

Лабораторная работа № 2.1.1
Измерение удельной теплоёмкости воздуха при
постоянном давлении.

Никита Москвитин, Б04-204

2023

1 Аннотация

В данной работе исследовалась теплоемкость воздуха при комнатной температуре. Было найдено ее численное значение. Так же была произведена оценка тепловых потерь и погрешности, полученного результата.

2 Введение

Измерение теплоёмкости тел обычно производится в калориметрах, т. е. в сосудах, обеспечивающих теплоизоляцию исследуемого тела от внешней среды. При этом регистрируется изменение его температуры dT в зависимости от количества тепла δQ , полученного телом от некоторого нагревательного элемента внутри калориметра. Теплоёмкость тела в некотором процессе определяется как их отношение:

$$C = \frac{\delta Q}{dT} \quad (1)$$

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 в нашей работе исследуемый газ (воздух) продувается через калориметр, внутри которого установлен нагреватель. При этом измеряются мощность нагревателя, масса воздуха, протекающего в единицу времени (расход), и приращение его температуры.

Рассмотрим газ, протекающий стационарно слева направо через трубу постоянного сечения, в которой установлен нагревательный элемент. 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 $N_{\text{пот}}$, то порция получила тепло $\delta Q = (N - N_{\text{пот}})dt$. С другой стороны, по определению теплоёмкости (1): $\delta Q = cdm\Delta T$, где $\Delta T = T_2 - T_1$ — приращение температуры газа, c и — удельная (на единицу массы) теплоёмкость 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 теплоёмкость при постоянном давлении c_p . Таким образом, получаем:

$$c_p = \frac{N - N_{\text{пот}}}{q\Delta T} \quad (2)$$

3 Экспериментальная установка и методика измерений

Схема установки изображена на рис. 1. 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 для минимизации потерь тепла, обусловленных теплопроводностью.

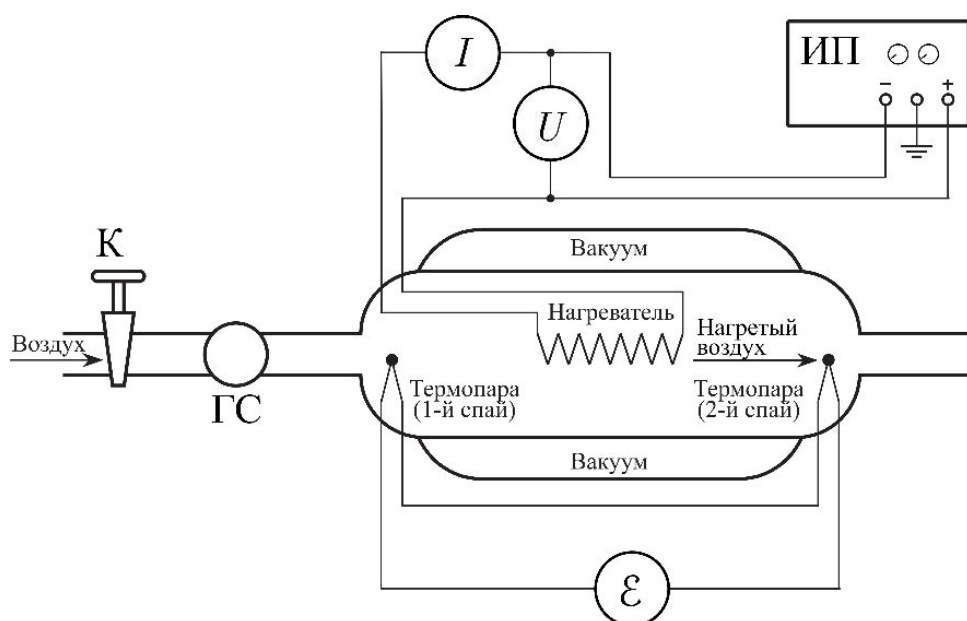


рис. 1

Нагреватель в виде намотанной на пенопласт нихромовой проволоки расположен внутри калориметра непосредственно в воздушном потоке. Нагрев проволоки производится от регулируемого источника постоянного тока (ИП). Напряжение U на нагревателе и ток I через него регистрируются цифровыми мультиметрами. Таким образом, мощность нагрева равна:

$$N = UI \quad (3)$$

Для измерения разности температур ΔT служит медно-константановая термопара. Один спай термопары расположен в струе воздуха, входящего в калориметр, и находится при комнатной температуре, а второй — в струе выходящего нагретого воздуха. Константановая проволока термопары расположена внутри калориметра, а медные проводники подключены к цифровому вольтметру. Возникающая в термопаре ЭДС ε пропорциональна разности температур ΔT спаев:

$$\varepsilon = \beta \Delta T \quad (4)$$

где $\beta = 40,7 \text{ мкВ } ^\circ\text{C}$ — чувствительность медно-константановой термопары в рабочем диапазоне температур ($20\text{--}30\text{ }^\circ\text{C}$). ЭДС регистрируется с помощью микровольтметра.

