



Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

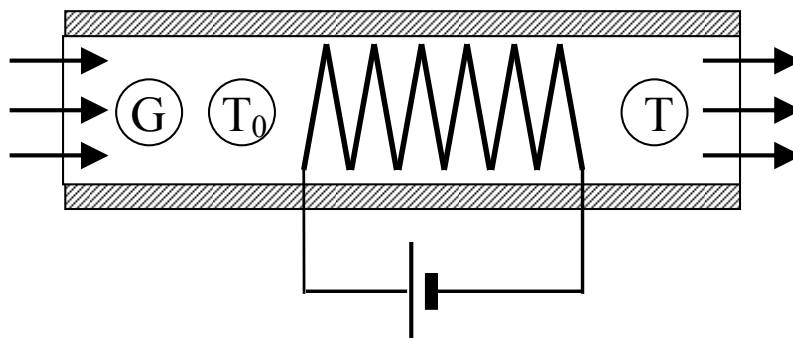
Физический факультет

Кафедра общей физики

Лабораторный практикум по молекулярной физике

Лабораторная работа № 218

**Измерение молярной теплоёмкости
воздуха C_p**



©Москва 2017

Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова.
Физический факультет. Кафедра общей физики.
Лабораторный практикум по молекулярной физике

С.А.Киров, Г.М. Николадзе, А.М. Салецкий, Д.Э. Харабадзе
Лабораторная работа № 218

Измерение молярной теплоёмкости воздуха C_p

Учебное пособие – М.: ООП Физ. фак-та МГУ, 2017, 12 с.

Оглавление

Теория.....	3
Теплоемкость газов	3
Проточный калориметр.....	6
Эксперимент	7
Экспериментальная установка.....	7
Проведение эксперимента	8
Обработка результатов	11
Контрольные вопросы.....	11
Литература.....	12

Определение молярной теплоёмкости воздуха C_p

Цель работы

Измерение молярной теплоемкости воздуха при постоянном давлении C_p с помощью проточного калориметра.

Идея эксперимента

При нагревании потока газа в трубе увеличение температуры на выходе ΔT зависит от теплоемкости газа C_p .

Теория

Теплоемкость газов

Молярная теплоемкость C показывает количество тепла Q , необходимое для изменения температуры T одного моля вещества на 1 кельвин:

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

где ν – количество молей. Теплоемкость можно найти из первого начала термодинамики

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (2)$$

где U – внутренняя энергия, а элементарная работа равна

$$\delta A = p dV, \quad (3)$$

где p – давление, V – объем. Для газов теплоемкость зависит от процесса, поскольку от вида процесса зависит совершаемая работа, и соответственно, величина Q . Подставляя (1), (3) в (2), получаем

$$C = \frac{1}{\nu} \left(\frac{dU}{dT} + p \left(\frac{dV}{dT} \right)_{\text{проц}} \right). \quad (4)$$

где производная dV/dT берется в соответствии с процессом, в котором участвует газ. Далее будем рассматривать идеальный газ, т.е. газ, подчиняющийся уравнению состояния Менделеева-Клапейрона

$$pV = \nu RT, \quad (5)$$

где R – газовая постоянная. В изохорном процессе ($V = \text{const}$) работа равна нулю, и теплоемкость, обозначаемая C_V , определяется только внутренней энергией

$$C_V = \frac{1}{\nu} \frac{dU}{dT}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (4), получаем окончательное выражение для молярной теплоемкости любого процесса

$$C = C_V + \frac{1}{\nu} p \left(\frac{dV}{dT} \right)_{\text{проц}}.$$

В изобарном процессе ($p = \text{const}$) из (5) следует

$$p \left(\frac{dV}{dT} \right)_p = \nu R,$$

где нижний индекс при производной показывает зафиксированный параметр. Отсюда для изобарной молярной теплоемкости C_p получается известное соотношение Майера:

$$C_p = C_V + R. \quad (7)$$

Теплоемкость C_V определяется числом степеней свободы молекулы газа. В классической статистической физике на основании распределения Гиббса доказывается закон о равномерном распределении энергии по степеням свободы молекул: для статистической системы, находящейся в состоянии термодинамического равновесия, на каждую поступательную и вращательную степени свободы приходится средняя кинетическая энергия, равная $kT/2$, а на каждую колебательную степень свободы – kT ¹. Колебательная степень обладает вдвое большей энергией, т.к. на нее приходится не только кинетическая, но и потенциальная энергия, причем их средние значения одинаковы. Таким образом, средняя энергия одной молекулы

