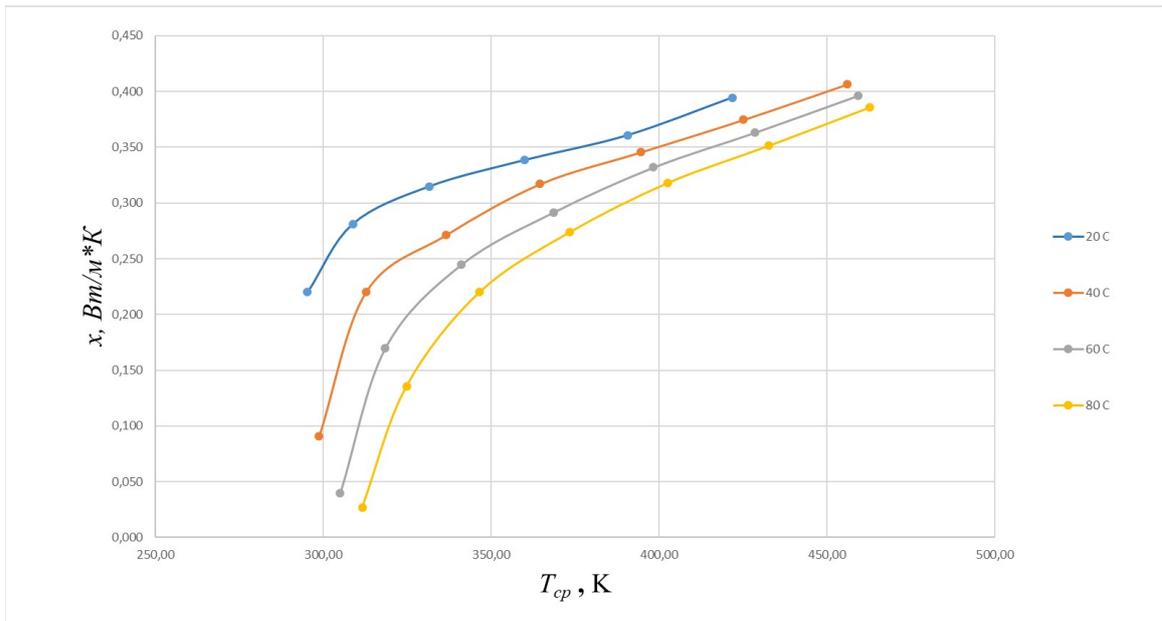
$$\chi = \bar{\chi} \pm \Delta \chi = 0,0342 \pm 0,001 \frac{\text{Вт}}{\text{м} * \text{К}}$$

$$\chi = (0,33 \pm 0,03) \frac{\text{Вт}}{\text{м} * \text{К}} \text{ для } 20^\circ \text{C}$$

$$\chi = (0,29 \pm 0,01) \frac{\text{Вт}}{\text{м} * \text{К}} \text{ для } 40^\circ \text{C}$$

$$\chi = (0,262 \pm 0,006) \frac{\text{Вт}}{\text{м} * \text{К}} \text{ для } 60^\circ \text{C}$$

$$\chi = (0,245 \pm 0,004) \frac{\text{Вт}}{\text{м} * \text{К}} \text{ для } 80^\circ \text{C}$$



## ВЫВОД

В данной лабораторной работе был экспериментально определён коэффициент теплопроводности воздуха, который оказался равен

$\chi = (0,33 \pm 0,03) \frac{Вт}{м \cdot К}$ . Полученный результат отличается от справочного значения, равного  $0,026 \frac{Вт}{м \cdot К}$ , на

$\frac{|\chi_{эксп} - \chi_{теор}|}{\chi_{эксп}} * 100\% = \frac{0,33 - 0,026}{0,33} * 100\% = 92\%$ . Можно утверждать о неточности данной методики и о грубых ошибках в измерениях.