Объём воздуха, прошедшего через калориметр, измеряется газовым счётчиком ГС. Для регулировки расхода служит кран К. Время Δt прохождения некоторого объёма ΔV воздуха измеряется секундомером. Объёмный расход равен $\frac{\Delta V}{\Delta t}$, массовый расход может быть найден как:

$$q = \rho_0 \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (5)$$

где ρ_0 плотность воздуха при комнатной температуре, считается по формуле:

$$\rho_0 = \frac{\mu P}{RT} \quad (6)$$

Учитывая особенности устройства калориметра, следует ожидать, что мощность нагревателя расходуется не только на нагрев массы прокачиваемого воздуха, но и частично теряется за счет нагрева внутренних стенок термостата и рассеяния тепла через торцы термостата. Можно предположить, что при небольшом нагреве ($\Delta T \ll T_0$) мощность потерь тепла $N_{\text{пот}}$ прямо пропорциональна разности температур:

$$N_{\text{пот}} = \alpha \Delta T \quad (7)$$

где α — некоторая константа. При этом условии основное соотношение (2) принимает вид:

$$N = (c_p q + \alpha) \Delta T \quad (8)$$

Следовательно, при фиксированном расходе воздуха ($q = const$) подводимая мощность и разность температур связаны прямой пропорциональностью ($\Delta T(N)$ — линейная функция). Тогда измерим эту зависимость при разных q , проверим (8) и измерим c_p , а так же оценим мощность тепловых потерь. При этом нужно будет выждать 10-15 минут между экспериментами, для установления теплового равновесия.

4 Измерения

Параметры окружающей среды: $P = 98240 \text{ Па}$ - давление в комнате, $T = 23,6^\circ\text{C}$ - температура в комнате. Тогда плотность из формулы (6) $\rho_0 = 1,155 \text{ кг/м}^3$

Таблица 1: Прямые измерения расхода воздуха

t1, с	t1, с	t3, с
30,02	67,01	117,81
29,99	66,72	118
29,79	66,85	118,13
29,85	66,81	118,66
29,91	66,9	118,66

Таблица 2: Первый расход воздуха

I, мА	U, В	ε , мкВ	ε_0 , мкВ	$\varepsilon_{\text{итог}}$, мкВ	N, Вт	T, °C	ΔT , °C	ΔN , Вт
112,8	3,207	63	10	53	0,3619	1,30	0,13	0,0011
155,8	4,432	123	10	113	0,6905	2,78	0,13	0,0005
184,9	5,263	169	10	159	0,9731	3,91	0,13	0,0015
204	5,807	203	10	193	1,1846	4,74	0,13	0,0019
218,1	6,211	234	10	224	1,355	5,50	0,13	0,002

Таблица 3: Второй расход воздуха

I, мА	U, В	ε , мкВ	ε_0 , мкВ	$\varepsilon_{\text{итог}}$, мкВ	N, Вт	T, °C	ΔT , °C	ΔN , Вт
83,4	2,37	64	12	52	0,1977	1,28	0,13	0,0008
122,8	3,49	132	12	120	0,4286	2,95	0,13	0,0012
163,9	4,665	235	12	223	0,7646	5,48	0,13	0,0016
189,9	5,408	309	12	297	1,0270	7,30	0,13	0,0018
218,3	6,222	412	12	400	1,3583	9,83	0,13	0,0015

Таблица 4: Третий расход воздуха

I, мА	U, В	ε , мкВ	ε_0 , мкВ	$\varepsilon_{\text{итог}}$, мкВ	N, Вт	T, °C	ΔT , °C	ΔN , Вт
70,6	2,006	73	12	61	0,1416	1,50	0,13	0,0008
113,6	3,23	166	12	154	0,3670	3,78	0,13	0,0011

5 Обработка результатов

Подсчитаем все массовые расходы, данные представлены в Таблице 5.

