

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

Отчёт по лабораторной работы 2.1.1
ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЁМКОСТИ ВОЗДУХА ПРИ
ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ.

Выполнил студент:

Сериков Василий Романович

группа: Б03-102

Москва, 2022 г.

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.

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 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, 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. 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 $\Delta T = T_2 - T_1$ — приращение температуры газа, c — удельная теплоёмкость газа в рассматриваемом процессе. При малых расходах газа и достаточно большом диаметре трубы перепад давления на её концах мал, потому 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

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

Течение газа по трубе: В общем случае давление на входе может заметно превышать таковое на выходе (например, если труба достаточно узкая и длинная). Рассмотрим течение газа более детально, чтобы выяснить пределы применимости $P = \text{const}$. Обозначим индексом 1 параметры газа на входе в трубку, индексом 2 — на выходе из неё. Рассмотрим область, мысленно ограниченную двумя неподвижными плоскостями слева и справа от нагревателя и применим к ней закон сохранения энергии.

Пусть за время dt газ сместился слева направо на малое расстояние вдоль трубки, такое что через левую границу прошёл газ объёмом dV_1 а через правую — dV_2 . В силу закона сохранения массы имеем

$$m = \rho_1 dV_1 = \rho_2 dV_2,$$

где $dm = qdt$ — масса газа, прошедшего через некоторое сечение трубки. Изменение внутренней энергии газа в рассматриваемой области за счет переноса вещества составило $dU = (u_2 - u_1)dm$, где $u_{1,2}$ — удельные внутренние энергии. Внешние силы совершили работу по перемещению газа $\partial A = P_1 dV_1 - P_2 dV_2$, или с учётом предыдущей формулы:

$$\partial A = -\left(\frac{P_2}{\rho_2} - \frac{P_1}{\rho_1}\right)dm.$$

Учтем также изменение кинетической энергии течения газа, равное $dK = \frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2)dm$, где $v_{1,2}$ — скорости течения. Наконец, пусть ∂Q — количество тепла, суммарно полученное газом в рассматриваемой области — включая тепло от нагревателя, теплопередачу через стенки и торцы, тепловыделение при трении и т. д. В стационарном состоянии энергия газа, заполняющего калориметр, неизменна, поэтому

$$dU - dA + dK = \partial Q$$

Полученное удобно записать в виде

$$(i_2 - i_1 + \frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2})dm = \partial Q,$$

где $i = u + \frac{P}{\rho}$ — удельная энтальпия газа. Это соотношение справедливо для любой стационарно текущей непрерывной среды и представляет собой обобщение известного уравнения Бернулли, учитывающее выделение и потери тепла. Оно справедливо при условии, что в системе устанавливается не только стационарное течение, но и стационарное распределение температуры. Последнее весьма важно для нашего опыта, поскольку время установления может быть довольно велико.

Если предположить, что кинетическая энергия течения мала по сравнению с энергией нагрева ($dK \ll \partial Q$), то получим

$$(i_2 - i_1)dm = \partial Q,$$

то есть полученное газом тепло идёт на приращение его энтальпии.

В условиях опыта газ с хорошей точностью можно считать идеальным: $P/\rho = RT/\mu$, а теплоёмкость c_p (или c_v) не зависящей от температуры. Тогда энтальпия (и внутренняя энергия) газа зависит только от температуры и равна $\Delta i = c_p \Delta T$ (т. к. $\Delta u = c_v \Delta T$ и $c_p = c_v + \frac{R}{\mu}$).

Методика измерений:

