

**Отчет о выполнении лабораторной  
работы 2.1.1 "Измерение удельной  
теплоемкости воздуха при постоянном  
давлении"**

Калашников Михаил, Б03-205

**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. Теоретические сведения

Теплоёмкость тела в некотором процессе определяется как их отношение:

$$C = \frac{\delta Q}{dT}$$

Рассмотрим газ, протекающий стационарно через трубу постоянного сечения, в которой установлен нагревательный элемент. Пусть за некоторое время  $dt$  через калориметр прошла малая порция газа массой  $dm = qdt$ , где  $q$  – 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:  $\delta Q = cdm\Delta T$ , где  $\Delta T$  – приращение температуры газа,  $c$  – удельная (на единицу массы) теплоёмкость газа в рассматриваемом процессе. При малых расходах газа и достаточно большом диаметре трубы можно пренебречь перепадом давления и считать процесс изобарическим. Таким образом, получаем:

$$c_p = \frac{N - N_{\text{пот}}}{q\Delta T}$$

## 2. Экспериментальная установка

Схема установки изображена на рис. 1. Воздух, нагнетаемый компрессором, прокачивается через калориметр. Калориметр представляет собой стеклянную цилиндрическую трубку с двойными стенками, запаянными с торцов. Нагреватель в виде проволоки расположен внутри калориметра непосредственно в воздушном потоке. Нагрев проволоки производится от регулируемого источника постоянного тока. Напряжение  $U$  на нагревателе и ток  $I$  через него

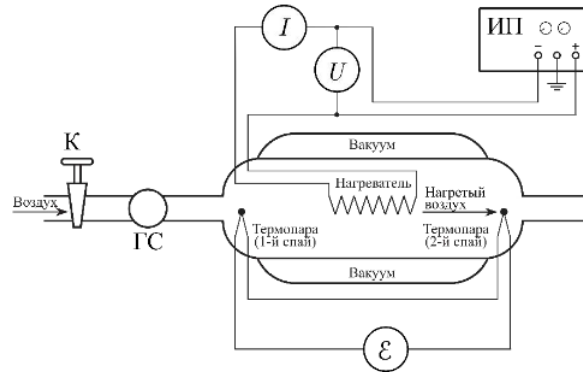


Рис. 1: Экспериментальная установка

регистрируются цифровыми мультиметрами. Таким образом, мощность нагрева равна:

$$N = UI$$

Для измерения разности температур  $\Delta T$  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  $\mathcal{E}$  пропорциональна разности температур  $\Delta T$  спаев:

$$\mathcal{E} = \beta \Delta T, \quad \beta = 40,7 \frac{\text{мкВ}}{^\circ\text{C}}$$

Объём воздуха, прошедшего через калориметр, измеряется газовым счётчиком ГС. Для регулировки расхода служит кран К. Массовый расход может быть найден как  $q = \rho_0 \frac{\Delta V}{\Delta t}$ , где  $\rho_0$  — плотность воздуха. Учитывая мощность тепловых потерь ( $N_{\text{пот}} = \alpha \Delta T$ ), можно получить уравнение, описывающее связь подводимой мощности и разности температур:

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

### 3. Проведение эксперимента

1. Подготовим к работе газовый счетчик, убедимся в его работоспособности.
2. Убедимся в том, что калориметр охлажден до комнатной температуры, продув его с помощью компрессора.
3. Включим вольтметры и амперметр.
4. Зафиксируем показания температуры и давления в лаборатории:

$$t_0 = 21,9 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad P_0 = 1000,8 \text{ гПа}$$

5. Определим максимальный расход газового счетчика. Он равен 5 л/30 с. Сопротивление проволоки нагревателя равно  $R_{\text{н}} = 29 \text{ Ом}$ . С помощью этих данных можно оценить силу тока  $I_0$ , необходимую чтобы нагреть воздух на  $\Delta T_0 = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$I_0 = \sqrt{\frac{N_0}{R_{\text{н}}}} = \sqrt{\frac{c_p \rho_0 q \Delta T_0}{R_{\text{н}}}} \approx 83 \text{ мА}$$

6. Проведем измерения зависимости разности температур от мощности нагрева  $\Delta T(N)$  для значения расхода  $q_1$ , близкого к максимальному. Постепенно повышая силу тока, пропускаемого через нагревательный элемент, и выжидая между измерениями время, достаточное для установления термодинамического равновесия между термпарой и потоком воздуха, получим несколько значений. Занесем их в таблицу 1. Само же значение расхода может быть определено с помощью секундомера по формуле:  $q = \frac{5 \text{ л}}{t}$ .  $t_1 = 39,2 \pm 0,3 \text{ с}$ ,  $q_1 = 151 \pm 1 \frac{\text{мл}}{\text{с}}$ .
7. После окончания серии измерений охладим калориметр до комнатной температуры.
8. Повторим измерения для другого значения расхода воздуха:  $t_2 = 91,4 \pm 0,5 \text{ с}$ ,  $q_2 = 64,8 \pm 0,4 \frac{\text{мл}}{\text{с}}$ .
9. Выключим источник питания, охладим калориметр до комнатной температуры.

