

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа электроники, фотоники и молекулярной
физики

Лабораторная работа 2.1.1

Измерение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении

Авторы:
Идрисов Сергей
Б04-306

Долгопрудный 2024

Введение

Цель работы:

1. Измерить повышение температуры воздуха в зависимости от мощности подводимого тепла и расхода при стационарном течении через трубу;
2. Исключив тепловые потери, по результатам измерений определить теплоёмкость воздуха при постоянном давлении.

В работе используются:

1. Теплоизолированная стеклянная трубка;
2. Электронагреватель;
3. Источник питания постоянного тока;
4. Амперметр, вольтметр (цифровые мультиметры);
5. Термопара, подключенная к микровольтметру;
6. компрессор;
7. Газовый счётчик;
8. Секундомер.

Теоретические сведения

Измерение теплоёмкости тел обычно производится в калориметрах. 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 количество тепла, идущее на его нагревание 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 (см. рис. 1). 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

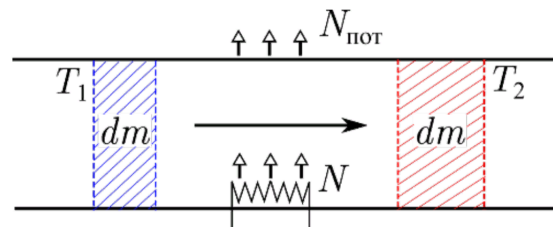


Рис. 1: Нагрев газа при течении по трубе

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 ΔT — приращение температуры газа, и c — 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 тепло-

ёмкость при постоянном давлении c_p . Таким образом, получаем

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

Более подробное рассмотрение позволяет установить, что формула (2) справедлива даже в том случае, если перепад давлений на концах трубы не мал, при условии, что газ можно считать идеальным, а его кинетической энергией можно пренебречь. Кроме того, для практического использования (2) должны быть малы потери тепла и тепловыделение из-за трения (по сравнению с мощностью нагревателя).

Экспериментальная установка

Схема установки изображена на рис. 2. 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. Воздух из пространства между стенками калориметра откачан до высокого вакуума (10^{-5} торр).

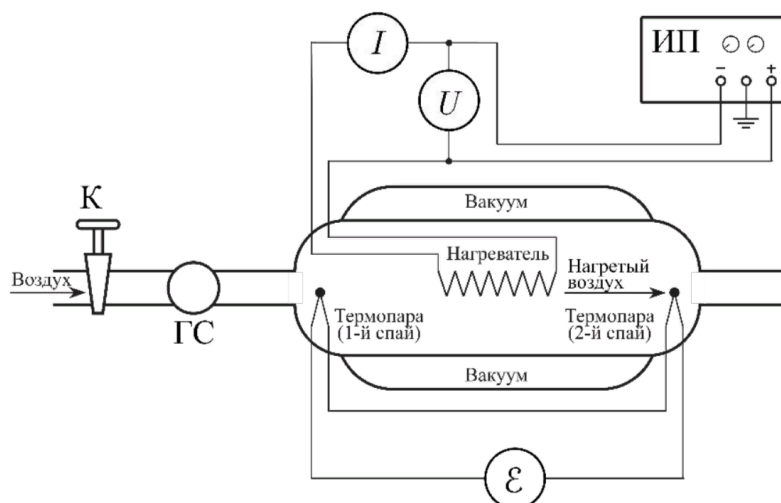


Рис. 2: Схема экспериментальной установки

Нагреватель расположен внутри калориметра непосредственно в воздушном потоке. Нагрев 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 $\beta = 40,7 \frac{\text{мкВ}}{^\circ\text{C}}$ — чувствительность медно-константановой термопары в рабочем диапазоне температур (20–30 °C). ЭДС регистрируется с помощью микровольтметра. Объем воздуха, прошедшего через калориметр, измеряется газовым счётчиком ГС. Для регулировки расхода служит кран К. Время Δt прохождения некоторого объема ΔV воздуха измеряется секундомером. Объемный 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. Можно предположить, что при небольшом нагреве () мощность потерь тепла $N_{\text{пот}}$ прямо пропорциональна разности температур:

$$N = \alpha \Delta T \quad (6)$$

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

$$N = (c_p q + \alpha) \Delta T \quad (7)$$

Следовательно, при фиксированном расходе воздуха ($q = \text{const}$) подводимая мощность и разность температур связаны прямой пропорциональностью.

