

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
Физтех-школа радиотехники и компьютерных технологий



**Лабораторная работа 2.1.1**  
Измерение удельной теплоёмкости воздуха  
при постоянном давлении

Автор:  
Григорьев Даниил  
Б01-407

# 1. Аннотация

**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); термомпара, подключенная к микровольтметру; компрессор; газовый счётчик; секундомер.

# 2. Теоретические сведения

Теплоёмкость тела в некотором процессе определяется как их отношение:

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

Необходимо, чтобы количество тепла, затрачиваемое на нагревание исследуемого тела, существенно превосходило тепло, расходуемое на нагревание самого калориметра, а также на потери тепла из установки.

Для увеличения количества нагреваемого газа при неизменных размерах установки в нашей работе исследуемый газ (воздух) продвигается через калориметр, внутри которого установлен нагреватель. При этом измеряются мощность нагревателя, масса воздуха, протекающего в единицу времени (расход), и приращение его температуры.

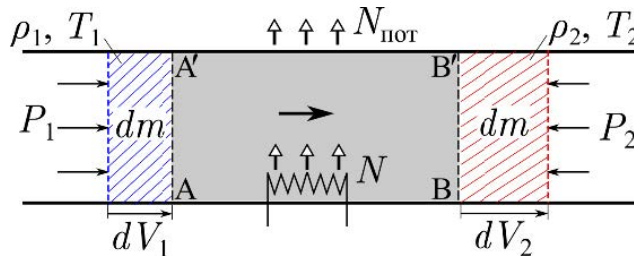


Рис. 1: Нагрев газа при течении по трубе

Рассмотрим газ, протекающий стационарно слева направо через трубу постоянного сечения, в которой установлен нагревательный элемент (см. рис. 1). Пусть за некоторое время  $dt$  через калориметр прошла малая порция газа массой  $dm = q dt$ , 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):  $\delta Q = c dm \Delta T$ , где  $\Delta T = T_2 - T_1$  — 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 теплоёмкость при постоянном давлении  $c_P$ . Таким образом, получаем

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

### 3. 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.

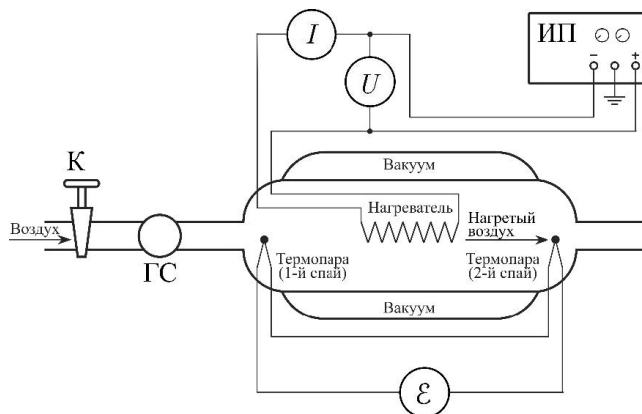


Рис. 2: Схема экспериментальной установки

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  $\Delta T$  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  $\varepsilon$  пропорциональна разности температур  $\Delta T$  спаев:

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

где  $\beta = 40.7 \frac{\text{мкВ}}{\text{К}}$  — чувствительность медно-константановой термопары в рабочем диапазоне температур (20–30 °C). ЭДС регистрируется с помощью микровольтметра.

Объём воздуха, прошедшего через калориметр, измеряется газовым счётчиком ГС. Для регулировки расхода служит кран К. Время  $\Delta t$  прохождения некоторого объёма  $\Delta V$  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  $\rho_0$  — плотность воздуха при комнатной температуре, которая в свою очередь может быть получена из уравнения Менделеева–Клапейрона:  $\rho_0 = \frac{\mu P_0}{RT_0}$ , где  $P_0$  — атмосферное давление,  $T_0$  — комнатная температура (в Кельвинах),  $\mu = 29,0 \text{ г/моль}$  — средняя молярная масса (сухого) воздуха.

