

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(государственный университет)

Лабораторная работа 2.1.1

# ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЁМКОСТИ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

Составители:  
*Смирнова О.И.*  
*Попов П.В.*

**Из лаборатории не выносить!**  
Электронная версия доступна на сайте кафедры общей физики  
[physics.mipt.ru/S\\_II/lab](http://physics.mipt.ru/S_II/lab)

Долгопрудный 2018

## Измерение удельной теплоёмкости воздуха при постоянном давлении

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

### Введение

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  $\delta Q$ , 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 (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  $N$ ,

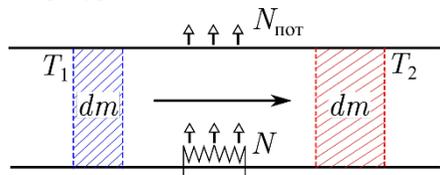


Рис. 1. Нагрев газа при течении по трубе

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

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

### 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 соотношения (2). Обозначим индексом 1 параметры газа на входе в трубку, индексом 2 — на выходе из неё. Рассмотрим область, мысленно ограниченную двумя неподвижными плоскостями слева (AA') и справа (BB') от нагревателя (отмечено серым на рис. 2) и применим к ней закон сохранения энергии.

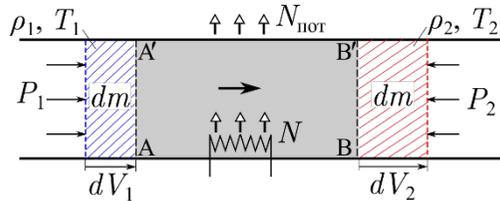


Рис. 2.

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

$$dm = \rho_1 dV_1 = \rho_2 dV_2, \quad (3)$$

где  $dm = q dt$  — масса газа, прошедшего через некоторое сечение трубки. Изменение внутренней энергии газа в рассматриваемой области за счёт переноса вещества составило  $dU = (u_2 - u_1)dm$ , где  $u_{1,2}$  — удельные внутренние энергии. Внешние силы совершили работу по перемещению газа  $\delta A' = P_1 dV_1 - P_2 dV_2$ , или с учётом (3):

\* Перепад давлений  $\Delta P$  при течении по прямой трубе может быть обусловлен вязкостью газа. Для ламинарного стационарного течения он может быть вычислен из формулы Пуазейля (см. работы 1.3.3 и 2.2.5):

$$\Delta P = \frac{8\eta Lq}{\pi r^4},$$

где  $r$  — радиус трубы,  $L$  — её длина,  $\eta$  — вязкость газа.

† При первом чтении данный раздел можно опустить.

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

Учтём 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  $\delta Q$  — 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

$$dU - dA' + dK = \delta Q.$$

Полученное удобно переписать в виде

$$\left(i_2 - i_1 + \frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2}\right) dm = \delta Q, \quad (4)$$

где  $i = u + \frac{P}{\rho}$  — удельная энтальпия газа.

Соотношение (4) 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 ( $dK \ll \delta Q$ ), то получим

$$(i_2 - i_1)dm = \delta Q, \quad (5)$$

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 его теплоёмкость  $c_p$  (или  $c_v$ ) не зависящей от температуры. Тогда энтальпия (и внутренняя энергия) газа зависит только от температуры и равна  $\Delta i^{\text{ид.г.}} = c_p \Delta T$  (т.к.  $\Delta u^{\text{ид.г.}} = c_v \Delta T$  и  $c_p = c_v + \frac{R}{\mu}$ ). Нетрудно видеть, что в таком случае соотношение (5) переходит в (2).

Итак, более подробное рассмотрение позволяет установить, что формула (2) справедлива даже в том случае, если перепад давлений на концах трубы не мал, при условии, что газ можно считать идеальным\*, а его кинетической энергией можно пренебречь. Кроме того, для практического использования (2) должны быть малы потери тепла и тепловыделение из-за трения (по сравнению с мощностью нагревателя).

---

\* Заметим, что и для произвольного вещества соотношение  $\Delta i = c_p \Delta T$  также имеет место, но только в *изобарном* процессе, то есть при  $P_1 = P_2$ , что, впрочем, в нашей работе выполняется с хорошей точностью.

## Экспериментальная установка

Схема установки изображена на рис. 3. 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.

