

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

## **Лабораторная работа 2.1.1**

Измерение удельной теплоёмкости воздуха при постоянном  
давлении

Выполнил:  
Гисич Арсений  
Б03-109

Долгопрудный  
2022

# 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.

## 2 Теоретические сведения

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

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

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 (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 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, 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

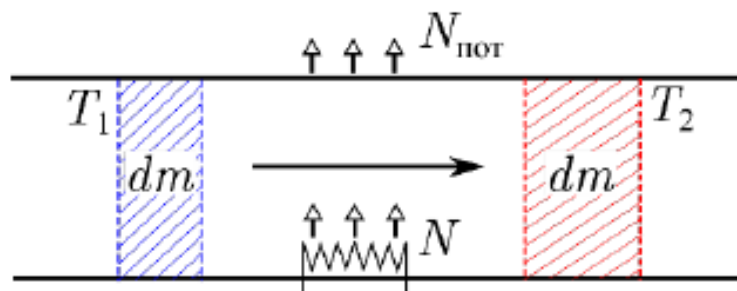


Рис. 1: Нагрев газа при течении по трубе

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

### 3 Методика измерений

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 для минимизации потерь тепла за счет излучения. Воздух из пространства между стенками калориметра откачан до высокого вакуума ( $10^{-5}$  торр) для минимизации потерь тепла, обусловленных теплопроводностью.

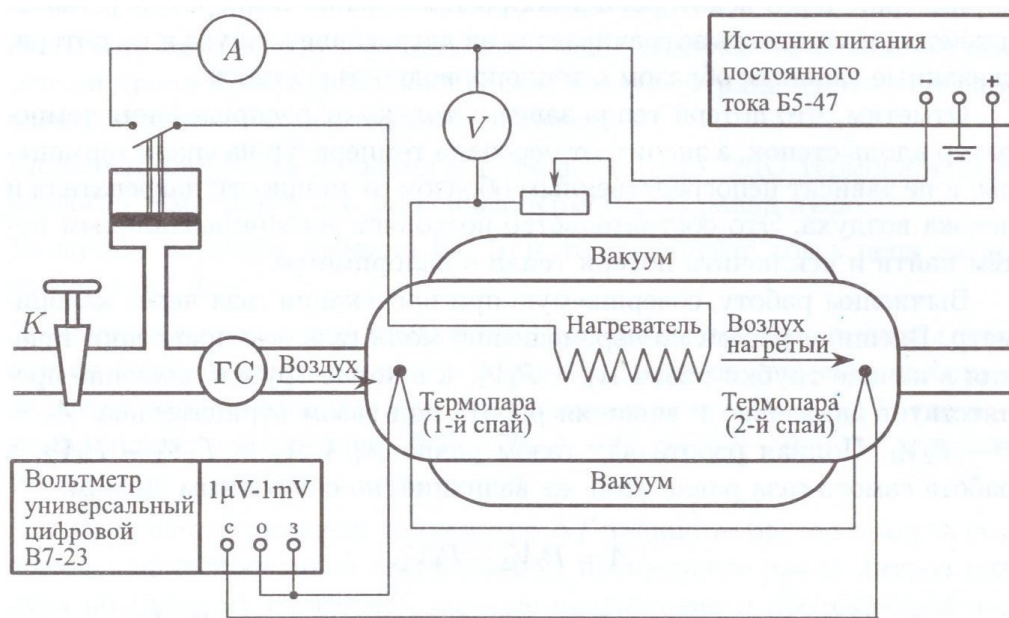


Рис. 2: Схема экспериментальной установки

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

$$N = UI.$$

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:

$$\varepsilon = \beta \Delta T,$$

где  $\beta = 40,7 \frac{\text{мкВ}}{^\circ\text{C}}$  — 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  $\Delta t$  прохождения некоторого объема  $\Delta V$  воздуха измеряется секундомером. Объёмный расход равен  $\Delta V / \Delta t$ , массовый расход может быть найден как

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

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),  $\mu = 29,0$  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:

$$N_{\text{пот}} = \alpha \Delta T, \quad (3)$$

где  $\alpha$  — некоторая константа. При этом условии основное соотношение (2) принимает вид

$$N = (c_p q + \alpha) \Delta T. \quad (4)$$

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

## 4 Используемое оборудование

1. теплоизолированная стеклянная трубка;
2. электронагреватель;
3. источник питания постоянного тока;
4. амперметр, вольтметр (цифровые мультиметры),  $\delta_A = 0,1$  мА;  $\delta_B = 1$  мВ;
5. термопара, подключенная к микровольтметру;
6. компрессор;
7. газовый счётчик,  $\delta_{\text{сч}} = 0,01$  л;
8. секундомер,  $\delta_{\text{сек}} = 0,2$  с.

