

Лабораторная работа 2.2.3

Старостин Александр, Б01-401

26 Марта, 2025 год

Определение теплопроводимости газов при атмосферном давлении

1 Аннотация

Цель работы: определение коэффициента теплопроводности воздуха при атмосферном давлении и разных температурах по теплоотдаче нагреваемой током нити в цилиндрическом сосуде.

В работе используются: прибор для определения теплопроводности газов; форвакуумный насос; газгольдер с газом; манометр; магазин сопротивлений; эталонное сопротивление 10 Ом; цифровой вольтметр В7-78/1; источник питания.

2 Теоретические сведения

Основной характеристикой теплопроводности служит коэффициент \varkappa , являющийся коэффициентом пропорциональности между плотностью потока тепла q и градиентом температуры dT/dr в направлении распространения этого потока

$$q = -\varkappa \frac{dT}{dr}. \quad (1)$$

В цилиндрически симметричной установке, в которой тепловой поток направлен к стенкам цилиндра от нити, полный поток тепла $Q = qS$ через каждую цилиндрическую поверхность радиуса r должен в стационарном состоянии быть неизменен (как в пространстве, так и во времени). Тогда

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

откуда получаем формулу

$$T_1 - T_2 = \frac{Q}{2\pi L \varkappa} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (3)$$

Здесь r_1 и T_1 – радиус и температура нити, r_2 и T_2 – радиус и температура цилиндра.

3 Ход работы

3.1 Предварительные расчёты параметров установки

$$L = 0.4 \text{ м},$$

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{7 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^{-6}}.$$

Из (3) получаем ($k = \varkappa$):

$$Q = \frac{2\pi L k (T_1 - T_2)}{\ln(\frac{r_2}{r_1})}$$

Взяв значения из методички, оценим Q_{max} :

$$Q_{max} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,4 \text{ м} \cdot 0,025 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \cdot 30 \text{ К}}{\ln(\frac{7 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^{-6}})} = 0.38 \text{ Дж}$$

Известно, что:

$$I^2 R = Q$$

$$I_{max} = \sqrt{\frac{Q_{max}}{R}} = \sqrt{\frac{0.38 \text{ Дж}}{20 \text{ Ом}}} = 138 \text{ мА}$$

Тк на каждой температуре мы будем производить по 10 измерений сил тока и напряжения на проволоке, то сила тока будет изменяться в пределах от 0 до 138 мА с шагом 10-13.8 мА.

3.2 Подготовка установки

Необходимо установить сопротивление на мосту сопротивлений >10 кОм, чтобы сила тока через проволоку была равна 0, проверить цепь, настроить вольтметр и амперметр, включить источник питания и термостат. Температура в термостате в начальный момент равна комнатной. Во время всех измерений температура на термостате должна быть неизменной.

3.3 Проведение измерений

Для 5 температур в диапазоне от 20 до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ проведём 10 измерений сил тока и напряжения на проволоке и с помощью этих данных вычислим значения сопротивления проволоки и количества теплоты, выделяемого проволокой при прохождении через неё тока.

$$R = \frac{U}{I}$$

$$Q = UI$$

Таблицы с измерениями:

При $t = 23^{\circ}\text{C}$:

N	t C	I, mA	U, B	R, Ом	Q, Вт * 10 ^{^(-3)}
1	T=23	0.1655	0.003377	20.40483384	0.000558894
2		13.981	0.2845	20.34904513	3.9775945
3		27.777	0.5668	20.40537135	15.7440036
4		41.555	0.8524	20.5125737	35.421482
5		55.382	1.1444	20.66375357	63.3791608
6		69.38	1.4476	20.86480254	100.434488
7		82.83	1.7475	21.09742847	144.745425
8		96.712	2.0662	21.36446356	199.8263344
9		110.325	2.396	21.71765239	264.3387
10		71.615	1.496	20.88947846	107.13604

Рисунок 1: Таблица с данными при $t = 23^{\circ}\text{C}$

При $t = 30^{\circ}\text{C}$:

