

Лабораторная работа №2.1.1

Измерение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении

Павлов Дмитрий

Апрель 2018

Долгопрудный
2018

1 Предисловие

Цель работы: измерить повышение температуры воздуха в зависимости от мощности подводимого тепла и расхода при стационарном течении через трубу; исключив тепловые потери, по результатам измерений определить теплоёмкость воздуха при постоянном давлении.

В работе используются: теплоизолированная стеклянная трубка; электронагреватель; источник питания постоянного тока; амперметр, вольтметр (цифровые мультиметры); термопара, подключенная к микровольтметру; компрессор; газовый счётчик; секундомер.

1.1 Теоретическая справка

Измерение теплоёмкости тел обычно производится в калориметрах. При этом регистрируется изменение его температуры в зависимости от количества тепла δ , полученного телом от некоторого нагревательного элемента внутри калориметра. Теплоёмкость тела в некотором процессе определяется как их отношение:

$$C = \frac{\delta Q}{\Delta T}$$

Надёжность измерения определяется, в основном, качеством калориметра. Необходимо, чтобы количество тепла, затрачиваемое на нагревание исследуемого тела, существенно превосходило тепло, расходуемое на нагревание самого калориметра, а также на потери тепла из установки. При измерении теплоёмкости газов эти требования выполнить довольно трудно — масса газа в калориметре и, следовательно, количество тепла, идущее на его нагревание, как правило, малы. Для увеличения количества нагреваемого газа при неизменных размерах установки воздух продувается через калориметр, внутри которого установлен нагреватель. При этом измеряются мощность нагревателя, масса воздуха, протекающего в единицу времени, и приращение его температуры.

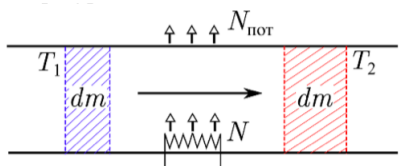


Рис. 1. Нагрев газа при течении по трубе

Рассмотрим газ, протекающий стационарно слева направо через трубу постоянного сечения, в которой установлен нагревательный элемент (см. рис.). Пусть за некоторое время dt через калориметр прошла малая порция газа массой $dm = qdt$, где q [кг/с] — массовый расход газа в трубе. Если мощность нагрева равна N , мощность тепловых потерь на обмен с окружающей средой $N_{пот}$, то порция получила тепло $\delta Q = (N - N_{пот})dt$. С другой стороны, по определению теплоемкости: $\delta Q = cdm\Delta T$, где $\Delta T = T_2 - T_1$ — приращение температуры газа, и c — удельная (на единицу массы) теплоемкость газа в рассматриваемом процессе. При малых расходах газа и достаточно большом диаметре трубы перепад давления на её концах мал, поэтому можно принять, что $P_1 \approx P_2 = P_0$, где P_0 — атмосферное давление. Следовательно, в условиях опыта измеряется удельная теплоемкость при постоянном давлении c_p . Таким образом, получаем:

