

Работа 2.1.1
**Измерение удельной теплоемкости воздуха при
постоянном давлении**

Трунов Владимир
Б01-103

17 февраля 2022 г.

Цель работы

1. Измерение повышения температуры воздуха в результате подвода тепла при стационарном течении через стеклянную трубу;
2. Вычисление при постоянном давлении теплоемкости воздуха.

Введение

Теоретическая справка

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

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

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 (см.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

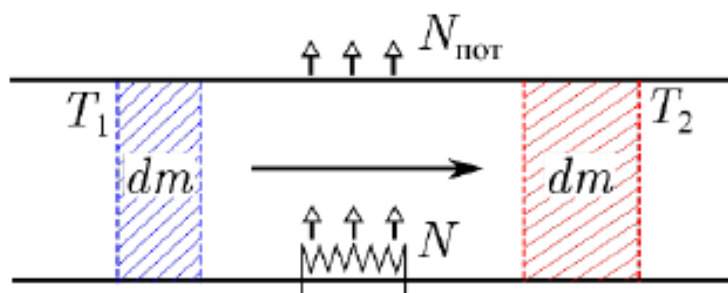


Рис. 1: Нагрев газа при течении по трубе

давление. Следовательно, в условиях опыта измеряется удельная теплоёмкость при постоянном давлении c_p . Таким образом, получаем

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

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. 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.

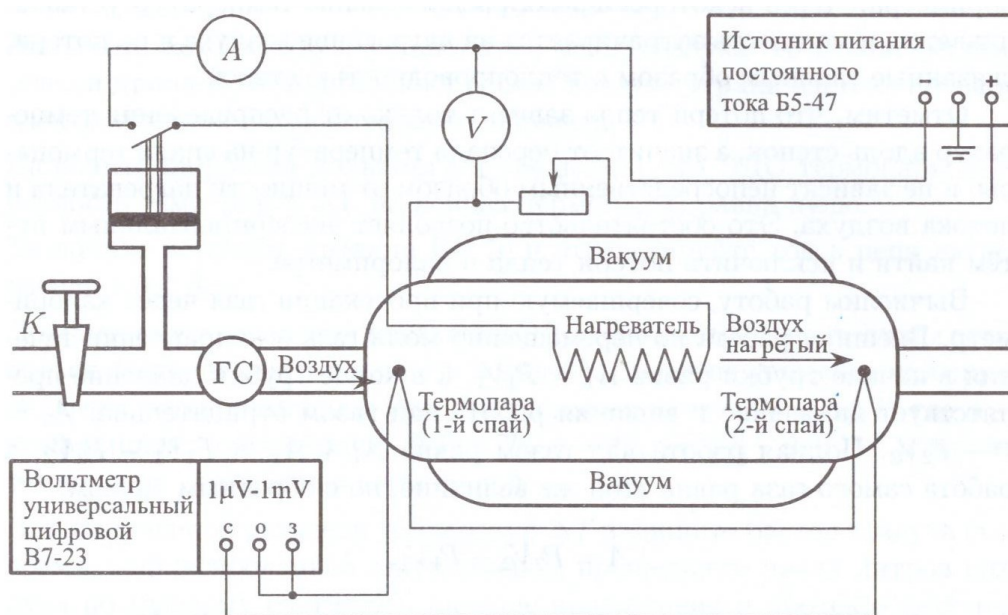


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

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 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 внутри калориметра, а медные проводники подключены к цифровому вольтметру. Возникающая в термопаре ЭДС ε пропорциональна разности температур ΔT 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 (20-30 $^\circ\text{C}$). ЭДС регистрируется с помощью микровольтметра.

Объём воздуха, прошедшего через калориметр, измеряется газовым счётчиком ГС. Для регулировки расхода служит кран К. Время Δt прохождения некоторого объёма ΔV воздуха измеряется секундомером. Объёмный расход равен $\Delta V/\Delta t$, массовый расход может быть найден как

$$q = \rho_0 \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (5)$$

где ρ_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:

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

где α — 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).