N	t C	I, mA	U, B	R, Ом	Q, Вт * 10 ^{^(-3)}
1	T=30	0.33	0.006908	20.93333333	0.00227964
2		10.296	0.2144	20.82362082	2.2074624
3		20.334	0.4243	20.86652897	8.6277162
4		30.374	0.6353	20.91591493	19.2966022
5		40.357	0.8473	20.99511857	34.1944861
6		50.321	1.0625	21.11444526	53.4660625
7		60.381	1.2817	21.226876	77.3903277
8		70.287	1.5026	21.37806422	105.6132462
9		80.379	1.7321	21.54916085	139.2244659
10		90.222	1.9619	21.7452506	177.0065418

Рисунок 2: Таблица с данными при $t = 30^{\circ}\text{C}$

При $t = 50^{\circ}\text{C}$:

N	t C	I, mA	U, B	R, Ом	Q, Вт * 10 ^{^(-3)}
	1 T=50	0.33	0.007391	22.3969697	0.00243903
	2	10.383	0.2309	22.2382741	2.3974347
	3	20.395	0.4543	22.27506742	9.2654485
	4	30.226	0.675	22.33176735	20.40255
	5	40.351	0.9043	22.41084484	36.4894093
	6	50.251	1.1314	22.51497483	56.8539814
	7	60.481	1.3696	22.64512822	82.8347776
	8	70.547	1.6085	22.80040257	113.4748495
	9	82.277	1.8927	23.00399869	155.7256779
	10	90.871	2.1065	23.18121293	191.4197615

Рисунок 3: Таблица с данными при $t = 50C^{\circ}$

При $t = 60C^{\circ}$:

N	t C	I, mA	U, B	R, Ом	Q, Вт * 10 ^{^(-3)}
	1 T=60	0.33	0.00764	23.15151515	0.0025212
	2	10.709	0.2458	22.95265664	2.6322722
	3	20.309	0.4669	22.98980747	9.4822721
	4	30.318	0.6986	23.04241705	21.1801548
	5	40.208	0.9298	23.12475129	37.3853984
	6	50.103	1.1637	23.22615412	58.3048611
	7	60.707	1.4181	23.35974435	86.0885967
	8	70.873	1.6664	23.51248007	118.1027672
	9	80.533	1.9075	23.68594241	153.6166975
	10	90.642	2.1651	23.88627788	196.2489942

Рисунок 4: Таблица с данными при $t = 60C^{\circ}$

При $t = 70C^{\circ}$:

N	t C	I, mA	U, B	R, Ом	Q, Вт * 10 ^{^(-3)}
	1 T=70	0.331	0.007887	23.82779456	0.002610597
	2	10.022	0.2372	23.66793055	2.3772184
	3	20.599	0.4881	23.69532502	10.0543719
	4	30.398	0.722	23.7515626	21.947356
	5	40.405	0.963	23.83368395	38.910015
	6	50.863	1.2178	23.94274817	61.9409614
	7	60.477	1.4552	24.06204011	88.0061304
	8	70.563	1.7089	24.21807463	120.5851107
	9	80.16	1.9546	24.38373253	156.680736
	10	90.629	2.2292	24.59698331	202.0301668

Рисунок 5: Таблица с данными при $t = 70C^{\circ}$

Погрешности:

$$\sigma_U = 0.003 \text{ В},$$

$$\sigma_I = 0.003 \text{ мА},$$

$$\frac{\sigma_Q}{Q} = \frac{\sigma_R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2} \approx 0.01 = 1\%.$$

3.4 Построение графиков $R(Q)$

Для каждой температуры термостата построим график зависимости сопротивления нити от мощности $R(Q)$ и убедимся в линейности полученных зависимостей. Проведём наилучшие прямые $y = kx + b$ и определим точки их пересечения с осью ординат R_0 (при $Q \rightarrow 0$ температура нити совпадает с температурой термостата) и угловые коэффициенты наклона $\frac{dR}{dQ}$.