$$c_p = \frac{N - N_{пот}}{q\Delta T} \quad (1)$$

1.2 Экспериментальная установка

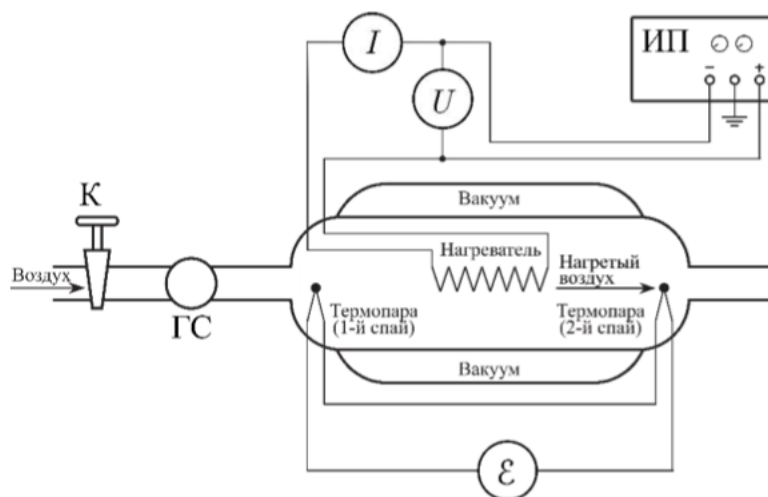


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Схема установки изображена на рис. 3. Воздух, нагнетаемый компрессором, прокачивается через калориметр. Калориметр представляет собой стеклянную цилиндрическую трубку с двойными стенками, запаянными с торцов. На внутреннюю поверхность стенок трубки нанесено серебряное покрытие для минимизации потерь тепла за счет излучения. Воздух из пространства между стенками калориметра откачан до высокого вакуума (105 торр) для минимизации потерь тепла, обусловленных теплопроводностью.

Коэффициент пропорциональности между ЭДС на термопаре и разностью температур в трубке:

$$\beta = \frac{E}{\Delta T} = 40.7 \frac{mK}{^\circ C}$$

где E - ЭДС на термопаре
 ΔT - разность температур

2 Предварительные измерения

Температура: $26^\circ C$

Давление: 100600 Па

Влажность: 63%

Настроили максимальный поток воздуха:

$\frac{\Delta V}{\Delta t}$, л/с	q, г/с
0.11	0.13
0.11	0.13
0.11	0.13

$$q = \rho_0 \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

$$(\rho_0 = \frac{\mu P_0}{RT_0})$$

3

Вычислим ток I_0 нагревателя, требуемый для нагрева воздуха на $\Delta T = 1^\circ C$

3.1 Определим теоретическое C_P воздуха:

Будем считать воздух смесью двухатомных газов, тогда:

$$C_P = \frac{7R}{2}$$

3.2 Определим мощность N_0 , необходимую для нагревания газа при максимальном расходе:

3.3 Определим I_0 :

$$I_0 = 60 \text{ мА}$$

4 Измерение зависимость разности температур от мощности нагревателя при максимальном расходе воздуха.

4.1 Измерение ЭДС на термопаре при максимальном потоке воздуха

$$m = 8.8 \cdot 10^{-5} \text{ кг}$$

I, мА	U, В	ϵ , мВ
89	3	80
120.7	4.083	153
139.6	4.725	210
155.8	5.274	266
178.6	6.046	350

ЭДС на термопаре в зависимости от поданного напряжения

4.2 По ЭДС на термопаре вычислим ΔT и N :

I, мА	U, В	ϵ , мВ	$\Delta T, K$	N, Вт
89	3	80	1.97	0.267
120.7	4.083	153	3.75	0.493
139.6	4.725	210	5.16	0.658
155.8	5.274	266	6.53	0.822
178.6	6.046	350	8.6	1.078

ЭДС на термопаре и разность температур связаны уравнением: $\epsilon = \beta \cdot \Delta T$

5 Измерение зависимость разности температур от мощности нагревателя при меньшем расходе воздуха.

5.1 Измерение ЭДС на термопаре при меньшем потоке

$$m = 6.8 \cdot 10^{-5} \text{ кг}$$

I, мА	U, В	ϵ , мВ
44.9	1.513	30
77.1	2.602	102
104.4	3.69	216
142.5	4.822	368
175.1	5.929	565

ЭДС на термопаре в зависимости от поданного напряжения

5.2 По ЭДС на термопаре вычислим ΔT и N :

I, мА	U, В	ϵ , мВ	$\Delta T, K$	N, Вт
44.9	1.513	30	0.73	0.068
77.1	2.602	102	2.51	0.2
104.4	3.69	216	5.31	0.385
142.5	4.822	368	9.04	0.687
175.1	5.929	565	13.9	1.038

ЭДС на термопаре и разность температур связаны уравнением: $\epsilon = \beta \cdot \Delta T$

5.3 Погрешности:

$$\sigma \Delta V = 0.1 \text{ л} \cdot dt = 0.1 \text{ с} \cdot \sigma T = 0.1 \text{ К} \cdot \sigma N = 0.1 \text{ Вт}$$

$$\frac{\sigma_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_U}{U}\right)^2}$$

$$\frac{\sigma_m}{m} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta t}}{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_N}{N}\right)^2}$$

6 Построение графиков зависимостей $T(E)$.