## 4. Обработка данных

11. Построим график зависимости  $\Delta T(N)$  для каждого расхода воздуха. Видно, что зависимость может быть аппроксимирована прямой. Проведем через точки прямую МНК и найдем угловые коэффициенты  $k$ :

$$k_1 = 4,7 \pm 0,3 \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}, \quad k_2 = 8,7 \pm 0,5 \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$$

12. Используя полученные данные, определим значения  $c_p$  и  $\alpha$ :

$$c_p = \frac{1/k_1 - 1/k_2}{q_1 - q_2}, \quad \varepsilon_{c_p} = \sqrt{\frac{\sigma_{k_1}^2 k_2^4 + \sigma_{k_2}^2 k_1^4}{(k_1 k_2 (k_1 - k_2))^2} + \frac{\sigma_{q_1}^2 + \sigma_{q_2}^2}{(q_1 - q_2)^2}} = 15\%$$

$$\alpha = \frac{q_1/k_2 - q_2/k_1}{q_1 - q_2}, \quad \varepsilon_\alpha = \sqrt{\frac{q_2^2 k_2^4 \sigma_{k_1}^2 + q_1^2 k_1^4 \sigma_{k_2}^2}{(k_1 k_2 (q_1 k_1 - q_2 k_2))^2} + \frac{(k_1 - k_2)^2 (q_2^2 \sigma_{q_1}^2 + q_1^2 \sigma_{q_2}^2)}{((q_1 - q_2)(q_1 k_1 - q_2 k_2))^2}} = 18\%$$

$$c_p = 1,02 \pm 0,15 \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$\alpha = 49 \pm 9 \frac{\text{МВт}}{^\circ\text{C}}$$

Определим величину теплопотерь  $N_{\text{пот}}/N$ :

$$\frac{N_{\text{пот}}}{N} = \frac{\alpha \Delta T}{(c_p q + \alpha) \Delta T} = \frac{1}{1 + c_p q / \alpha}, \quad \varepsilon_{\frac{N_{\text{пот}}}{N}} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{c_p}^2 + \varepsilon_q^2 + \varepsilon_\alpha^2}}{1 + \alpha / c_p q}$$

$$\left( \frac{N_{\text{пот}}}{N} \right)_1 = 24 \pm 4\%, \quad \left( \frac{N_{\text{пот}}}{N} \right)_2 = 42 \pm 6\%$$

## 5. Вывод

Табличное значение удельной теплоемкости воздуха –  $c_{p0} = 1,03 \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot ^\circ\text{C}}$ , что попадает в пределы погрешности. Это говорит об успешном выполнении лабораторной работы.

## 6. Приложения

$q_1 = 151 \text{ мг/с}$					$q_2 = 64,8 \text{ мг/с}$				
$I, \text{ мА}$	$U, \text{ В}$	$N, \text{ Вт}$	$\mathcal{E}, \text{ В}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$I, \text{ мА}$	$U, \text{ В}$	$N, \text{ Вт}$	$\mathcal{E}, \text{ В}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$
122,0	3,508	0,428	86	2,11	89,2	2,558	0,228	84	2,06
199,7	5,747	1,148	216	5,31	121,6	3,492	0,425	141	3,46
210,3	6,054	1,273	245	6,02	152,1	4,370	0,665	220	5,41
215,0	6,183	1,329	258	6,34	199,9	5,742	1,148	375	9,21
218,4	6,282	1,372	269	6,61	216,3	6,218	1,345	465	11,4

Таблица 1: Результаты проведенных измерений

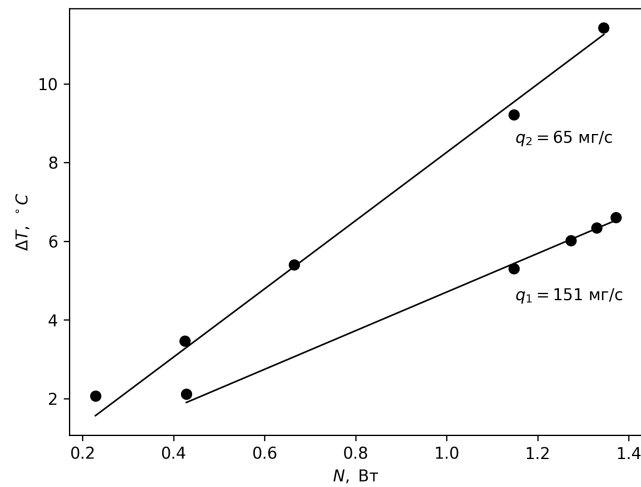


Рис. 2: Зависимость  $\Delta T(N)$  для различных значений  $q$