Погрешности:

$$\sigma_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\langle y^2 \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} - b^2},$$

$$\sigma_b = \sigma_k \sqrt{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2},$$

$$\frac{\sigma_{R_0}}{R_0} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 + \sigma_b^2},$$

$$\frac{\sigma_{\frac{dR}{dQ}}}{\frac{dR}{dQ}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_Q}{Q}\right)^2 + \sigma_k^2}.$$

При $t = 23C^\circ$:

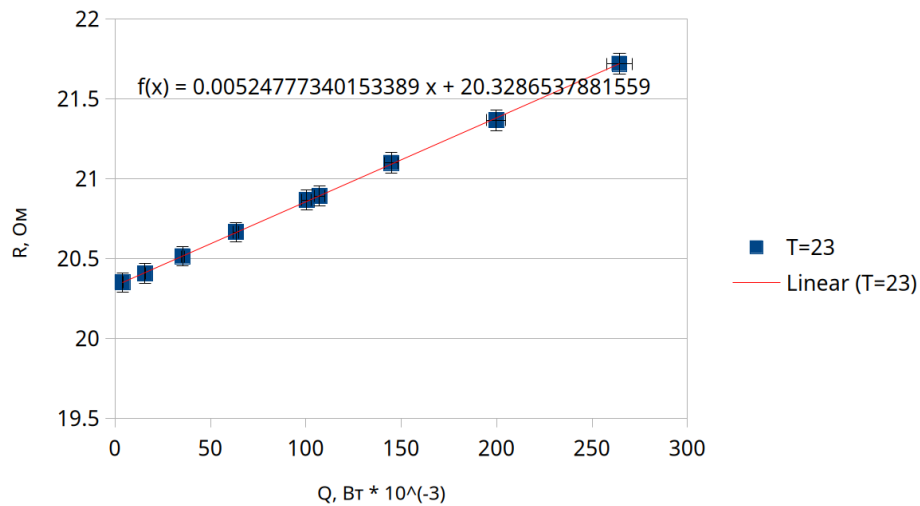


Рисунок 6: График зависимости сопротивления нити R от количества теплоты, выделяемой на ней при $t = 23C^\circ$

Получаем: $R_0 = 20.33 \pm 0.02$ Ом,

$$\frac{dR}{dQ} = (0.00524 \pm 0.00001) \cdot 10^3 \frac{\text{Ом}}{\text{Вт}}.$$

При $t = 30C^\circ$:

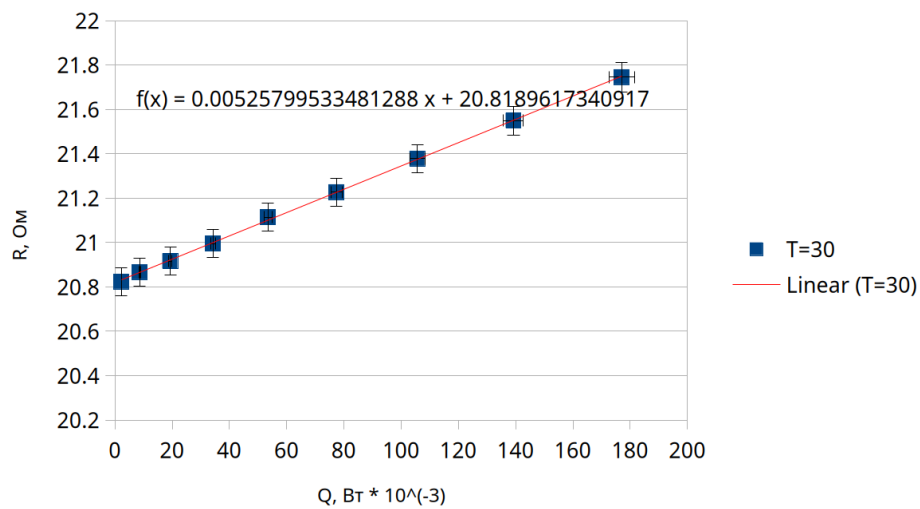


Рисунок 7: График зависимости сопротивления нити R от количества теплоты, выделяемой на ней при $t = 30C^\circ$