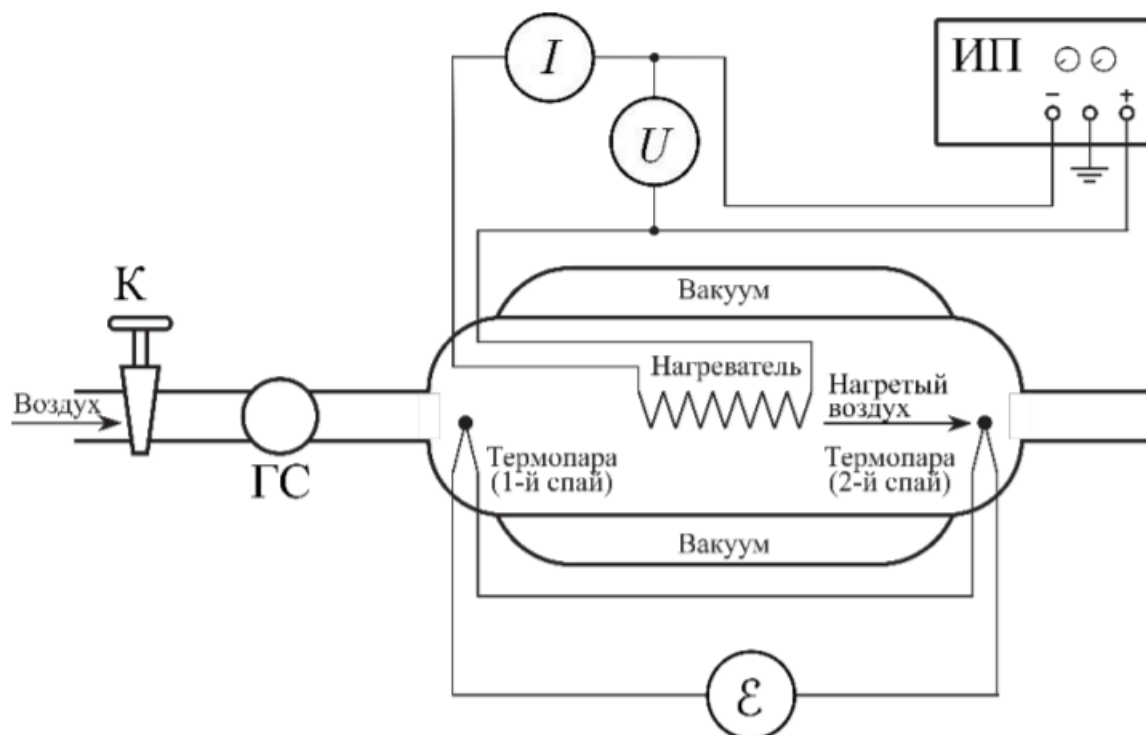


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Схема установки изображена на рис. 1. 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. 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 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 вдоль калориметра, а медные проводники подключены к цифровому вольтметру. Возникающая в термопаре ЭДС пропорциональна разности температур ΔT спаев:

$$\mathcal{E} = \beta \Delta T,$$

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

Объём воздуха, прошедшего через калориметр, измеряется газовым счётчиком ГС. Для регулировки служит кран К. Время Δt прохождения некоторого объёма ΔV воздуха измеряется секундомером. Объёмный расход может быть найден как

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

где ρ — 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), $\mu = 29,0 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$ — средняя молярная масса (сухого) воздуха.

Учитывая особенности калориметра, следует ожидать, что мощность нагревателя расходуется не только на нагрев массы прокачиваемого воздуха, но и частично теряется за счёт 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:

$$N_{\text{пот}} = \alpha \Delta T$$

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

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

Используемое оборудование:

Теплоизолированная стеклянная трубка; электронагреватель; источник питания постоянного тока; амперметр, вольтметр (цифровые мультиметры); термopapa, подключенная к микровольтметру; компрессор; газовый счётчик; секундомер.

Результаты измерений и обработка данных:

1. Запишем начальные данные: $t_0 = 20,7^\circ\text{C}$ — температура в кабинете, $P_0 = 102,05$ кПа — давление, $\phi_0 = 15,3\%$ — влажность, $R = 35$ Ом — сопротивление проволоки. $\sigma_V = \pm 0,01\text{л}$, $\sigma_{\Delta t} = 0,1$ с, $\sigma_\varepsilon = \pm 1 \cdot 10^{-6}\text{В}$, $\sigma_U = \pm 0,01$ В, $\sigma_I = \pm 1 \cdot 10^{-5}$ А
2. С помощью газового счетчика и секундомера измерим максимальный расход воздуха, определим среднее значение и вычислим массовый расход. Данные занесем в таблицу.

$\Delta V, \text{л}$	$\Delta t, \text{с}$	$q, \text{л/с}$
1	5,2	0,192
2	9,8	0,204
3	15,2	0,197
4	20,3	0,197
5	25,3	0,197
$q_{max} = 0,197 \pm 0,003 \text{ л/с}$		
$q_{max}^{\text{масс}} = 0,236 \pm 0,006 \text{ г/с}$		

Таблица 1: Результаты вычислений для q_{max} и $q_{max}^{\text{масс}}$.

3. Оценим величину тока нагревателя I_0 требуемого для нагрева воздуха на $\Delta T_0 = 1^\circ\text{C}$. Для этого оценим минимальную мощность N_0 , необходимую для нагрева газа при максимальном расходе q_{max} на $\Delta T_0 = 1^\circ\text{C}$, тогда $I_0 = \sqrt{\frac{N_0}{R}}$

$$N_0 = c_p q \Delta T = (0,236 \pm 0,006) \text{ Вт} \Rightarrow I_0 = (0,082 \pm 0,002) \text{ А}$$

4. . Проведем измерение зависимости разности температур от мощности нагрева $T(N)$ при максимальном расходе воздуха. Данные занесем в таблицу.

