

# Отчет о выполнении лабораторной работы 2.1.1

## Измерение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении

Исламов Сардор, группа Б02-111

7 февраля 2022 г.

**Аннотация.** В работе изучена зависимость повышения температуры от мощности подводимого тепла и расхода при стационарном течении через трубу. Исключив тепловые потери, по результатам измерений определена теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

### Теоретические сведения

Теплоемкость тела в некотором процессе определяется как отношение подводимого к телу тепла и изменения его температуры:

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

Надежность измерения зависит от качества установки. Необходимо, чтобы количество тепла, затрачиваемого на нагрев тела, во много превосходило тепло, расходуемое на нагрев установки и потерю тепла в окружающую среду.

Рассмотрим газ, протекающий стационарно слева направо через трубу постоянного сечения, в которой установлен нагревательный элемент мощностью  $N$  (рис. 1).

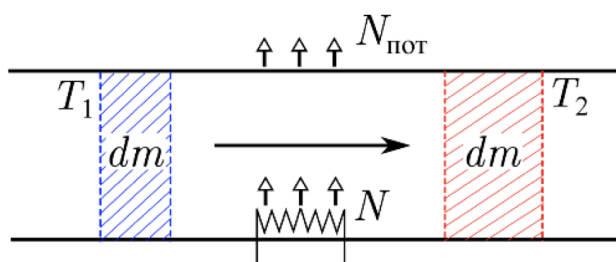


Рис. 1: Нагрев газа при течении по трубе

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 тепловых потерь равна  $N_{\text{пот}}$ , то газ получил тепло  $\delta Q = (N - N_{\text{пот}})dt$ . С другой стороны  $\delta Q = cdm\Delta T$ , где  $\Delta T = T_2 - T_1$  — приращение температуры газа, и  $c$  — удельная теплоемкость газа в этом процессе. При малых расходах газа и большом диаметре трубы перепад давления на ее концах мал, т.е. можно принять, что  $P_1 \approx P_2 \approx P_0$ , где  $P_0$  — атмосферное давление. Таким образом получаем выражение для удельной теплоемкости при постоянном давлении

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

## Экспериментальные методы

**В работе используются:** теплоизолированная стеклянная трубка; электронагреватель; источник питания постоянного тока; амперметр, вольтметр (цифровые мультиметры); термопара, подключенная к микровольтметру; компрессор; газовый счётчик; секундомер.

Схема установки изображена на рис. 2

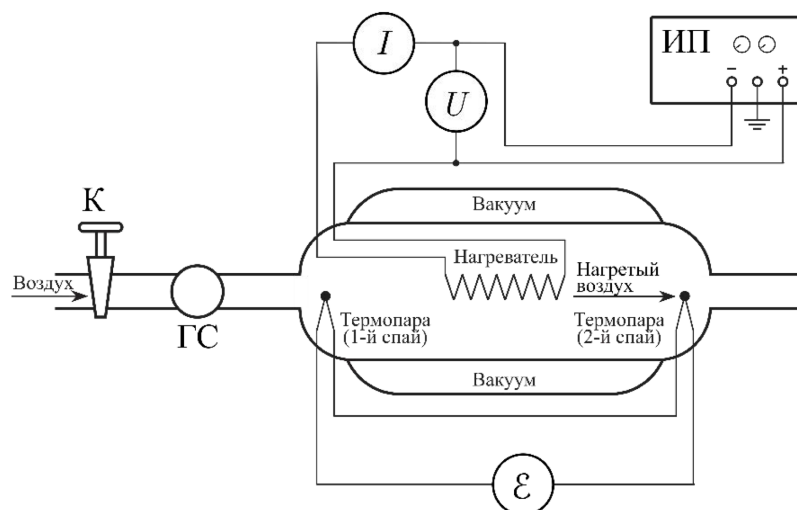


Рис. 2: Схема экспериментальной установки

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

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  $\beta = 40.7 \frac{\text{мкВ}}{^\circ\text{C}}$  — 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 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).

## Методика измерений и обработка данных

1. Подготовим к работе газовый счетчик: проверим, заполнен ли он водой, установим счетчик по уровню.
2. Начинать измерения следует при условии, что калориметр охлажден до комнатной температуры. Для охлаждения включим компрессор и открывая кран К, установим максимально возможный расход воздуха. Источник постоянного тока должен быть при этом выключен.
3. Снимем показания давления, температуры и относительной влажности в комнате.