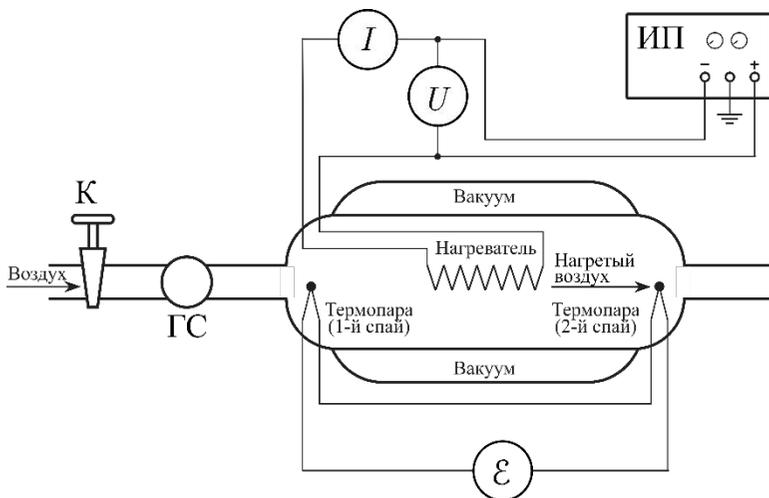


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

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

$$N = UI. \quad (6)$$

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  $\mathcal{E}$  пропорциональна разности температур  $\Delta T$  спаев:

$$\mathcal{E} = \beta \Delta T, \quad (7)$$

где  $\beta = 40,7 \frac{\text{мкВ}}{\text{°C}}$  — 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  $\Delta V/\Delta t$ , *массовый* расход может быть найден как

$$q = \rho_0 \frac{\Delta V}{\Delta t}, \quad (8)$$

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:

$$N_{\text{пот}} = \alpha \Delta T, \quad (9)$$

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

$$N = (c_p q + \alpha) \Delta T \quad (10)$$

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

### Методика измерений

В настоящем эксперименте предлагается провести измерение зависимости  $\Delta T(N)$  разности температур  $\Delta T$  концов термопары от мощности нагрева  $N = UI$  при нескольких фиксированных значениях расхода  $q$  воздуха. По результатам измерений проверить справедливость зависимости (10) и определить удельную теплоёмкость воздуха при постоянном давлении  $c_p$ , а также оценить величину тепловых потерь.

Важнейшим условием корректности проведения опыта является установление стационарного состояния. Время установления может достигать 10–15 минут. Снятие показаний рекомендуется производить когда показания вольтметра, подключенного к термопаре, не меняются в течение 1–2 минут. Кроме того, необходимо учитывать, что охлаждение системы занимает существенно большее время, нежели нагрев, поэтому при измерениях мощность нагрева

нужно *увеличивать* постепенно. Охлаждение установки для повторного снятия зависимости производится при максимальном расходе воздуха и выключенном нагревателе; время, необходимое для охлаждения, может достигать 20-30 минут.

### Внимание!

Для предотвращения перегорания нити нагревателя не рекомендуется включать нагреватель без продува воздуха через калориметр.

## ЗАДАНИЕ

### Подготовка к эксперименту

1. Подготовьте к работе газовый счетчик: проверьте, заполнен ли он водой, установите счетчик по уровню.

2. Начинать измерения следует при условии, что калориметр охлажден до комнатной температуры. Для охлаждения включите компрессор и открывая кран К, установите **максимально** возможный расход воздуха. Источник постоянного тока должен быть при этом **выключен!**

Для проверки корректности работы газового счетчика стоит убедиться, что при постоянном расходе его стрелка вращается равномерно.

3. Включите вольтметр, предназначенный для измерения ЭДС термопары. Если показания вольтметра отличны от нуля, следует продувать калориметр воздухом до полного охлаждения калориметра (т.е. до установления нуля на цифровом дисплее вольтметра).\*

4. Запишите значения температуры и давления в комнате, необходимые для расчета расхода прокачиваемого воздуха. По психрометру определите значение влажности воздуха в комнате.

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  $q_{\max}$  [г/с], пользуясь формулой (8).