$I, \text{мА}$	$U, \text{В}$	$\varepsilon, \text{мВ}$	$\Delta T, \text{К}$	$N, \text{Вт}$	$R, \text{Ом}$
82,5	2,91	0.34	0.835	0,239	35,15
116,1	4,14	0.68	1,67	0,476	35,31
145,3	5,18	0.106	2,60	0,741	35,1
165,4	5,82	0.140	3,44	0,959	35,06

Таблица 2: Измерение $\Delta T(N)$ для q_{max}

5. Повторим пункты 1-4 для 2-х других значений q . Получим Результаты вычислений для q_i и $q_i^{\text{масс}}$, $i = 1, 2$

$\Delta V, \text{л}$	$\Delta t, \text{с}$	$q, \text{л/с}$
1	5,4	0,183
2	10,8	0,184
3	15,9	0,188
4	21,3	0,187
5	26,5	0,188
$q_1 = 0,186 \pm 0,003 \text{ л/с}$		
$q_1^{\text{масс}} = 0,223 \pm 0,005 \text{ г/с}$		

$\Delta V, \text{л}$	$\Delta t, \text{с}$	$q, \text{л/с}$
1	5,9	0,167
2	11,6	0,171
3	17,9	0,167
4	23,6	0,169
5	259,6	0,168
$q_2 = 0,168 \pm 0,003 \text{ л/с}$		
$q_2^{\text{масс}} = 0,202 \pm 0,005 \text{ г/с}$		

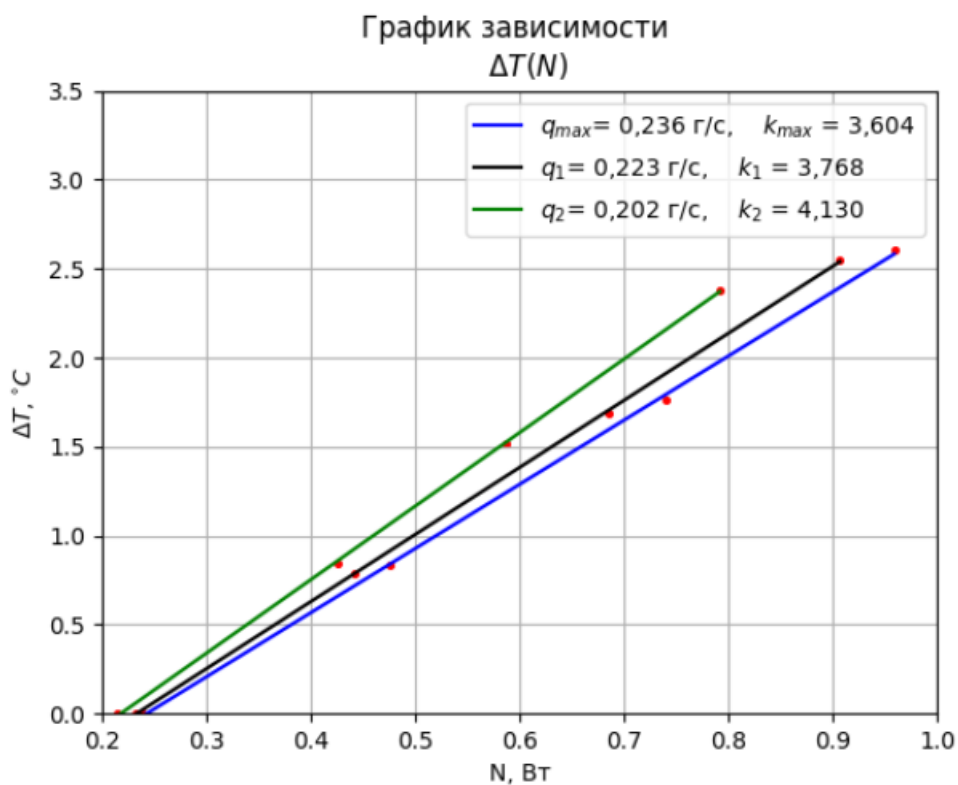
$I, \text{мА}$	$U, \text{В}$	$\varepsilon, \text{мВ}$	$\Delta T, \text{К}$	$N, \text{Вт}$	$R, \text{Ом}$
81,2	2,86	0.33	0.81	0,232	35,22
112,2	3,94	0.65	1,6	0,442	35,11
139,7	4,91	0.102	2,5	0,686	35,14
160,7	5,65	0.137	3,36	0,907	35,15