Получаем: $R_0 = 20.82 \pm 0.02$ Ом,

$$\frac{dR}{dQ} = (0.00526 \pm 0.00001) \cdot 10^3 \frac{\text{Ом}}{\text{Вт}}.$$

При $t = 50C^\circ$:

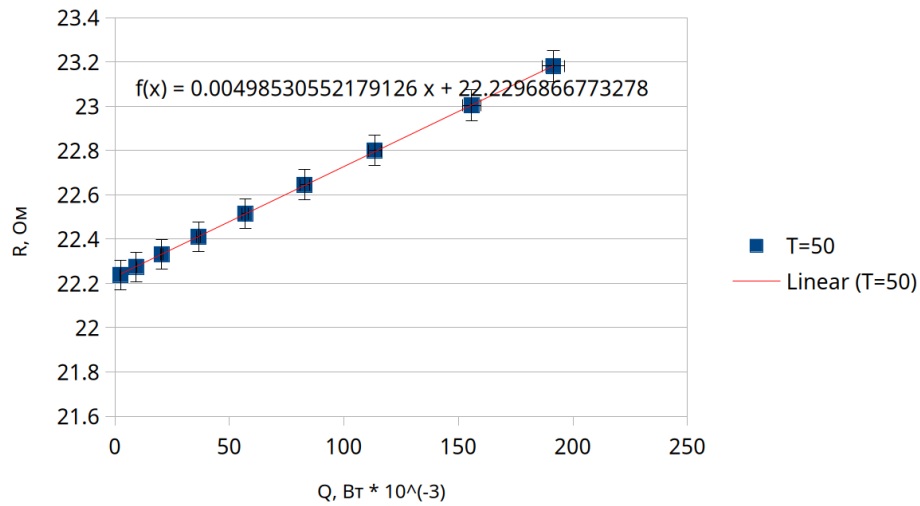


Рисунок 8: График зависимости сопротивления нити R от количества теплоты, выделяемой на ней при $t = 50^\circ\text{C}$

Получаем: $R_0 = 22.23 \pm 0.02 \text{ Ом}$,

$$\frac{dR}{dQ} = (0.00499 \pm 0.00001) \cdot 10^3 \frac{\text{Ом}}{\text{Вт}}.$$

При $t = 60^\circ\text{C}$:

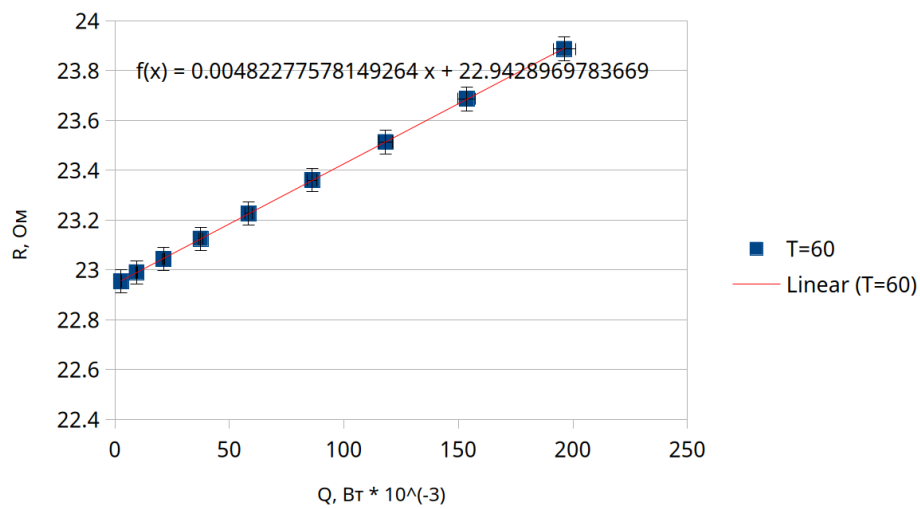


Рисунок 9: График зависимости сопротивления нити R от количества теплоты, выделяемой на ней при $t = 60^\circ\text{C}$