## 5 Результаты измерений и обработка данных

Начальные условия:

$$P_{\text{атм}} = 98,14 \pm 0,01 \text{ кПа}$$

$$T = 23,7 \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$$

Измерим максимальный расход воздуха  $Q$  по формуле

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta \bar{t}}.$$

Погрешность определяется по формуле

$$\delta_Q = \sqrt{\left(\frac{\delta_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\bar{t}}}{\bar{t}}\right)^2} \cdot Q.$$

Затем по формуле

$$q = \frac{\mu P_{атм}}{RT} \cdot Q$$

определяем массовый расход. Полученные результаты представлены в таб. 1.

$t, c$	$\bar{t}, c$	$\delta_{\bar{t}}, c$	$V, л$	$\delta_V, л$	$Q_{max}, л/c$	$\delta_{Q_{max}}, л/c$	$q_{max}, г/c$	$\delta_{q_{max}}, г/c$
5,08	5,14	0,46	1	0,01	0,194	0,017	0,224	0,020
5,3								
4,96								
5,47								
4,9								

Таблица 1: Расчёт максимального расхода

Оценим минимальную мощность  $N_0$  по формуле (4), где  $c_p = \frac{5}{2} \frac{R}{\mu}$ , так как воздух считаем смесью двухатомных идеальных газов. Получаем  $N_0 \approx 0,161 \text{ Вт}$ . Учитывая сопротивление проволоки нагревателя  $R_n \sim 35 \text{ Ом}$ , оценим  $I_0 = \sqrt{\frac{N_0}{R_n}} \approx 70 \text{ мА}$ .

Проведём первое измерение при  $q_1 = q_{max}$ . Установим начальный ток  $I_1 \sim 2I_0$ . Результаты измерений представлены в таб. 2.

$I, \text{мА}$	$\delta_I, \text{мА}$	$U, \text{В}$	$\delta_U, \text{В}$	$N, \text{Вт}$	$\delta_N, \text{Вт}$	$\varepsilon, \text{мкВ}$	$\delta_\varepsilon, \text{мкВ}$	$\Delta T, ^\circ \text{C}$	$\delta_{\Delta T}, ^\circ \text{C}$
160,2	0,1	4,568	0,001	0,7318	0,0005	116	1	2,85	0,02
182	0,1	5,194	0,001	0,9453	0,0006	144	1	3,54	0,02
203,3	0,1	5,803	0,001	1,1797	0,0006	187	1	4,59	0,02
217,8	0,1	6,218	0,001	1,3543	0,0007	209	1	5,14	0,02

Таблица 2: 1 измерение

Проведём второе измерение при меньшем расходе. По приведённым выше формулам найдём расход воздуха и начальный ток. Результаты измерений представлены в таб. 3.

$t, c$	$\bar{t}, c$	$\delta_{\bar{t}}, c$	$V, л$	$\delta_V, л$	$Q_{max}, л/c$	$\delta_{Q_{max}}, л/c$	$q_{max}, г/c$	$\delta_{q_{max}}, г/c$
14,09	13,76	0,48	1	0,01	0,073	0,003	0,084	0,003
13,85								
13,21								
14,1								
13,55								

Таблица 3: Расчёт второго расхода

Минимальная мощность  $N_0 = 0,057 \text{ Вт}$ ,  $I_0 = 40 \text{ мА}$ . Результаты измерений представлены в таб. 4.

$I, \text{mA}$	$\delta_I, \text{mA}$	$U, \text{B}$	$\delta_U, \text{B}$	$N, \text{Вт}$	$\delta_N, \text{Вт}$	$\varepsilon, \text{мкВ}$	$\delta_\varepsilon, \text{мкВ}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\Delta T}, ^\circ\text{C}$
96,3	0,1	2,742	0,001	0,2641	0,0003	86	1	2,11	0,02
127,6	0,1	3,638	0,001	0,4642	0,0004	151	1	3,71	0,02
180,1	0,1	5,141	0,001	0,9259	0,0005	262	1	6,44	0,02
214,7	0,1	6,135	0,001	1,3172	0,0006	383	1	9,41	0,02

Таблица 4: 2 измерение

График зависимости  $\Delta T(N)$  представлен на рис. 3.