Таблица 5: Измерение $\Delta T(N)$ для q_1

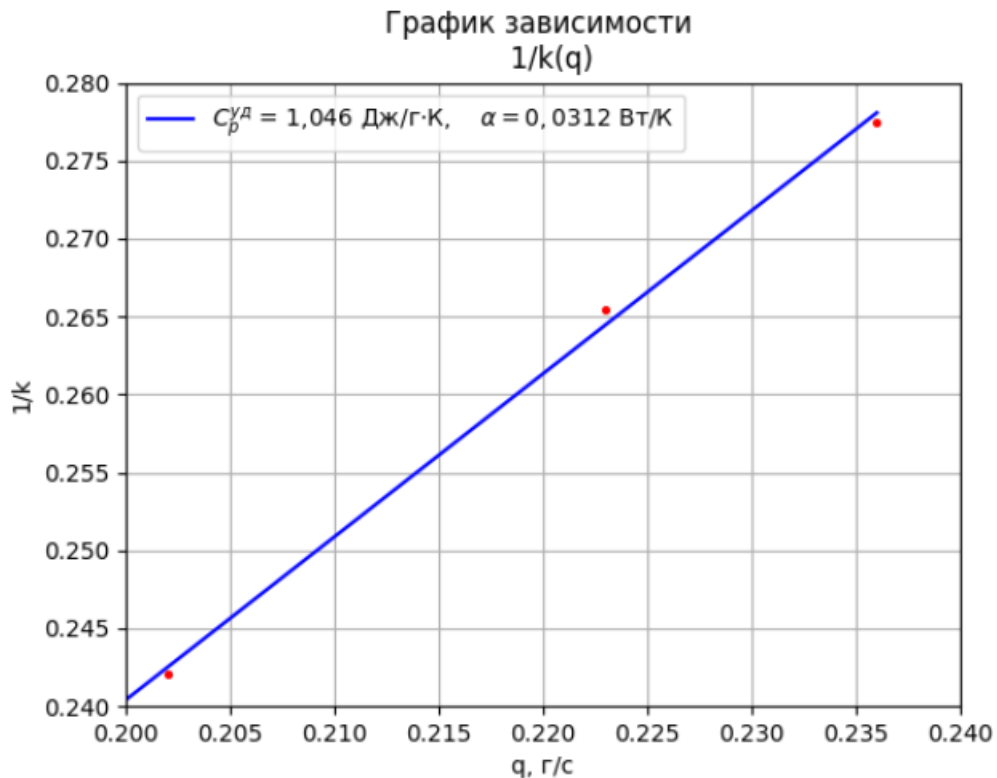
$I, \text{мА}$	$U, \text{В}$	$\varepsilon, \text{мВ}$	$\Delta T, \text{К}$	$N, \text{Вт}$	$R, \text{Ом}$
78	2,76	0.31	0.76	0,215	35,38
109,7	3,88	0.65	1,6	0,425	35,36
129	4,55	0.093	2,28	0,587	35,27
149,8	5,29	0.128	3,14	0,792	35,31

Таблица 6: Измерение $\Delta T(N)$ для q_2

6. Построим графики зависимости $\Delta T(N)$ для каждого расхода q , найдем угловые коэффициенты, полученных прямых.



7. Построим график зависимости $1/k(q)$ и по наклону прямой определим теплоёмкость воздуха c_p



8. Таким образом $C_p = 30 \pm 1 \text{ Дж/К}\cdot\text{моль}$

9. Определим доли тепловых потерь: $\frac{N_{\text{пот}}}{N} = \alpha \cdot k$

$q, \text{ г/с}$	$\frac{N_{\text{пот}}}{N}$
0,236	$0,11 \pm 0.01$
0,223	$0,12 \pm 0.01$
0,202	$0,129 \pm 0.014$

Обсуждение результатов:

Мы определили молярную теплоемкость воздуха при постоянном давлении, которая составляет $C_p = 30 \pm 1 \text{ Дж/К}\cdot\text{моль}$, что в пределах погрешности совпадает с табличным значением ($C_p = 29,2 \text{ Дж/К}\cdot\text{моль}$). Также мы оценили с хорошей точностью отношения $\frac{N_{\text{пот}}}{N}$ ($\varepsilon \approx 10\%$).

Выводы:

В ходе данной работы мы измерили повышение температуры воздуха в зависимости от мощности подводимого тепла и расхода при стационарном течении через трубу; исключили тепловые потери и по результатам измерений определили теплоёмкость воздуха при постоянном давлении.