Методика измерений

В настоящем эксперименте предлагается провести измерение зависимости $\Delta T(N)$ разности температур ΔT концов термопары от мощности нагрева $N = UI$ при нескольких фиксированных значениях расхода q

воздуха. По результатам измерений проверить справедливость зависимости (10) и определить удельную теплоёмкость воздуха при постоянном давлении c_p , а также оценить величину тепловых потерь. Важнейшим условием корректности проведения опыта является установление стационарного состояния. Снятие показаний рекомендуется производить когда показания вольтметра, подключенного к термопаре, не меняются в течение 1-2 минут. Кроме того, необходимо учитывать, что охлаждение системы занимает существенно большее время, нежели нагрев, поэтому при измерениях мощность нагрева нужно увеличивать постепенно. Охлаждение установки для повторного снятия зависимости производится при максимальном расходе воздуха и выключенном нагревателе.

Ход работы

1. Перед началом работы убедимся, что калориметр охлаждён, газовый счётчик работает корректно и напряжение на термопаре равно 0.

2. Запишем значения температуры и давления в комнате, необходимые для расчета расхода прокачиваемого воздуха. Плотность воздуха определим из формулы $\rho_0 = \frac{\nu P_0}{RT_0}$, где $\nu = 29 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$. По психрометру определим значение влажности воздуха в комнате. Данные занесём в таблицу 1.

$$\sigma_{\rho_0} = \rho_0 \sqrt{\left(\frac{\sigma_{P_0}}{P_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{T_0}}{T_0}\right)^2} = 1,131 \sqrt{\left(\frac{10}{96360}\right)^2 + \left(\frac{0,1}{297,2}\right)^2} = 0,014 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (8)$$

$P_0, \text{Па}$	T_0, K	$\rho_0, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
96360	297,2	1,131
± 10	$\pm 0,1$	$\pm 14 \cdot 10^{-3}$

Таблица 1: Плотность воздуха

3.1 Эксперимент 1

Массу прокачиваемого воздуха рассчитаем по формуле $q = \rho_0 \frac{\Delta V}{\Delta t}$. Проведём измерение зависимости разности температур от мощности нагрева. Результаты занесём в таблицу 2. Формула для нахождения температуры $\Delta T = \frac{U_2}{\beta}$, где $\beta = 40,7 \frac{\text{мкВ}}{\text{К}}$. Далее с помощью этих результатов построим график зависимости $\Delta T(N)$ с помощью МНК.

σ_N и σ_q рассчитываются аналогично формуле 8.

$$\sigma_q = q \sqrt{\left(\frac{\sigma_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\rho_0}}{\rho_0}\right)^2} = 0,18 \cdot 10^{-3} \sqrt{\left(\frac{0,1}{5}\right)^2 + \left(\frac{0,66}{32}\right)^2 + \left(\frac{0,014}{1,131}\right)^2} = 6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кГ}}{\text{с}}$$

$I, \text{мА}$	$U_1, \text{В}$	$N, \text{мВт}$	$U_2, \text{мкВ}$	$\Delta T, \text{К}$	$\Delta V, \text{л}^3$	$\Delta t, \text{с}$	$q, \frac{\text{кГ}}{\text{с}} \cdot 10^{-3}$
79,4	2,34	185	37	0,91	5	32	0,205
127,6	3,76	479	88	2,16			
178,5	5,27	940	173	4,23			
235	6,72	1579	288	7,08			
264,7	7,58	2006	365	8,97			
$\pm 0,1$	$\pm 0,03$	± 6	± 3	0,07	$\pm 0,1$	$\pm 0,66$	$\pm 0,006$