$P, \text{кПа}$	$\sigma_P, \text{кПа}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_T, ^\circ\text{C}$	$\varphi$	$\sigma_\varphi$
98.325	0.001	22	0.1	48	1

Таблица 1: Характерные параметры воздуха в помещении

4. С помощью газового счетчика и секундомера измерим максимальный расход воздуха  $\Delta V / \Delta t$  в л/с. Максимальный расход  $q_{\text{max}}$  рассчитаем по формуле (5).

$$\rho_0 = 1.163 \text{ кг/м}^3, \sigma_\rho = \rho_0 \sqrt{\left(\frac{\sigma_P}{P_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{T_0}\right)^2} \approx 0.005 \text{ кг/м}^3$$

5. Оценим величину тока нагревателя  $I_0$ , требуемого для нагрева воздуха на  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ . Для этого

- 5.1 Определим теоретическое значение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении  $c_p^{\text{теор}} \approx 10^3 \text{ Дж/кг К}$ , считая воздух смесью идеальных двухатомных газов;

$\Delta V, \text{ л}$	$\sigma_V, \text{ л}$	$\Delta t, \text{ с}$	$\sigma_t, \text{ с}$	$q_{\max}, \text{ г/с}$	$\sigma_q, \text{ г/с}$
15.0	0.1	74.5	0.5	0.235	0.002
15.0	0.1	74.7	0.5	0.235	0.002
15.0	0.1	74.6	0.5	0.235	0.002

Таблица 2: Измерения для  $q = 0.235 \text{ г/с}$

5.2 Оценим минимальную мощность  $N_0$  ( $N \geq c_p q \Delta T$ ), необходимую для нагрева газа при максимальном расходе  $q_{\max}$  на  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ .  $N_0 = 0.235 \text{ Вт}$ ;

5.3 Учитывая что сопротивление проволоки нагревателя составляет приблизительно  $R_{\text{н}} \approx 35 \text{ Ом}$  и в процессе опыта практически не меняется, определим искомое значение тока

$$I_0 = \sqrt{\frac{N_0}{R_{\text{н}}}} \approx 81,94 \text{ мА}.$$

6. Проведем измерение зависимости разности температур от мощности нагрева  $\Delta T(N)$  при максимальном расходе воздуха  $q_1 = q_{\max}$ .

6.1 Чтобы начать нагрев, включим источник питания (ИП) нагревателя и установим на нем такое напряжение, чтобы ток через нить накаливания составлял  $I_1 \sim (2 \div 2.5)I_0$ . Запишем значения тока  $I$  и напряжения  $U$  в цепи. Расчитаем мощность нагрева  $N$ , а также сопротивление нити нагревателя  $R_{\text{н}}$ .

6.2 После включения нагрева (или после изменения его мощности) дождемся установления стационарного состояния системы.

6.3 По величине  $\varepsilon$  определим значение  $\Delta T$ . Учитывая, что  $\Delta T \sim N \sim I^2$ , определим значения токов канала, необходимые для того, чтобы равномерно повышать температуру нагрева  $\Delta T$  до требуемого значения. Проведем измерения согласно пп. 6.1-6.2, последовательно увеличивая ток нагрева до расчетных значений.

$I, \text{ мА}$	$\sigma_I, \text{ мА}$	$U, \text{ В}$	$\sigma_U, \text{ В}$	$N, \text{ мВт}$	$\sigma_N, \text{ мВт}$	$\varepsilon, \mu\text{В}$	$\sigma_\varepsilon, \mu\text{В}$	$\Delta T, \text{ К}$	$\sigma_T, \text{ К}$
77.09	0.01	2.73	0.01	210.38	0.68	29	1	0.71	0.02
89.98	0.01	3.18	0.01	286.50	0.93	41	1	1.01	0.02
118.56	0.01	4.19	0.01	497.0	1.6	72	1	1.77	0.02
135.04	0.01	4.77	0.02	644.4	2.1	95	1	2.33	0.02
163.86	0.02	5.79	0.02	948.6	3.1	140	1	3.44	0.02

Таблица 3: Измерения для  $q = 0.235 \text{ г/с}$

7. Проведем измерения для другого значения расхода воздуха. Соответствующие значения занесем в таблицы (4) и (5).

$\Delta V, \text{ л}$	$\sigma_V, \text{ л}$	$\Delta t, \text{ с}$	$\sigma_t, \text{ с}$	$q_{\max}, \text{ г/с}$	$\sigma_q, \text{ г/с}$
15.0	0.1	99.9	0.5	0.175	0.002
15.0	0.1	100.2	0.5	0.174	0.002
15.0	0.1	100.0	0.5	0.174	0.002

Таблица 4: Измерения для  $q = 0.174 \text{ г/с}$

$I, \text{мА}$	$\sigma_I, \text{мА}$	$U, \text{В}$	$\sigma_U, \text{В}$	$N, \text{Вт}$	$\sigma_N, \text{Вт}$	$\varepsilon, \mu\text{В}$	$\sigma_\varepsilon, \mu\text{В}$	$\Delta T, \text{К}$	$\sigma_T, \text{К}$
63.09	0.01	2.25	0.01	141.74	0.45	23	1	0.57	0.02
79.88	0.01	2.84	0.01	226.62	0.73	40	1	0.98	0.02
113.19	0.01	4.01	0.01	453.7	1.5	85	1	2.09	0.02
142.52	0.01	5.03	0.02	717.0	2.3	144	1	3.54	0.02
179.84	0.02	6.35	0.02	1141.1	3.7	225	1	5.53	0.02

Таблица 5: Измерения для  $q = 0.174 \text{ г/с}$

08.02.2022  
wld.