Таблица 5: Таблица расходов

q_1 , кг/с	q_2 , кг/с	q_3 , кг/с	Δq , кг/с
0,000193	0,000086	0,000049	0,000002

Построим графики $\Delta T(N)$, они представлены на рис.2 (данные в Таблицах 2-4):

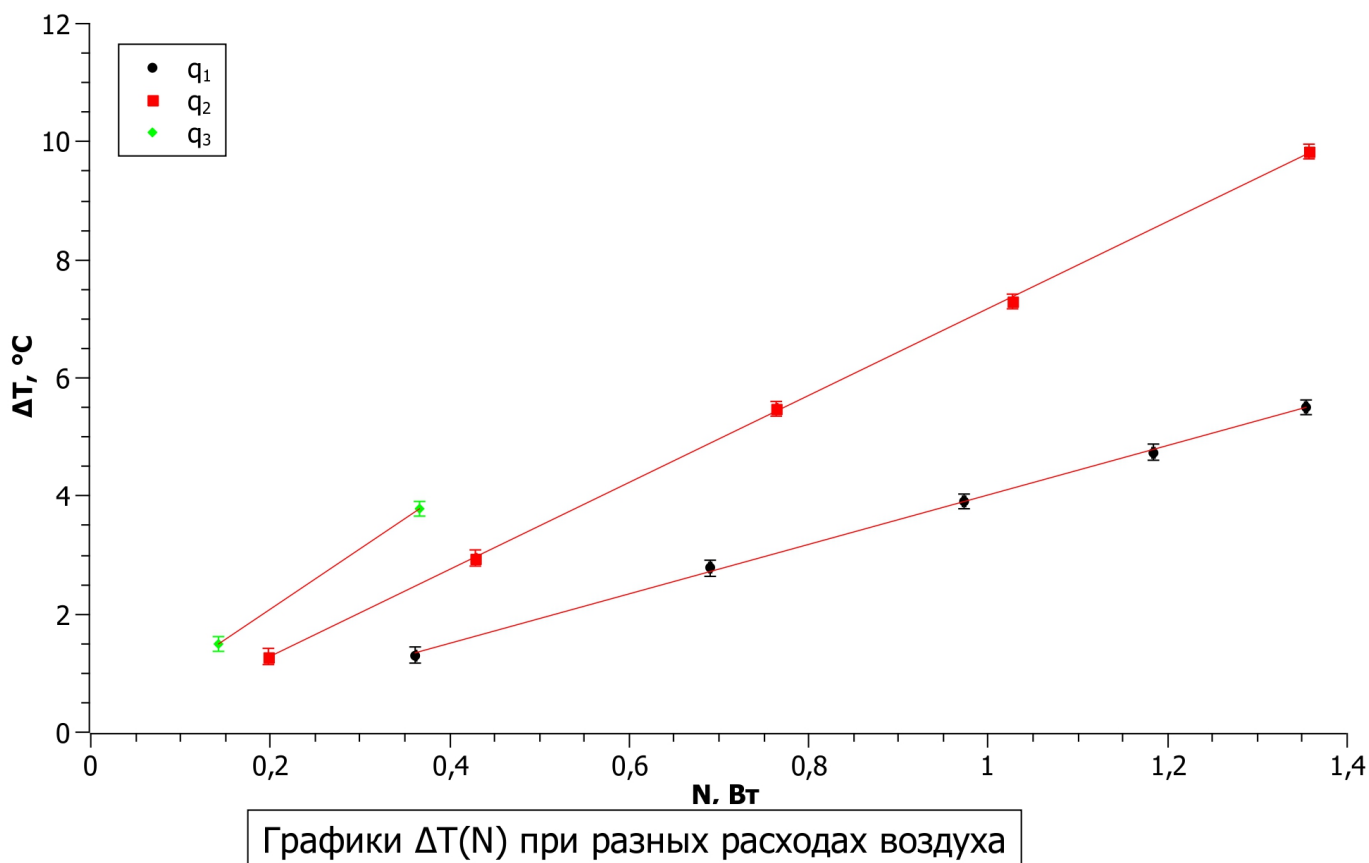


рис. 2

Коэффициенты наклона приведены в Таблице 6:

Таблица 6: Коэффициенты наклона графиков

k_1 , °C/Вт	Δk_1 , °C/Вт	k_2 , °C/Вт	Δk_2 , °C/Вт	k_3 , °C/Вт	Δk_3 , °C/Вт
4,19	0,17	7,35	0,14	10,1	0,9