Ход работы

Подготовка к эксперименту

1. подготавливаем к работе газовый счетчик: проверяем, заполнен ли он водой, устанавливаем счетчик по уровню.
2. Начинать измерения следует при условии, что калориметр охлажден до комнатной температуры. Для охлаждения включаем компрессор и открывая кран К, устанавливаем максимально возможный расход воздуха. **Источник постоянного тока при этом выключен!** Для проверки корректности работы газового счетчика стоит убедиться, что при постоянном расходе его стрелка вращается равномерно.
3. Включаем вольтметр, предназначенный для измерения ЭДС термопары. Если показания вольтметра отличны от нуля, продуваем калориметр воздухом до полного охлаждения калориметра (т.е. до установления нуля на цифровом дисплее вольтметра).
4. Запишем значения температуры и давления в комнате, необходимые для расчета расхода прокачиваемого воздуха. По психрометру определяем значение влажности воздуха в комнате.

	Значение
p , Па	98525
T , °C	21
φ	39%

5. С помощью газового счетчика и секундомера измерьте максимальный расход воздуха $\Delta V/\Delta t$ (в л/с). Измерения проведите несколько раз и определите среднее значение расхода. Вычислите соответствующий массовый расход воздуха $q_{max} \approx 0,23$ г/с, пользуясь формулой (5).

ρ , г/л	$C_p^{theor}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
1,1502	1007

1					
ΔV , л	σ_V , л	Δt , с	σ_t , с	q_{max} , г/с	σ_q , г/с
5	0,1	25	0,5	0,238	0,004
5	0,1	25.4	0,5	0,235	0,004
5	0,1	24.7	0,5	0,241	0,004

2					
ΔV , л	σ_V , л	Δt , с	σ_t , с	q_1 , г/с	σ_q , г/с
5	0,1	42,7	0,5	0,139	0,004
5	0,1	41	0,5	0,145	0,004
5	0,1	44	0,5	0,135	0,004

6. Оцениваем величину тока нагревателя I_0 , требуемого для нагрева воздуха на $\Delta T = 1^\circ\text{C}$. Для этого определяем теоретическое значение удельной теплоёмкости воздуха при постоянном давлении c_p^{theor} [Дж/г·К], считая воздух смесью двухатомных идеальных газов; оцениваем минимальную мощность $N_0 \approx (0,238 \pm 0,003)$ Вт ($N \geq c_p q \Delta T$), необходимую для нагрева газа при максимальном расходе q_{max} на $\Delta T_0 = 1^\circ\text{C}$; учитывая, что сопротивление проволоки нагревателя составляет приблизительно $R_H \approx 35$ Ом и в процессе опыта практически не меняется, определяем искомое значение тока

$$I_0 = \sqrt{\frac{N_0}{R_H}} \approx 82 \text{ mA}$$

Проведение измерений

7. Проведите измерение зависимости разности температур от мощности нагрева $\Delta T(N)$ при максимальном расходе воздуха $q_1 = q_{max}$. Рекомендуется измерить 4-5 точек в диапазоне температур ΔT от $\approx 2^\circ\text{C}$ до $\approx 10^\circ\text{C}$.

7.1 Чтобы начать нагрев, включаем источник питания (ИП) нагревателя и устанавливаем на нём такое напряжение, чтобы ток через нить нагревателя составлял $I_1 \sim (2 \div 2,5)I_0$ (см. п. 6). Записываем значения тока I и напряжения U в цепи. Рассчитайте мощность N нагрева, а также сопротивление нити нагревателя R_n .

7.2 После включения нагрева (или после изменения его мощности) ожидаем установления стационарного состояния системы. Первоначальный прогрев калориметра происходит достаточно долго (~ 10 минут). Значения ЭДС ε вольтметра, подключенного к термопаре, должны оставаться постоянными (в пределах точности прибора) в течение 1-2 минут.

7.3 По величине ε определите значение ΔT (см. (4)). Учитывая, что $\Delta T \propto N \propto I^2$, определяем значения токов накала, необходимые для того, чтобы равномерно повышать температуру нагрева ΔT до требуемого значения. Проводим измерения согласно пп. 7.1.-7.2, последовательно увеличивая ток нагрева до расчётных значений.

8. Повторяем измерения по п. 7 по крайней мере ещё для одного значения расхода воздуха.