Таблица 2: Эксперимент 1

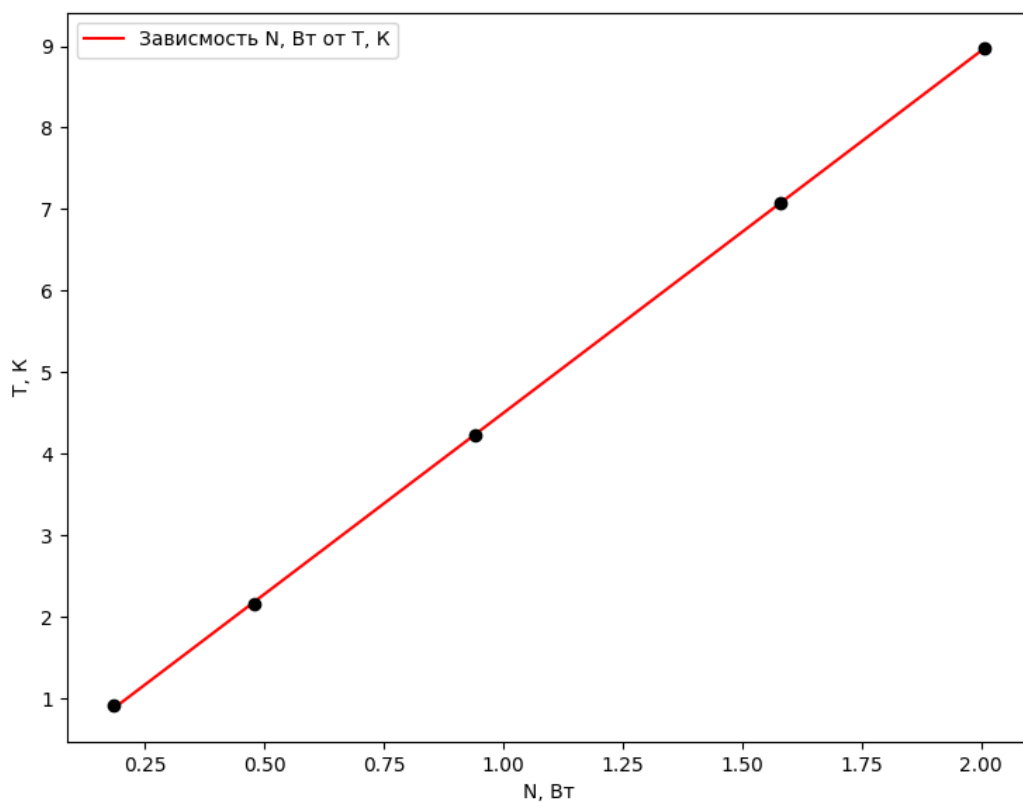


Рис 3. Зависимость $T_1(N)$

	NT	N	N^2	$\langle N \rangle^2$	T	T^2	$\langle T \rangle^2$
	0,168	0,185	0,0342		0,91	0,8281	
	1,034	0,479	0,2294		2,16	4,6656	
	3,976	0,94	0,8836		4,23	17,8929	
	11,179	1,579	2,4932		7,08	50,1264	
	17,993	2,006	4,024		8,97	80,4609	
$\langle \rangle$	6,87	1,0378	1,5329	1,077	4,67	30,4687	21,8089

Таблица 3: МНК 1

$$f(a, b) = \sum_{i=1}^n [T_i - (a + bN_i)]^2.$$

$$b = \frac{\langle NT \rangle - \langle N \rangle \langle T \rangle}{\langle N^2 \rangle - \langle N \rangle^2},$$

$$a = \langle T \rangle - b \langle N \rangle.$$

$$\sigma_b \approx \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2}{\langle N^2 \rangle - \langle N \rangle^2} - b^2},$$

$$\sigma_a = \sigma_b \sqrt{\langle N^2 \rangle - \langle N \rangle^2}.$$

$$b_1 = 4,4, \sigma_b = 0,2$$

$$\sigma_N = N \sqrt{\left(\frac{\sigma_{U_1}}{U_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2} = 1037,8 \sqrt{\left(\frac{0,03}{5,134}\right)^2 + \left(\frac{0,1}{177,04}\right)^2} = 6 \text{ мВт}$$

$$\sigma_{\Delta T} = \Delta T \sqrt{\left(\frac{\sigma_{U_2}}{U_2}\right)^2} = 4,7 \sqrt{\left(\frac{3}{190,2}\right)^2} = 0,07 \text{ К}$$

3.2 Эксперимент 2

$I, \text{мА}$	$U_1, \text{В}$	$N, \text{мВт}$	$U_2, \text{мкВ}$	$\Delta T, \text{К}$	$\Delta V, \text{л}^3$	$\Delta t, \text{с}$	$q, \frac{\text{кДж}}{\text{с}} \cdot 10^{-3}$
39,1	1,15	44	32	0,79	5	115	0,05
69	2,03	140	70	1,72			
108,6	3,2	347	161	3,96			
144,9	4,27	618	276	6,78			
169,8	5,01	850	368	9,04			
$\pm 0,1$	$\pm 0,03$	± 6	± 3	0,07	$\pm 0,1$	$\pm 0,66$	$\pm 0,006$