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:

$$N_{\text{пот}} = \alpha \Delta T \quad (6)$$

где  $\alpha$  — 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 ( $\Delta T(N)$  — линейная функция).

## 4. Ход работы

1. Подготовим к работе газовый счетчик: проверим, что он заполнен водой, установим счётчик по уровню. Охладим калориметр до комнатной температуры. Включим вольтметр, предназначенный для измерения ЭДС термопары.
2. Запишем показания комнатной температуры и давления.

$$T_0 = 297.4 \text{ K}, P_0 = 100470 \pm 5 \text{ Па}$$

3. Установим максимальный расход воздуха на газовом счётчике — 5 л за  $30 \pm 0.5$  с. Определим массовый расход воздуха  $q_0$  [г/с].

$$q_0 = \rho_0 \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\mu P_0}{RT_0} \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

Относительная погрешность косвенных измерений может быть найдена по формуле

$$\sigma_{q_0} = \sqrt{\sigma_{T_0}^2 + \sigma_{P_0}^2 + \sigma_t^2}$$

$$\frac{\Delta V_0}{\Delta t_0} = 0.1667 \pm 0.0027 \frac{\text{л}}{\text{с}}, \quad q_0 = 0.1939 \pm 0.0032 \frac{\text{г}}{\text{с}}$$

4. Оценим величину тока нагревателя  $I_0$ , требуемого для нагрева воздуха на  $\delta T = 1$  К. Определим теоретическое значение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении  $C_{m,P}^{\text{теор}} \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot \text{К}}$ , считая воздух идеальным двухатомным газом:

$$C_{m,P}^{\text{теор}} = \frac{3.5R}{\mu} \approx 1003 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Оценим минимальную мощность  $N_0$ , необходимую для нагрева газа при максимальном расходе.  $N_0 = c_p q \Delta T + N_{\text{пот}} \approx c_p q \Delta T \approx 0.194$  Вт.

Учитывая, что сопротивление проволоки нагревателя составляет приблизительно  $R_{\text{н}} \approx 29$  Ом, искомое значение тока  $I_0 = \sqrt{\frac{N_0}{R_{\text{н}}}} \approx 0.08$  А.

5. Отметим, что погрешности последующих измерений таковы:

$$\Delta I = 0.05 \text{ мА}, \quad \Delta U = 0.5 \text{ мВ}, \quad \Delta \varepsilon = 1 \text{ мВ}$$

Следовательно, оценим погрешности косвенных величин так:

$$\Delta N = U \Delta I + I \Delta U, \quad \delta T = \frac{\Delta \varepsilon}{\beta} = 0.02 \text{ К}$$

6. Проведем измерение зависимости разности температур от мощности нагрева  $\Delta T(N)$  при максимальном расходе воздуха  $q_0 = 0.1939 \pm 0.0032 \frac{\text{г}}{\text{с}}$ . (Таблица №1, график №1).

Таблица 1: Измерение  $\Delta T(N)$  при  $q_0 = 0.1939 \pm 0.0032 \frac{\text{г}}{\text{с}}$

$U$ , В	$I$ , мА	$N$ , мВт	$\Delta N$ , мВт	$\varepsilon$ , мВ	$\Delta T$ , К
3.458	121.9	421.5	0.2	0.071	1.47
4.526	159.4	721.4	0.3	0.120	2.95
5.880	206.9	1216.6	0.4	0.205	5.04
7.820	274.8	2148.9	0.5	0.359	8.82