8. Построим графики зависимости  $\Delta T(N)$  для каждого значения расхода воздуха  $q$ . Видно, что точки хорошо ложатся на прямую, значит тепловые потери пропорциональны разности температур. Коэффициенты наклона прямых найдем по МНК.

$$k_1 = (3.60 \pm 0.02) \cdot 10^{-3} \text{ Вт/К}, k_2 = (4.82 \pm 0.06) \cdot 10^{-3} \text{ Вт/К}.$$

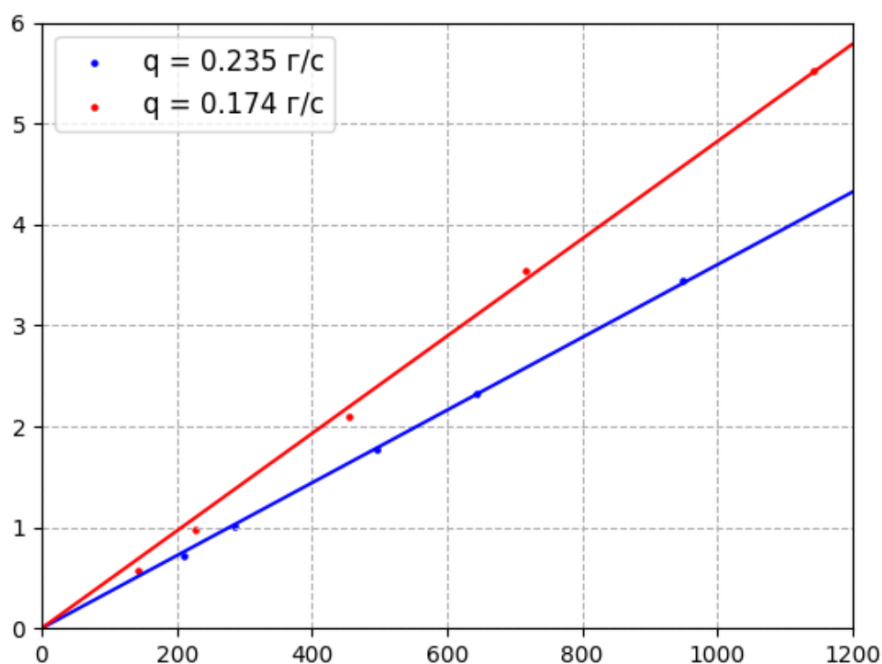


Рис. 3: Графики зависимости  $\Delta T(N)$

9. Пользуясь формулой (7) и полученными значениями получаем

$$c_p = \frac{\frac{N_1}{\Delta T_1} - \frac{N_2}{\Delta T_2}}{q_1 - q_2} = \frac{\frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_2}}{q_1 - q_2} = 1152 \frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}$$

$$\sigma_{c_p} = \sqrt{\left(\frac{\partial c_p}{\partial k_1} \sigma_{k_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial c_p}{\partial k_2} \sigma_{k_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial c_p}{\partial q_1} \sigma_{q_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial c_p}{\partial q_2} \sigma_{q_2}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\sigma_{k_1}}{k_1^2(q_1 - q_2)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{k_2}}{k_2^2(q_1 - q_2)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{c_p q_1}}{q_1 - q_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{c_p q_2}}{q_1 - q_2}\right)^2} \approx 75 \frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}$$

Теперь, пользуясь полученным значением  $c_p$  и формулой (7), определим  $\frac{N_{\text{пот}}}{N}$ .

$$N = c_p q \Delta T + N_{\text{пот}} \Rightarrow \frac{N_{\text{пот}}}{N} = 1 - c_p q_1 k_1 \approx 0.025$$

$$\sigma_{N_{\text{пот}}/N} = N_{\text{пот}}/N \sqrt{\left(\frac{\sigma_{c_p}}{c_p}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{q_1}}{q_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{k_1}}{k_1}\right)^2} \approx 0.002$$

## Вывод

В ходе работы изучена зависимость повышения температуры от мощности подводимого тепла и расхода при стационарном течении через трубу. На основе полученных данных выяснено, что тепловые потери пропорциональны разнице температур. Исключив потери тепла, отношение которых к подводимой мощности составляет  $\frac{N_{\text{пот}}}{N} = 0.025 \pm 0.002$  ( $\varepsilon = 8\%$ ), определена удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении  $c_p = (1152 \pm 75) \frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}$  ( $\varepsilon = 7\%$ ). Небольшое отличие полученного значения от табличного  $c_p = 1000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}$  может быть связано с высокой влажностью воздуха в помещении, неучитывающейся при расчете плотности.