¹ Более точно, на каждое квадратичное по скорости или координате слагаемое в выражении для энергии молекулы приходится энергия $\frac{1}{2} kT$.

$$u = \frac{1}{2}kT(i_{\text{пост.}} + i_{\text{вр}} + 2i_{\text{кол}}),$$

а молярная теплоемкость газа $C_V = \frac{1}{2}R(i_{\text{пост}} + i_{\text{вр}} + 2i_{\text{кол}})$.

Каждая степень свободы имеет свой энергетический порог возбуждения U_m , которому соответствует своя характеристическая температура, определяемая условием $kT_{\text{хар}} = U_m$. Наличие такого порога связано с дискретностью энергетических уровней. При низких температурах работают только поступательные степени свободы, при повышении температуры включаются вращательные, и при еще более высоких начинают работать колебательные. При комнатной температуре колебательные степени свободы в молекулах многих газов почти не возбуждаются, но вращательные полностью задействованы (табл. 1). Подключение новых степеней свободы с ростом температуры происходит не скачком, а в достаточно широком диапазоне температур вокруг $T_{\text{хар}}$. Например, одна из трех колебательных мод молекулы CO_2 , имеющая характеристическую температуру 1066 К, дает заметный вклад в теплоемкость уже при комнатной температуре.

Таблица 1. Характеристические температуры колебательных $T_{\text{кол}}$ и вращательных $T_{\text{вр}}$ степеней свободы для молекул азота, кислорода и углекислого газа

	N_2	O_2	CO_2
$T_{\text{вр}}, \text{K}$	2.9	2.1	0.56
$T_{\text{кол}}, \text{K}$	3340	2230	1066, 2100, 3700

Поскольку все перечисленные молекулы линейны, то они имеют 2 вращательные степени свободы, соответствующие вращениям по двум ортогональным осям, перпендикулярным оси молекулы.

Сухой воздух на 99 % состоит из двухатомных молекул (молярный состав: 21.0% кислорода, 78.1% азота, 0.9% – остальные газы). Таким образом, для подавляющего большинства молекул воздуха при комнатной температуре число степеней свободы равно 5, а молярная теплоемкость сухого воздуха близка к

$$C_V = \frac{5}{2}R.$$

Проточный калориметр

Приборы для измерения теплоемкости – калориметры – являются важным элементом в физико-химических исследованиях. Существует большое число калориметров разного типа, предназначенных для измерения теплоемкости веществ в разных агрегатных состояниях и разных физических условиях (температурах, давлениях и т.д.). Для измерения теплоемкости газов нашли широкое применение проточные калориметры. Рассмотрим принцип их действия.

Проточный калориметр в самом простом варианте представляет собой теплоизолированную трубку, по которой прокачивается исследуемый газ. Внутри трубки находится нагреватель известной мощности (спираль, нагреваемая током).

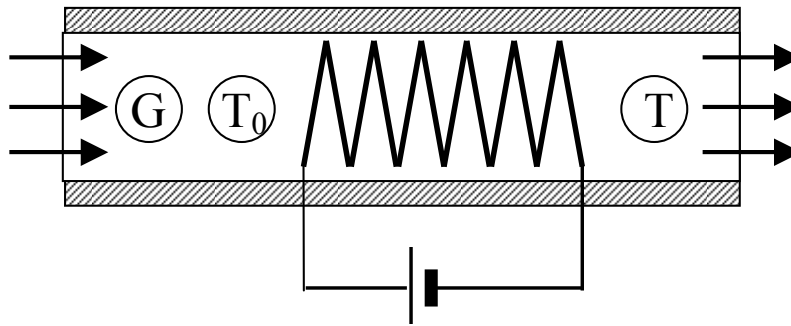


Рис.1 Принципиальная схема проточного калориметра

G – датчик потока, T_0 – датчик температуры на входе, T – датчик температуры на выходе.

Если пренебречь потерями тепла, то в стационарном режиме увеличение температуры на выходе калориметра ΔT будет определяться только теплоемкостью газа, мощностью нагревателя и величиной потока газа. Ввиду того, что давление газа на входе и выходе трубки почти одинаковы, калориметр такого типа измеряет теплоемкость при постоянном давлении C_p .

