

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

## **Лабораторная работа 2.1.1**

Измерение удельной теплоёмкости воздуха при постоянном  
давлении

Выполнил:

Гисич Арсений

Б03-109

# 1 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.

## 2 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  $\delta T$  в зависимости от количества тепла  $\delta Q$ , полученного телом от некоторого нагревательного элемента внутри калориметра. Теплоёмкость тела в некотором процессе определяется как их отношение:

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

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

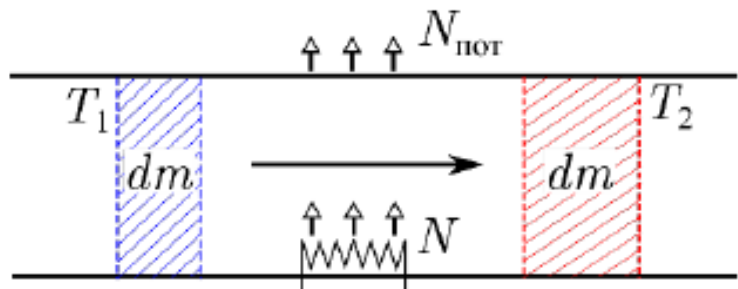


Рис. 1: Нагрев газа при течении по трубе

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

### 3 Методика измерений

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.

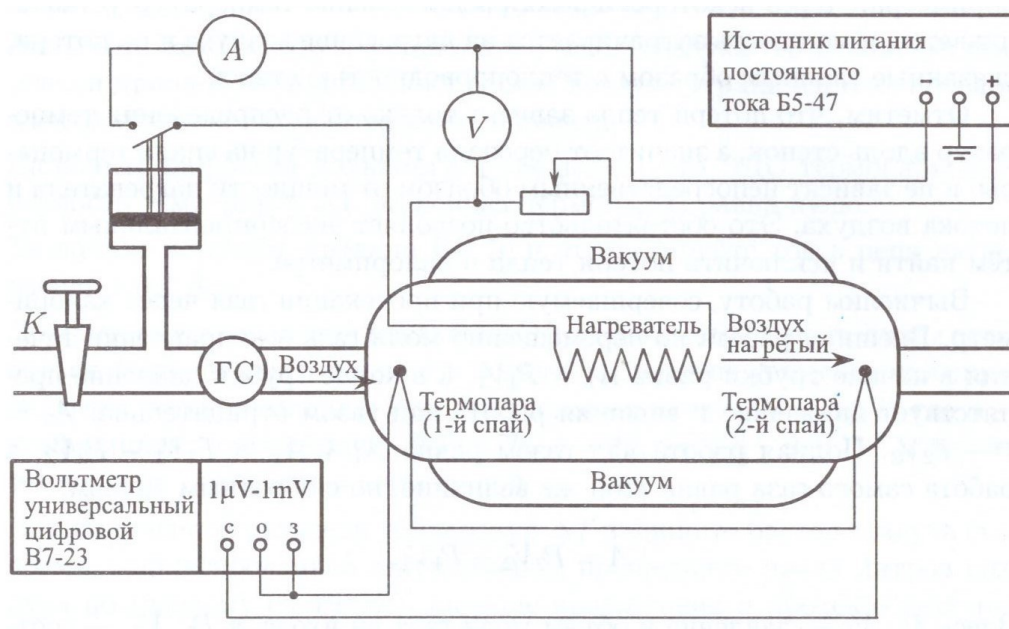


Рис. 2: Схема экспериментальной установки

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

$$N = UI.$$

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:

$$\varepsilon = \beta \Delta T,$$

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  $\Delta t$  прохождения некоторого объёма  $\Delta V$  воздуха измеряется секундомером. Объёмный расход равен  $\Delta V / \Delta t$ , массовый расход может быть найден как

$$q = \rho_0 \frac{\Delta V}{\Delta t},$$

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:

$$N_{\text{пот}} = \alpha \Delta T,$$

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

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

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

## 4 Используемое оборудование

1. теплоизолированная стеклянная трубка;
2. электронагреватель;
3. источник питания постоянного тока;
4. амперметр, вольтметр (цифровые мультиметры);
5. термопара, подключенная к микровольтметру;
6. компрессор;
7. газовый счётчик;
8. секундомер.

## 5 Результаты измерений и обработка данных

Начальные условия и параметры установки:

$$P_{\text{атм}} = 101,1 \pm 0,05 \text{ кПа}$$

$$V_{K5+K6+\kappa an} = 50 \text{ см}^3$$

$$L = 10,8 \text{ см}$$

$$d_{\kappa an} = 0,8 \text{ мм}$$

$$\rho_{\text{масла}} = 0.885 \text{ г/см}^3$$

## 6 Обсуждение результатов и выводы

В данной работе исследовалась зависимость давления в установке от времени. По результатам измерения давления различными способами определялась производительность вакуумного насоса. Полученное значение для скорости откачки:

$$W = 0,258 \pm 0,012 \text{ л/с}.$$

Использованный в работе метод измерений позволяет достичь относительной точности результатов в 5%. Метод расчёта скорости откачки по зависимости давления от времени при улучшении вакуума оказался точнее в сравнении с методом расчёта по разнице  $P_{уст}$  и  $P_{пр}$ . Основной вклад в погрешность вносит погрешность определения коэффициентов линейной аппроксимации. Также в данной работе были проверены теоретические зависимости, связанные с течением газа ().