$q_1 = (0,238 \pm 0,004), \text{ г/с}$					
$I, \text{ мА}$	98,55	125,31	140,51	152,08	173,86
$\sigma_I, \text{ мА}$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$U, \text{ В}$	3,563	4,522	5,071	5,492	6,272
$\sigma_U, \text{ В}$	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
$\Delta U_{thermopara}, \text{ мкВ}$	44	75	95	115	155
$\sigma_{\Delta U_{thermopara}}, \text{ мкВ}$	1	1	1	1	1
$R, \text{ Ом}$	34,93	34,94	34,96	34,98	34,99
$\sigma_R, \text{ Ом}$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$N, \text{ Вт}$	0,3512	0,5666	0,7125	0,8352	1,0904
$\sigma_N, \text{ Вт}$	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
$\Delta T, \text{ К}$	1,080	1,840	2,334	2,826	3,810
$\sigma_{\Delta T}, \text{ К}$	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

$q_2 = (0,139 \pm 0,001), \text{ г/с}$					
$I, \text{ мА}$	97,39	113,2	127,32	145,50	174,12
$\sigma_I, \text{ мА}$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$U, \text{ В}$	3,526	4,092	4,590	5,244	6,264
$\sigma_U, \text{ В}$	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
$\Delta U_{thermopara}, \text{ мкВ}$	65	96	125	165	245
$\sigma_{\Delta U_{thermopara}}, \text{ мкВ}$	1	1	1	1	1
$R, \text{ Ом}$	35,18	35,28	35,31	35,04	35,29
$\sigma_R, \text{ Ом}$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$N, \text{ Вт}$	0,3434	0,4632	0,5844	0,7630	1,091
$\sigma_N, \text{ Вт}$	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
$\Delta T, \text{ К}$	1,59	2,36	3,07	4,05	6,02
$\sigma_{\Delta T}, \text{ К}$	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Обработка результатов измерений

9. Строим графики зависимости $\Delta T(N)$ для каждого расхода воздуха q . Проверяем, выполняется ли предположение о том, что тепловые потери пропорциональные разности температур. Аппроксимируя зависимость прямой $y = kx$, найдите угловые коэффициенты k для каждого расхода.