Учитывая, что величина нагрева небольшая, тепловую мощность потерь через стенки трубки можно приближенно учесть в виде $W_{\text{п}} = \alpha(T - T_0)$, где α – параметр теплопотерь, T_0 – температура окружающей среды, которая в нашем случае совпадает с температурой газа на входе трубки.

Тогда в установившемся режиме уравнение теплового баланса имеет вид

$$W = I_M C_p (T - T_0) + \alpha (T - T_0), \quad (8)$$

где W – мощность нагревателя, I_M – молярный поток воздуха (в моль/с). Объемный поток воздуха I , протекающий через калориметр, связан с молярным потоком I_M соотношением

$$I_M = I \frac{p}{RT_0},$$

где p – давление воздуха, R – универсальная газовая постоянная. Разность давлений воздуха на входе в трубку и на выходе из неё очень мала по сравнению с величиной атмосферного давления. Поэтому при расчётах в качестве величины давления воздуха на входе в систему можно брать атмосферное давление.

Для нахождения C_p можно использовать следующий метод. Из (8) следует

$$\frac{1}{T - T_0} = \frac{C_p}{W} I_M + \frac{\alpha}{W} = \frac{C_p}{W} \frac{p}{RT_0} I + \frac{\alpha}{W},$$

то есть зависимость $\frac{1}{T - T_0}$ от объемного потока I линейна с коэффициентом наклона

$$A = \frac{C_p}{W} \frac{p}{RT_0}. \quad (9)$$

Таким образом, измерив коэффициент наклона A на графике $\frac{1}{T - T_0}$ как функции от I , можно рассчитать C_p

$$C_p = A \frac{WRT_0}{p}. \quad (10)$$

Эксперимент

Экспериментальная установка

Схематическое устройство калориметра (в разрезе) показано на *рис.2*. Для уменьшения теплопотерь трубка калориметра (2) помещена в термос (1). Входящий воздух омывает трубку снаружи и еще до вхождения в трубку частично поглощает теплоту, выходящую через стенки трубки за счет теплопроводности. Таким образом, увеличивается доля мощности, передаваемая от нагревателя воздуху. Общий вид экспериментальной установки показан на *рис.3-4*.

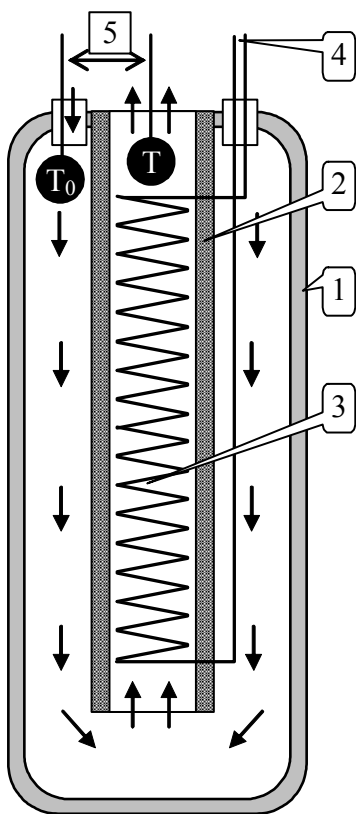


Рис.2 Устройство калориметра.

T_0 , T – датчики температуры; стрелки – направление потока воздуха.

- 1: стенки термоса;
- 2: трубка;
- 3: спираль нагревателя;
- 4: выходы обмотки нагревателя;
- 5: выходы датчиков температуры.

Для измерения объемного потока воздуха он подается в калориметр через тонкую трубку (2 на рис.4), на концах которой измеряется разность давлений дифференциальным датчиком (1 на рис.4). Поскольку течение воздуха в используемых режимах близко к ламинарному, согласно формуле Пуазейля поток пропорционален

разности давлений $I = \beta \Delta p$. Коэффициент β указан на установке.

Центробежный насос (5 на рис.3) имеет плавную регулировку мощности.

Измерительные модули показаны отдельно на рис.5. Модуль измерения давления показывает разность давлений на концах измерительной трубки (в паскалях). Модуль измерения температуры имеет два режима: измерение разности температур на выходе и входе калориметра (ΔT) и измерение абсолютной температуры на входе (T) в кельвинах. Модули питаются от сетевых адаптеров, включаемых в сеть 220 В. Выключатели питания расположены на адаптерах. Модуль питания нагревателя имеет переключатель выходного напряжения и индикатор выдаваемой мощности в ваттах. Сетевой выключатель этого модуля находится на его корпусе на правой стенке.