6. Оцените величину тока нагревателя  $I_0$ , требуемого для нагрева воздуха на  $\Delta T_0 = 1$  °С. Для этого 1) определите теоретическое значение удельной теплоёмкости воздуха при постоянном давлении  $c_p^{\text{теор}}$  [Дж/г·К], считая воздух смесью двухатомных идеальных газов; 2) оцените минимальную мощность  $N_0$  [Вт] ( $N \geq c_p q \Delta T$ ), необходимую для нагрева газа при максимальном рас-

---

\* Если показания не спадают до нуля, убедитесь, что в комнате вблизи установки отсутствуют значимые перепады температуры (отсутствуют сквозняки, закрыты окна и т.п.)

ходе  $q_{\max}$  на  $\Delta T_0 = 1^\circ\text{C}$ ; 3) учитывая, что сопротивление проволоки нагревателя составляет приблизительно  $R_H \sim 35$  Ом и в процессе опыта практически не меняется\*, определите искомое значение тока  $I_0 = \sqrt{\frac{N_0}{R_H}}$ .

### 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  $\Delta T$  от  $\sim 2^\circ\text{C}$  до  $\sim 10^\circ\text{C}$ .

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

7.2. После включения нагрева (или после изменения его мощности) дождитесь установления стационарного состояния системы. Первоначальный прогрев калориметра происходит достаточно долго ( $\sim 10$  минут). Значения ЭДС  $\mathcal{E}$  вольтметра, подключенного к термопаре, должны оставаться постоянными (в пределах точности прибора) в течение 1-2 минут.

7.3. По величине  $\mathcal{E}$  определите значение  $\Delta T$  (см. (7)). Учитывая, что  $\Delta T \propto N \propto I^2$ , определите значения токов накала, необходимые для того, чтобы равномерно повышать температуру нагрева  $\Delta T$  до требуемого значения. Проведите измерения согласно пп. 7.1.-7.2, последовательно увеличивая ток нагрева до расчётных значений.

8. Завершив первую серию измерений, **охладите калориметр до комнатной температуры**. Для этого отключите источник питания нагревателя, откройте кран К и продувайте калориметр при максимальном расходе воздуха до тех пор, пока показания ЭДС не достигнут нуля.

9. Повторите измерения по п. 7 по крайней мере ещё для одного значения расхода воздуха. **Внимание!** Начинать каждую следующую серию опытов следует только после полного охлаждения калориметра до комнатной температуры.

10. После завершения опытов выключите источник питания нагревателя и мультиметры. Кран К откройте для максимального продува воздуха через калориметр. Сообщите лаборанту об окончании работы.

---

\* Температурный коэффициент сопротивления нихрома  $\frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ .

## Обработка результатов измерений

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

12. Проанализируйте зависимость наклона  $k$  от расхода  $q$  и, пользуясь формулой (10), определите значение теплоёмкости воздуха при постоянном давлении  $c_p$ . Пользуясь полученным значением  $c_p$ , определите долю тепловых потерь в опыте  $N_{\text{пот}}/N$ .

13. Оцените погрешности опыта. Сравните полученное значение теплоёмкости с теоретическим и с табличным. Объясните расхождения, оценив факторы, влияющие на величину экспериментального значения теплоёмкости.

## Вопросы к сдаче работы

1. Сформулируйте теорему о равномерном распределении энергии по степеням свободы. Получите теоретическое значение молярной и удельной теплоёмкости воздуха при постоянном давлении.
2. Дают ли колебания атомов в молекулах кислорода и азота вклад в теплоёмкость в условиях опыта? Как теплоёмкость двухатомного газа зависит от температуры?
3. Покажите, что в проведенном опыте измеряется именно теплоёмкость при постоянном давлении  $c_p$ .
4. Перечислите возможные механизмы тепловых потерь. Как эти потери зависят от параметров опыта?
5. Используя данные опыта, проверьте обоснованность пренебрежения кинетической энергией течения газа.
6. Оцените влияние влажности воздуха на результаты опыта.
7. Как влияют колебания комнатной температуры и атмосферного давления на результаты опыта?
8. Пользуясь формулой Пуазейля, оцените перепад давления в трубке калориметра в условиях опыта. Диаметр трубки принять равным  $\sim 1,5$  см, длину трубки — 25 см.
9. Тепловые потери на излучение определяются законом Стефана-Больцмана:  $N_{\text{пот}} = AT^4$ , где  $A$  – константа. С какой относительной точностью эта зависимость может быть аппроксимирована линейной функцией  $N_{\text{пот}} \propto (T - T_0)$  в условиях опыта?

28.02.2018