График $\Delta T(N)$ для q_{\max}

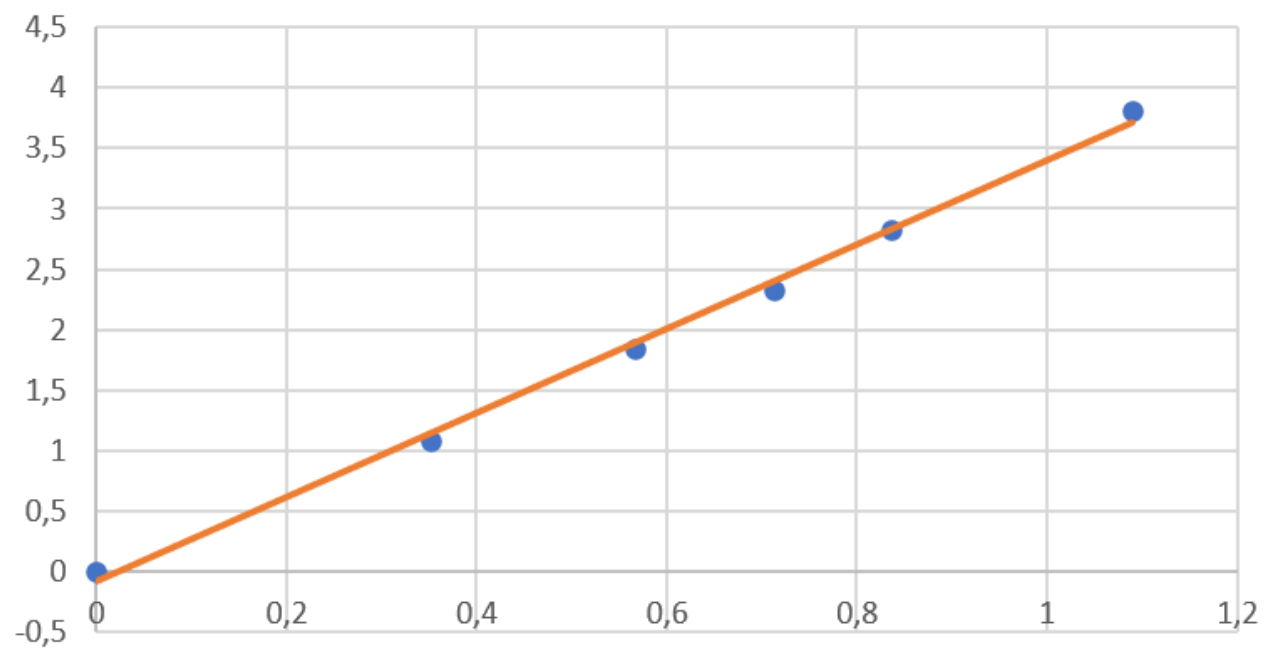


График для q_{\max}

График $\Delta T(N)$ для q_1

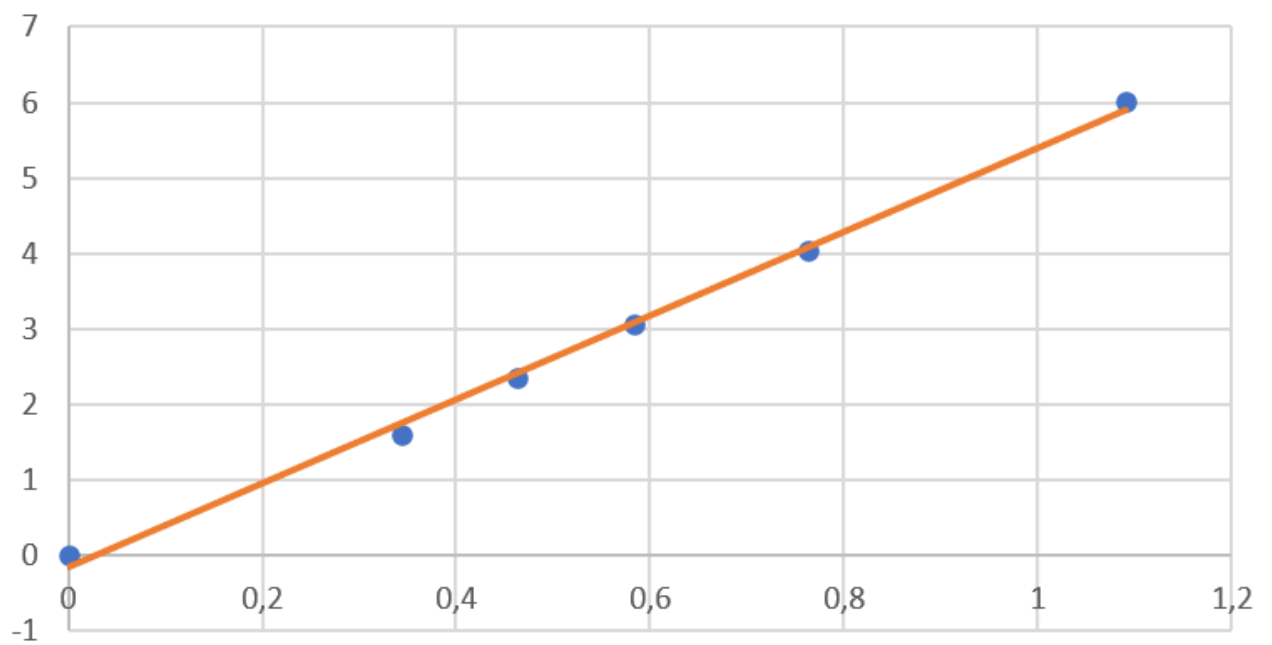


График для q_1

Вывод

1. Анализируем зависимость наклона k от расхода q и, пользуясь формулой (7), определяем $c_p \approx (1070 \pm 35)$ Дж/(кг · К), $N_{\text{пот}}/N \approx (0,278 \pm 0,04)$. Найденное значение удельной теплоемкости воздуха с учетом погрешности практически совпадает с табличным значением. Для большой точности следовало провести серию из большего числа экспериментов и дольше ждать установление режима при определенных параметрах системы.

k , Вт/К	σ_k , Вт/К	q , г/с	σ_q , г/с
0,286	0,008	0,238	0,004
0,180	0,005	0,139	0,004