Проведение эксперимента

Подготовка к работе

- 1) включить модули измерения давления и температуры (2 и 3 на рис.3) для прогрева в течение не менее 15 минут, после чего проверить и при необхо-

димости, установить нуль на индикаторе давления.

2) Подготовить таблицу для записи результатов (см. Приложение).

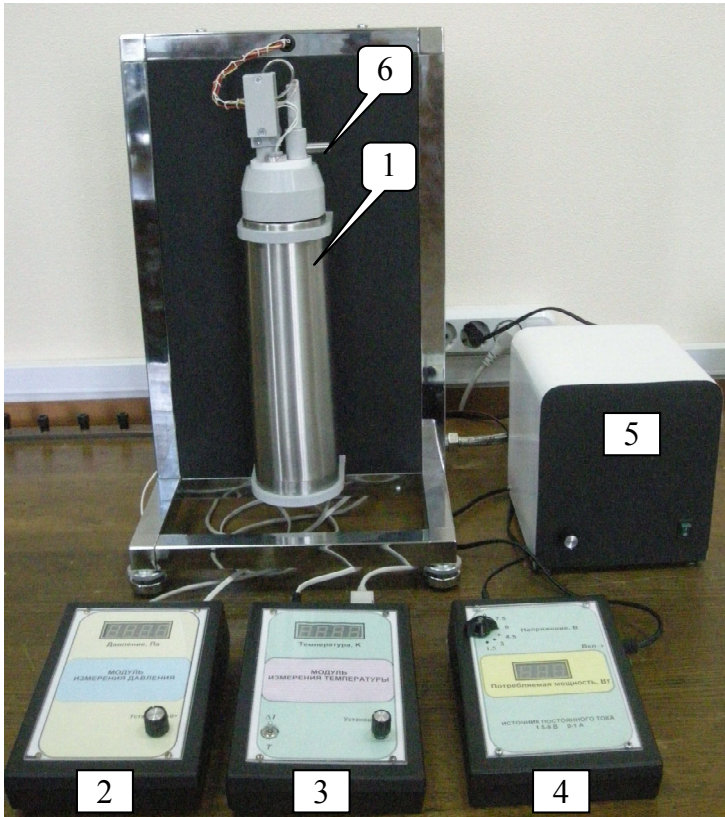


Рис.3 Вид установки спереди.

- 1: термос;
- 2-4: модули измерения давления, температур и мощности нагревателя;
- 5: насос для подачи воздуха;
- 6: патрубок для выхода воздуха.