Получаем: $R_0 = 22.94 \pm 0.02 \text{ Ом}$,

$$\frac{dR}{dQ} = (0.00482 \pm 0.00001) \cdot 10^3 \frac{\text{Ом}}{\text{Вт}}.$$

При $t = 70C^{\circ}$:

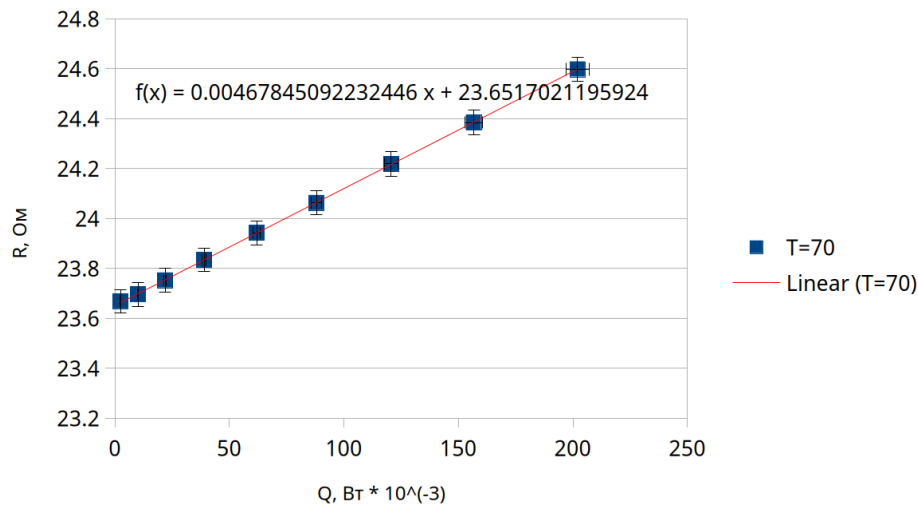


Рисунок 10: График зависимости сопротивления нити R от количества теплоты, выделяемой на ней при $t = 70C^{\circ}$

Получаем: $R_0 = 23.65 \pm 0.02 \text{ Ом}$,

$$\frac{dR}{dQ} = (0.00468 \pm 0.00001) \cdot 10^3 \frac{\text{Ом}}{\text{Вт}}.$$

3.5 Построение графика $R_0(T)$

По данным из предыдущего пункта построим график зависимости сопротивления проволоки R_0 при его температуре T , совпадающей с температурой термостата, убедимся в линейности графика, проведём наилучшую прямую $y = kx + b$ и определим его угол наклона.

Погрешности:

$$\sigma_T = 0.03 \text{ К},$$

$$\sigma_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\langle y^2 \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} - b^2},$$

$$\frac{\sigma_{\frac{dR}{dT}}}{\frac{dR}{dT}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{R_0}}{R_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{T}\right)^2 + \sigma_k^2}.$$

Таблица с данными для графика:

t, C	T, K	R_0, Ом
26	299	20.3457
30	303	20.8431
50	323	22.2647
60	333	22.9868
70	343	23.689

Рисунок 11: Таблица с температурой термостата T и сопротивлением проволоки при ней R_0

График зависимости R_0 от T :