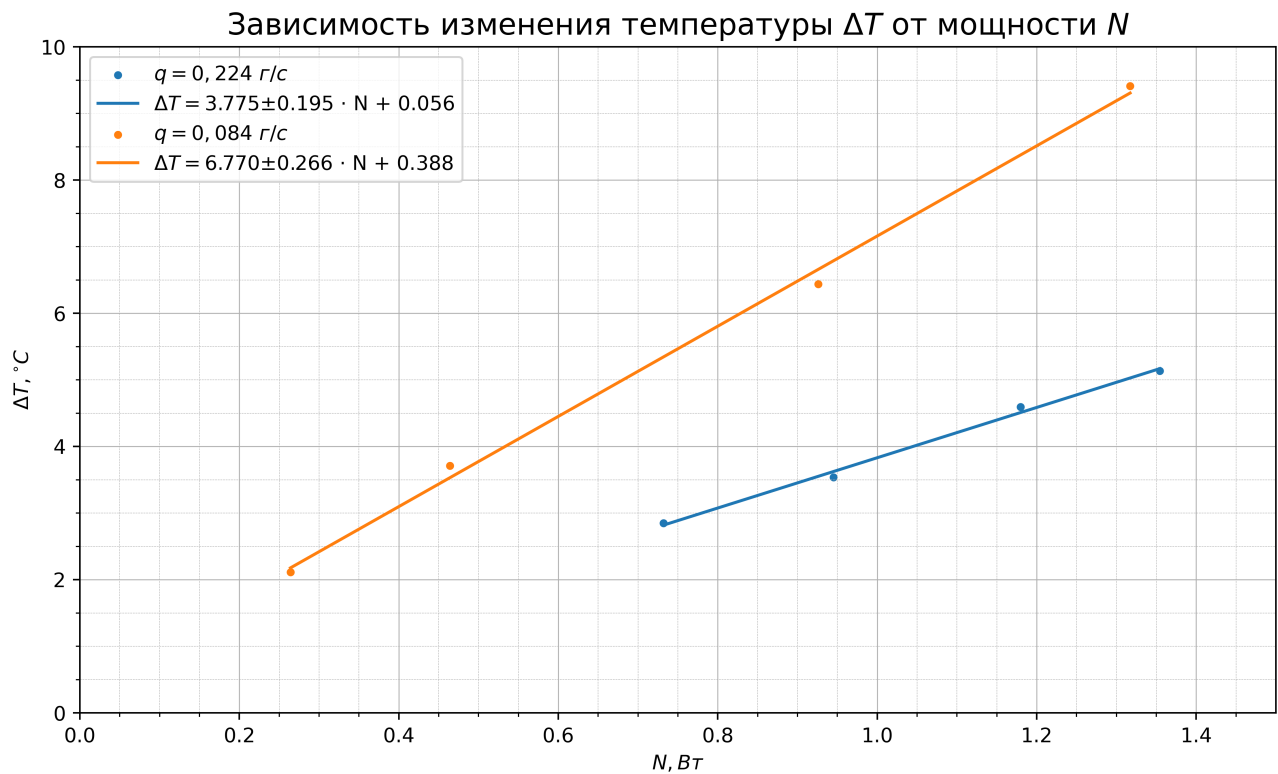


Рис. 3:

Из формулы (4) получаем удельную теплоёмкость

$$c_p = \left( \frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_2} \right) \cdot \frac{1}{q_1 - q_2}.$$

Погрешность определяется по формуле

$$\delta_{c_p} = \sqrt{\left( \frac{\left( \frac{\delta_{k_1}}{k_1^2} \right)^2 + \left( \frac{\delta_{k_2}}{k_2^2} \right)^2}{(k_1^{-1} - k_2^{-1})^2} \right) + \left( \frac{\delta_{q_1}^2 + \delta_{q_2}^2}{(q_1 - q_2)^2} \right) \cdot c_p}.$$

Получаем

$$c_p = 837,01 \pm 160,91 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}} = (2,9 \pm 0,6) R \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{K}}.$$

Из формул (3) и (4) получаем долю тепловых потерь

$$\frac{N_{nom}}{N} = \alpha k_1 = 1 - k_1 c_p q_1.$$

Погрешность определяется по формуле

$$\delta_{\frac{N_{nom}}{N}} = \sqrt{\left(\frac{\delta_{k_1}}{k_1}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{c_p}}{c_p}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{q_1}}{q_1}\right)^2} \cdot (1 - k_1 c_p q_1).$$

Получаем

$$\boxed{\frac{N_{nom}}{N} = 0,29 \pm 0,06}.$$

## 6 Обсуждение результатов и выводы

В данной работе исследовалась зависимость повышения температуры воздуха от мощности подводимого тепла и расхода при стационарном течении через трубку. По результатам измерений определялась удельная теплоёмкость воздуха при постоянном давлении. Полученное значение:

$$\boxed{c_p = 837,01 \pm 160,91 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}}.$$

Использованный в работе метод измерений позволяет достичь относительной точности результатов в 19%. Полученный результат согласуется с табличным значением —  $1003 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ . Основной вклад в погрешность вносит погрешность определения расхода. Также в данной работе была определена доля тепловых потерь:

$$\boxed{\frac{N_{nom}}{N} = 0,29 \pm 0,06}.$$