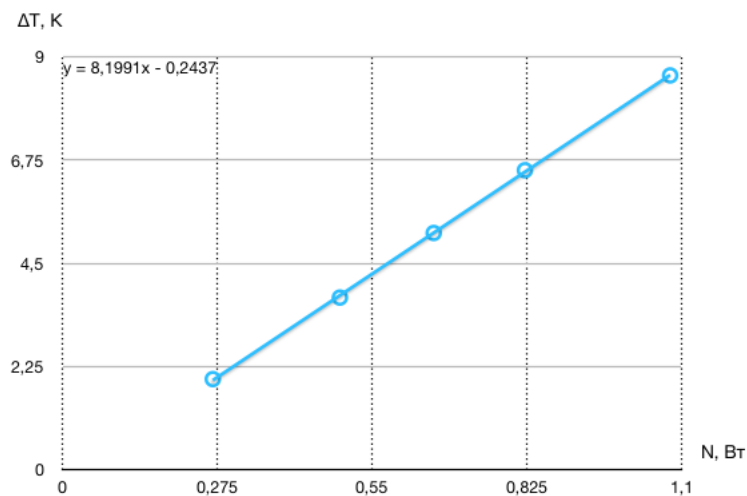


График зависимости разности температур на концах трубки от ЭДС нагревателя при максимальном расходе воздуха.
Коэффициент наклона прямой $k = 8.2$

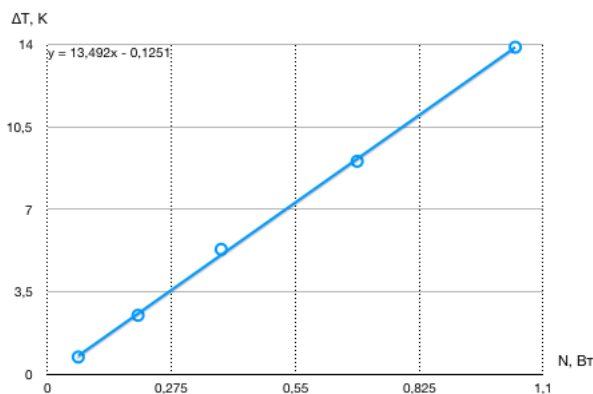


График зависимости разности температур на концах трубки от ЭДС нагревателя при меньшем расходе воздуха.
Коэффициент наклона прямой $k = 13.5$

6.1 Из графиков можем определить β методом наименьших квадратов:

$$h = \frac{\langle xy \rangle}{\langle x^2 \rangle}$$

β	номер измерения
0.12	1
0.07	2

6.2 Найдём c_p :

$$\begin{aligned}
 c_{p1} &= 1100 \text{ Дж/кгК} \\
 c_{p2} &= 1080 \text{ Дж/кгК} \\
 c_p &= 1090 \pm 110 \text{ Дж/кгК} \\
 \text{Теоретическое } c_p &= 1005 \text{ Дж/кгК}
 \end{aligned}$$

6.3 Погрешности:

$$\frac{\sigma_{cp}}{c_p} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_\beta}{\beta}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2}$$

7 Вывод

Табличное значение c_p совпало со значением, полученным во время опыта в пределах погрешности. Погрешность составила 9%. Основной причиной возникновения ошибки является непостоянное давление поступающего воздуха, а значит и расход Q . Также оказало влияние непостоянная температура вокруг установки. Зная c_p можно оценить долю тепловых потерь: $N/P \approx 11\%$.