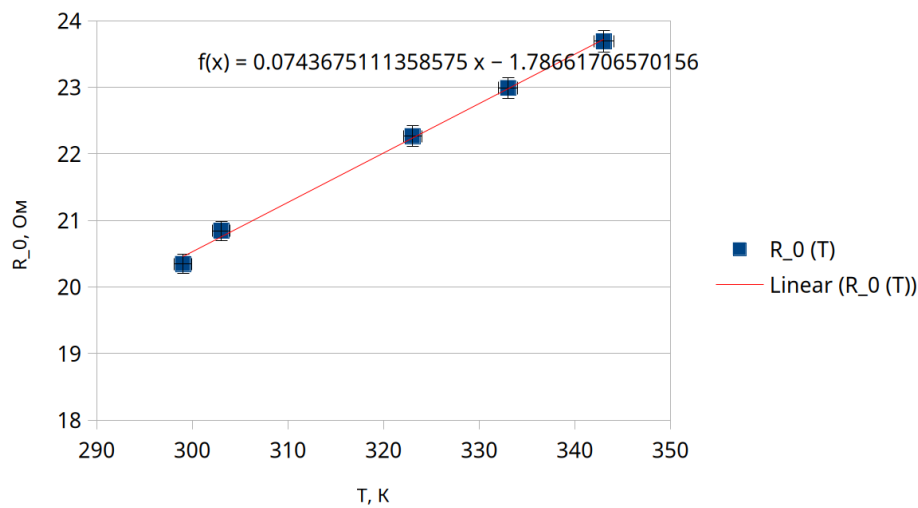


Рисунок 12: График зависимости сопротивления нити R_0 от температуры термостата T_0 совпадающей с температурой нити

Получаем:
 $\frac{dR}{dT} = 0.074 \pm 0.002 \frac{\text{Ом}}{\text{K}}$.

3.6 Определение коэффициентов теплопроводности газа k для каждой температуры термостата T_0

$$\frac{dQ}{dT} = \frac{dR}{dT} / \frac{dR}{dQ}$$

,

$$k = \frac{dQ}{dT} \frac{1}{2\pi L} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

Таблица со значениями k при каждой T :

t, C	T, K	dR/dT, Ом/K	dR/dQ, Ом/Вт	dQ/dT, Вт/K	L, м	r_2/r_1	k, Вт/(м K)
26	299	0.074	5.24	0.014122137	0.4	140	0.027781271
30	303	0.074	5.26	0.014068441	0.4	140	0.027675639
50	323	0.074	4.99	0.014829659	0.4	140	0.029173118
60	333	0.074	4.82	0.015352697	0.4	140	0.030202046
70	343	0.074	4.68	0.015811966	0.4	140	0.031105526

Рисунок 13: Таблица со значениями коэффициентов теплопроводности газа k при каждой температуре термостата T

Данные коэффициентов теплопроводности газа k сходятся с табличными ($\approx 0.025 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{K}}$).

Погрешности:

$$\sigma_k = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\frac{dR}{dT}}}{\frac{dR}{dT}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\frac{dR}{dQ}}}{\frac{dR}{dQ}}\right)^2}.$$

Из оценки графика зависимости k от T , можно утверждать что эта зависимость приблизительно линейна:

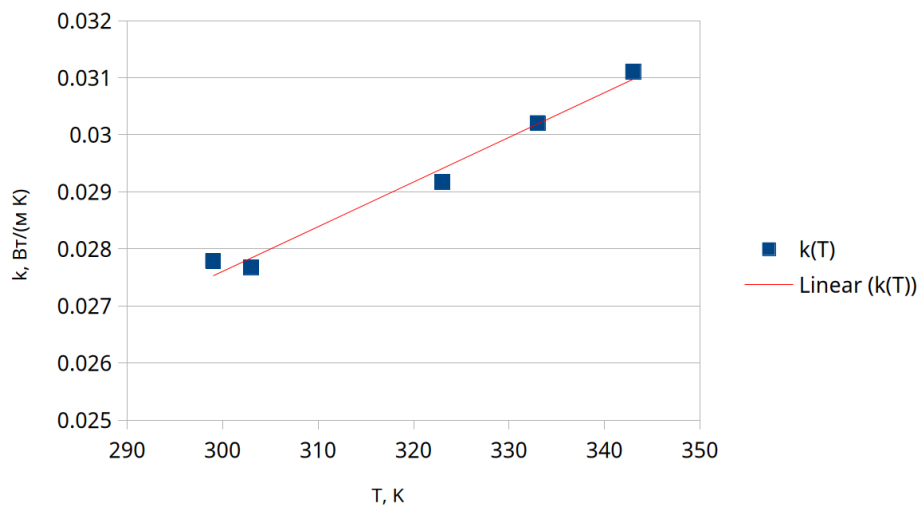


Рисунок 14: График зависимости коэффициентов теплопроводности газа k при каждой температуры термостата T

4 Вывод

Мы измерили коэффициент теплопроводности воздуха при атмосферном давлении в зависимости от температуры. Измерения совпали с табличными.