Таблица 4: Эксперимент 2

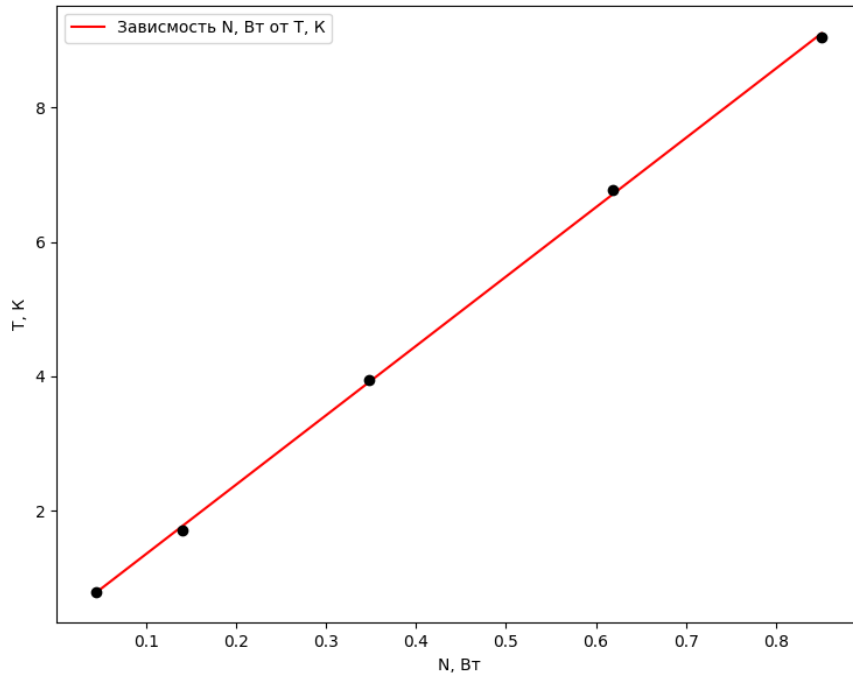


Рис 4. Зависимость $T_2(N)$

	NT	N	$\langle N \rangle^2$	N^2	T	T^2	$\langle T \rangle^2$
		0,044		0,0019	0,79	0,6241	
		0,14		0,0196	1,72	2,9584	
		0,347		0,1204	3,96	15,6816	
		0,618		0,3819	6,78	45,9684	
		0,85		0,7225	9,04	81,7216	
$\langle \rangle$		0,3998	0,1598	0,2493	4,458	29,3908	19,8738

Таблица 5: МНК 2

$$b_2 = 10,3, \sigma_b = 0,2$$

$$\text{Из коэффициентов наклона } c_p = \frac{1/b_1 - 1/b_2}{q_1 - q_2} = \frac{1/4,4 - 1/10,3}{(0,205 - 0,05) \cdot 10^{-3}} = 840 \pm 80 \frac{\text{Дж} \cdot \text{кг}}{\text{К}}$$

$$\sigma_{c_p} = c_p \sqrt{\left(\frac{\sigma_{(1/b_1 - 1/b_2)}}{1/b_1 - 1/b_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{q_1 - q_2}}{q_1 - q_2}\right)^2} = 840 \sqrt{\left(\frac{6 \cdot 10^{-6}}{0,155}\right)^2 + \left(\frac{0,025}{0,13}\right)^2} = 80 \frac{\text{Дж} \cdot \text{кг}}{\text{К}}$$

Вывод

В ходе эксперимента было получено значение удельной массовой теплоёмкости воздуха при постоянном давлении. Полученное значение $C_p = 840 \pm 80 \frac{\text{Дж}\cdot\text{кг}}{\text{К}}$ хорошо совпало с теоретическим ($c_p = 1000 \frac{\text{Дж}\cdot\text{кг}}{\text{К}}$). В свою очередь, табличное значение для удельной теплоёмкости воздуха варьируется при комнатной температуре.

Неполное совпадение результата вызвано, вероятно, во-первых, тем, что воздух это не совсем смесь идеальных двухатомных газов, как минимум в силу наличия в воздухе водяного пара, а во-вторых тем, что установление идеального равновесия требует слишком большого времени ожидания, в связи с чем снимаемые значения I, U, ε - не совсем равновесные.