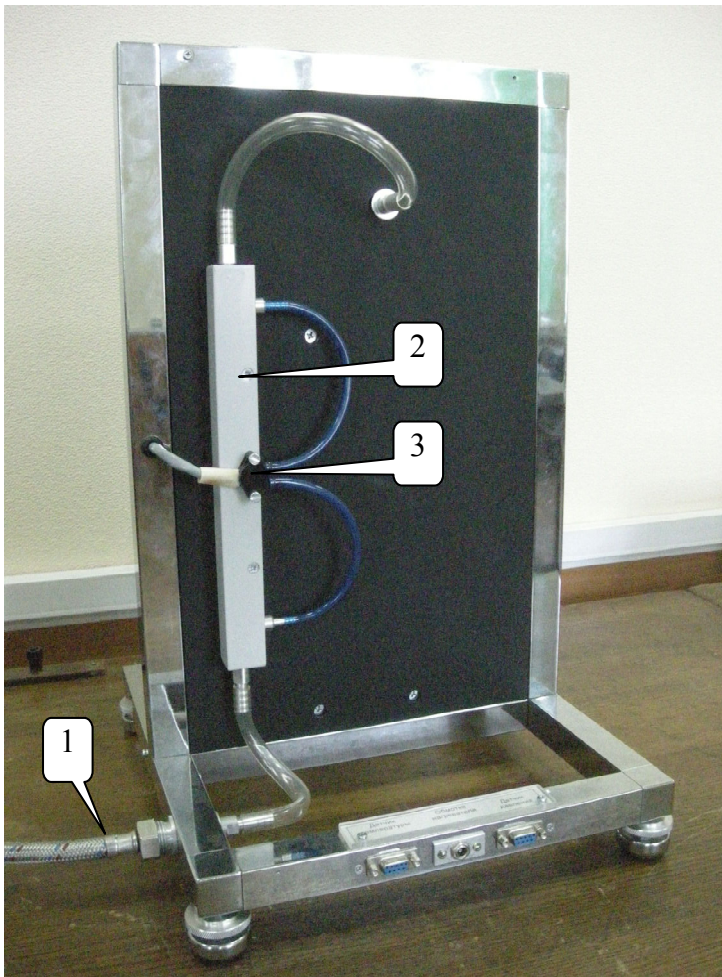


Рис.4 Вид установки сзади.

- 1: вход воздуха от насоса;
- 2: трубка для измерения потока (в кожухе);
- 3: дифференциальный датчик давления;

Измерения

- 1) Включить насос подачи воздуха (5 на рис.3) и установить поток, при котором разность давлений Δp на измерительной трубке станет около 150 Па, и подождать около минуты для установления исходных температур внутри установки.
- 2) Переключить модуль измерения температуры в режим T и записать температуру T_0 воздуха на входе калориметра (т.е., температуру в лаборатории).
- 3) Переключить модуль измерения температуры в режим ΔT и установить нуль индикатора.
- 4) Установить поток, при котором разность давлений Δp на измерительной трубке станет около 200-220 Па.
- 5) Поставить переключатель напряжения на модуле питания обмотки нагрева в положение 6 В, включить модуль и записать индицируемую мощность.
- 6) После установления стационарной разности температур ΔT (около 4-5 ми-



Рис.5. Модули измерения давления, температуры и регулируемый блок питания нагревателя с индикатором мощности.

нут) записать ΔT в таблицу.

- 7) Прodelать аналогичные измерения для разности давлений около величин $\Delta p = 180, 160, 120, 80$ и 50 (точная величина не имеет значения, можно взять и большее число точек) и занести все измерения в таблицу. При переходе к следующему давлению нужно проверять нуль измерителя давления, для чего кратковременно выключить насос, скорректировать, при необходимости, нуль датчика давления и снова включить насос.

Корректор нуля измерителя температуры не трогать! Для его повторной установки придется ждать полного остывания установки, что займет более часа.

После окончания измерений выключить компрессор и все приборы.

Обработка результатов

Построить график зависимости $1/\Delta T$ (K^{-1}) от Δp (Па), методом МНК аппроксимировать его прямой $A \cdot \Delta p + B$, и найти коэффициенты A и B и их стандартные погрешности. Исходя из (10) и учитывая, что объемный поток $I = \beta \Delta p$, вычислить теплоемкость C_p , которую целесообразно сразу нормировать на R

$$\frac{C_p}{R} = A \frac{WT_0}{\beta p}.$$

Атмосферное давление в лаборатории определить по барометру или, в случае его отсутствия, из метеосводки.

Используя соотношение Майера, найти молярную теплоемкость C_V и определить количество степеней свободы молекул, входящих в состав воздуха.

Контрольные вопросы

- 1) Первое начало термодинамики.
- 2) Что такое удельная и молярная теплоемкость вещества, их размерности?
- 3) Какова связь между молярной теплоемкостью C_V и числом степеней свободы молекул газа?
- 4) Сколько степеней свободы у молекул газов He, N₂, O₂, H₂O, CO₂? Какие это степени свободы?
- 5) График зависимости молярной теплоёмкости C_V двухатомного газа от тем-

пературы (качественно).

- 6) Что такое характеристическая температура степеней свободы, почему она существует?
- 7) Имеет ли значение для проведения измерений характер потока газа в калориметре: турбулентный или ламинарный?

Литература

- 1. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. 4-е издание. М.: Бином., 2010, § 14,17, 24.
- 2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. В 5 томах. Том 2. Термодинамика и молекулярная физика М.: Физматлит, 2006, § 15,18.
- 3. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. М.: Лань, 2008, §23-27.

ПРИЛОЖЕНИЕ. Образец таблицы для записи результатов

Таблица 1

Экспериментальные данные

Δp Па	ΔT К	$1/\Delta T$ К ⁻¹

$T_0 = \dots, p = \dots, W = \dots$