Как можно заметить из (8) $\frac{1}{k}(q)$ линейна, где новый коэффициент наклона равен c_p , а точка пересечения с осью будет коэффициентом теплопотерь. Значения для графика представлены в Таблице 7. Построим график:

Таблица 7: Значения линеаризованной зависимости

$1/k$, Вт/°С	$\Delta 1/k$, Вт/°С	q , кг/с	Δq , кг/с
0,239	0,008	0,000193066	0,000002
0,136	0,003	0,000086	0,000002
0,0991	0,009	0,000049	0,000002

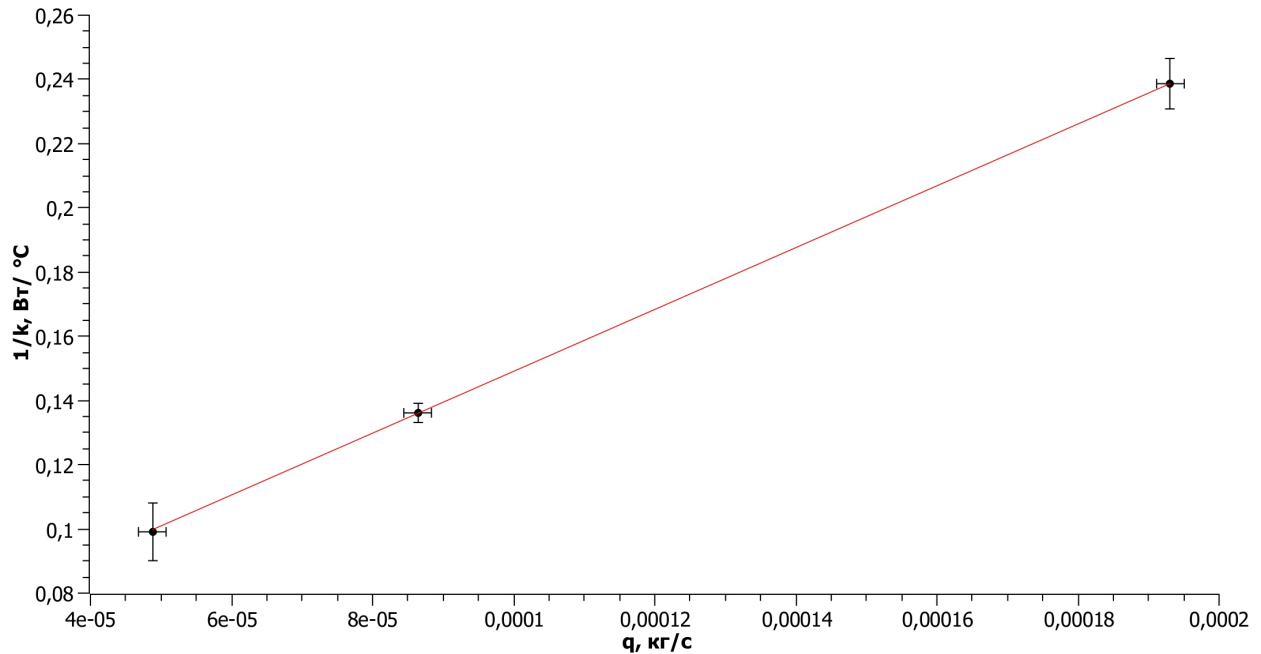


График зависимости $1/k(q)$

рис. 3

Из которого мы получаем, что удельная теплоемкость воздуха $c_p = 970 \pm 80$ Дж/кг°С, а коэффициент теплопотерь $\alpha = 0,053 \pm 0,008$ Вт/°С. Если из таблицы возьмем максимальное значение температуры $T = 9,83$ °С и соответствующую ей мощность $N = 1,3583$ Вт, то $\frac{N_{\text{пот}}}{N} \approx 38,4\%$, что довольно существенно.

6 Вывод

Мы измерили теплоемкость воздуха при постоянном давлении и получили $c_p = 970 \pm 80$ Дж/кг°С, что довольно близко к табличному $c_{p_{\text{табл}}} = 1005$ Дж/кг°С (информация взята с сайта Thermalinfo.ru), что соответствует высокой точности эксперимента (отклонение от табличного всего 3,5%!). А также сделали оценку тепловых потерь, они вышли достаточно большими $\frac{N_{\text{пот}}}{N} \approx 38,4\%$, что говорит о том, что ими нельзя пренебрегать, но при этом можно использовать упрощенную модель, представленную формулой (7).