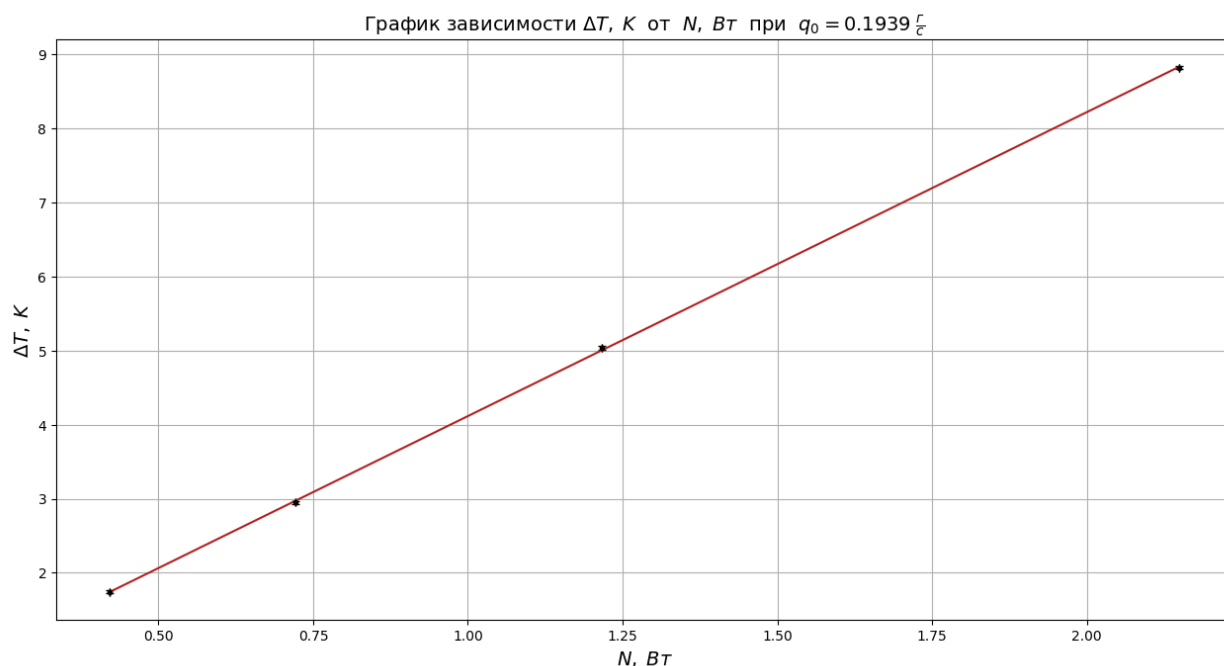


Рис. 3: График №1

Коэффициент наклона графика №1:  $k_1 = 4.104 \pm 0.002 \frac{\text{К}}{\text{Вт}}$

7. Завершив первую серию измерения, охладим калориметр до комнатной температуры. Для этого отключим источник питания нагревателя, откроем кран К и продуем калориметр при максимальном расходе воздуха до тех пор, пока показания ЭДС не достигнут нуля.

Повторим измерения при другом расходе. Установим расход воздуха на газовом счётчике – 5л за  $61 \pm 0.5$ с. Определим массовый расход воздуха  $q_1$  [г/с].

$$\frac{\Delta V_1}{\Delta t_1} = 0.0820 \pm 0.0007 \frac{\text{л}}{\text{с}}, \quad q_1 = 0.0955 \pm 0.0008 \frac{\text{г}}{\text{с}}$$

8. Проведем измерение зависимости разности температур от мощности нагрева  $\Delta T(N)$  при максимальном расходе воздуха  $q_1 = 0.0955 \pm 0.0008 \frac{\text{г}}{\text{с}}$ . (Таблица №2, график №2).

Таблица 2: Измерение  $\Delta T(N)$  при  $q_1 = 0.0955 \pm 0.0008 \frac{\text{г}}{\text{с}}$

$U$ , В	$I$ , мА	$N$ , мВт	$\Delta N$ , мВт	$\varepsilon$ , мВ	$\Delta T$ , К
3.499	123.3	431.4	0.2	0.129	3.17
4.417	155.5	686.8	0.3	0.205	5.04
5.511	193.8	1068.0	0.4	0.313	7.69
6.138	215.8	1304.6	0.4	0.388	9.53

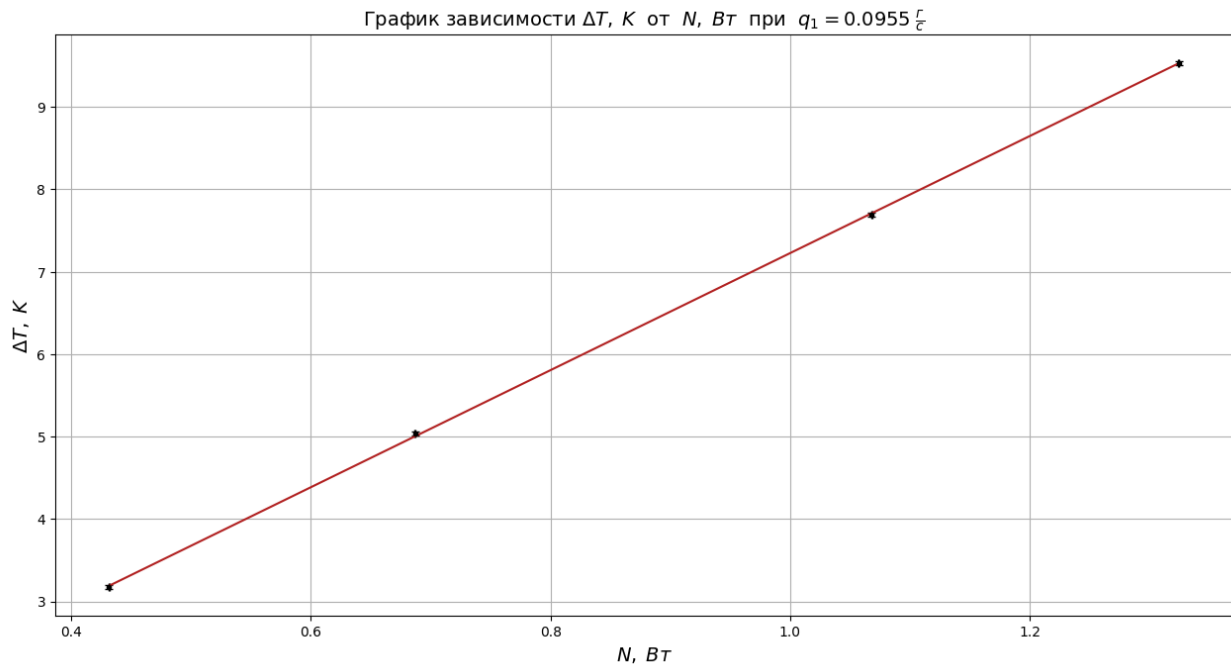


Рис. 4: График №2

Коэффициент наклона графика №2:  $k_2 = 7.099 \pm 0.002 \frac{\text{К}}{\text{Вт}}$

9. Остаётся найти  $C_p$ , пользуясь формулой (7).

$$k_1 = 4.104 \pm 0.002 \frac{\text{К}}{\text{Вт}} \Rightarrow \left( \frac{N}{\Delta T} \right)_1 = \frac{1}{k_1} = 0.2437 \pm 0.0001 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

$$k_2 = 7.099 \pm 0.002 \frac{\text{К}}{\text{Вт}} \Rightarrow \left( \frac{N}{\Delta T} \right)_2 = \frac{1}{k_2} = 0.14086 \pm 0.00004 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

Построим график зависимости  $\frac{N}{\Delta T}$ ,  $\frac{\text{мВт}}{\text{К}}$  от  $q$ ,  $\frac{\text{г}}{\text{с}}$  (Таблица №3, график №3)

Коэффициент наклона графика №3:  $c_p = k_3 = 1045 \pm 40 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ .

Таблица 3:  $\frac{N}{\Delta T}, \frac{\text{МВт}}{\text{К}}$  от  $q, \frac{\text{г}}{\text{с}}$

$\frac{N}{\Delta T}, \frac{\text{МВт}}{\text{К}}$	$\Delta \left( \frac{N}{\Delta T} \right), \frac{\text{МВт}}{\text{К}}$	$q, \frac{\text{г}}{\text{с}}$	$\Delta q, \frac{\text{г}}{\text{с}}$
243.7	0.1	0.1939	0.0032
140.86	0.04	0.0955	0.0008

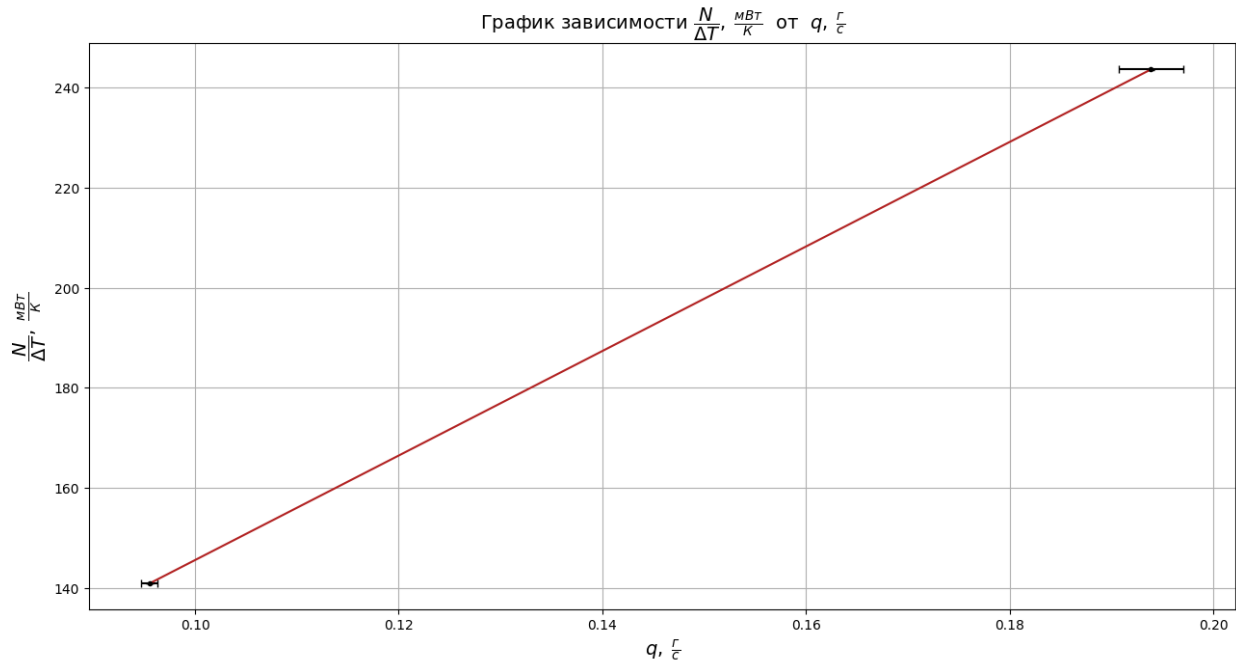


Рис. 5: График №3

## 5. Вывод

В ходе эксперимента при использовании знаний полученных в ходе курса термодинамики было получено значение удельной массовой теплоёмкости воздуха при постоянном давлении. Полученное значение  $C_{m,P} = 1044 \pm 40 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$  хорошо совпало с теоретическим  $C_{m,P}^{\text{теор}} = 1003 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ . В свою очередь, табличное значение для удельной теплоёмкости воздуха варьируется:  $C_{m,P}^{\text{табл}} = 1007 - 1030 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$  при комнатной температуре в зависимости от влажности (нулевая – 100%).

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  $I$ ,  $U$ ,  $\varepsilon$  – не совсем равновесные.