

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Московский энергетический институт  
(технический университет)  
Волжский филиал

Кафедра общетехнических дисциплин

В.П.Мельников, С.В.Кулешина

**Лабораторная работа № 7**

**ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА  
ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ**

Методические указания к выполнению  
лабораторной работы № 7 по курсу “Физика”

ВОЛЖСКИЙ 2000

УДК 532  
Л 125

Рецензент:  
Петухов И.М., кандидат технических наук, доцент кафедры СД

**В.П.Мельников, С.В.Кулешина**

Лабораторная работа № 7. Измерение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении. Методические указания.

Описание лабораторной работы составлено на базе универсального стенда, разработанного ООО "Физинформ", с учетом корректировок, внесенных лабораторией физики ВФ МЭИ.

Указания предназначены для студентов 1 курса дневной и вечерней форм обучения всех специальностей.

УДК 532  
Л 125

© В.П.Мельников  
С.В.Кулешина

### Лабораторная работа № 7

Измерение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении.

#### 1. Цель работы.

Экспериментальное определение теплоемкости воздуха при постоянном давлении методом притока. Изучение метода измерения разности температур.

#### 2. Теоретические основы работы.

Теплоемкостью тела называется отношение количества сообщаемой ему теплоты  $\delta Q$  к соответствующему изменению  $dT$  температуры тела. Для однородных тел удобно пользоваться удельной и молярной теплоемкостями. Удельной теплоемкостью называют физическую величину  $c$ , численно равную количеству теплоты, которое нужно сообщить единице массы вещества  $M$ , для изменения его температуры на 1 К

$$c = \frac{1}{M} \frac{\delta Q}{dT} \quad (2.1)$$

Молярной теплоемкостью называют физическую величину  $C_\mu$ , численно равную количеству теплоты, которое нужно сообщить одному молю вещества для изменения его температуры на 1 К

$$C_\mu = \mu c = \frac{\mu}{M} \frac{\delta Q}{dT} \quad (2.2)$$

где  $\mu$  - молярная масса вещества

Теплоемкость тела зависит от его химического состава, массы, термодинамического состояния /температура, давление, а также от вида процесса, в результате которого к телу подводится теплота.

Простейшим объектом исследований в термодинамике является идеальный газ, молекулы которого имеют пренебрежительно малый собственный объем и не взаимодействуют друг с другом на расстоянии.

Термодинамический процесс называют квазистатическим, если он происходит настолько медленно, что термодинамическая система в течение всего процесса остается близкой к состоянию равновесия.

Для расчета теплоемкости одного моля идеального газа следует воспользоваться первым началом термодинамики для элементарного квазистатического процесса: теплота  $\delta Q$ , сообщаемая системе, расходуется на изменение внутренней энергии системы  $dU$  и на совершение системой работы  $\delta A$  против внешних сил

$$\delta Q = dU + \delta A = dU + p dV \quad (2.3)$$

здесь  $p$  - давление газа,  $dV$  - элементарное изменение объема.

Согласно уравнению Клапейрона для одного моля газа

$$pV = RT \quad (2.4)$$

Выражение для внутренней энергии:

$$U = \frac{i}{2} R T \quad (2.5)$$

где  $R$  - универсальная газовая постоянная,  $i$  - число степеней свободы молекулы газа.

Числом степеней свободы тела называется наименьшее число координат, которое необходимо задать для того, чтобы полностью определить положение тела в пространстве. Число степеней свободы молекул идеального газа зависит от количества атомов, входящих в молекулу. Для одноатомных молекул /водород, гелий/  $i = 3$ . Для двухатомных /азот, кислород/  $i = 5$ . Для многоатомных молекул  $i = 5$ .

Из (2.1) - (2.5) получим соотношение для молярных теплоемкостей идеального газа в изохорном и изобарном процессах:

$$C_v = \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_v = \frac{\partial U}{\partial T} = \frac{i}{2} R \quad (2.6)$$

$$C_p = \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_p = \frac{\partial U}{\partial T} + p \frac{\partial V}{\partial T} = C_v + R$$

Таким образом

$$C_p = C_v + R \quad (2.7)$$

Это соотношение называют уравнением Майера. Оно показывает, что молярная теплоемкость идеального газа при постоянном давлении больше его молярной теплоемкости при постоянном объеме на величину, равную универсальной газовой постоянной.

Воздух считается идеальным газом. Число степеней свободы молекул воздуха  $i = 5$  /азот и кислород двухатомные газы/. Поэтому

$$C_p = C_v + R = \frac{5}{2} R + R = \frac{7}{2} R$$

Для воздуха эффективная молярная масса  $M_{эф} = 0,029$  кг/моль. Отсюда теоретическое значение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении равно:

$$c_p = \frac{C_p}{M_{эф}} = \frac{7}{2} \frac{R}{M_{эф}} = 1003 \frac{Дж}{кг \cdot K} \quad (2.8)$$

### 3. Описание установки. Вывод расчётных формул.

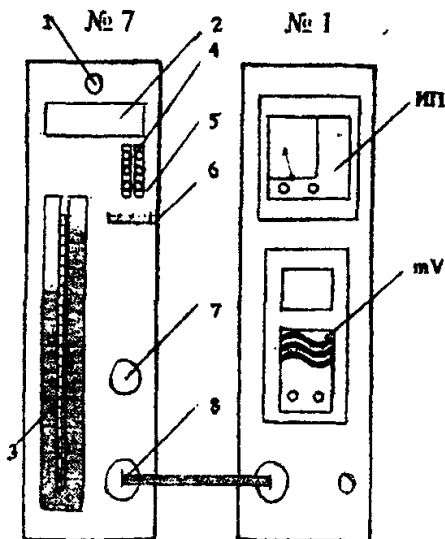


Рис. 3.1

Экспериментальная установка состоит из функционального модуля № 7 и приборного модуля № 1, содержащего источник питания ИП, мультиметр  $mV$  и компрессор, прокачивающий воздух через пневмопровод функционального модуля (рис. 3.1).

На передней панели функционального модуля №7 расположены крепёжный винт 1, табличка с названием работы 2, водяной манометр с измерительной линейкой 3, гнезда 4, 5 для подключения источника питания и мультиметра (вольтметра)  $mV$ , трехгрупповой переключатель 6 для последовательного подключения мультиметра (вольтметра) к термопаре, балластному

сопротивлению и нагревателю, клапан 7 и штуцер 8 пневмопривода для подачи воздуха.

Схема экспериментальной установки показана на рис 3.2.

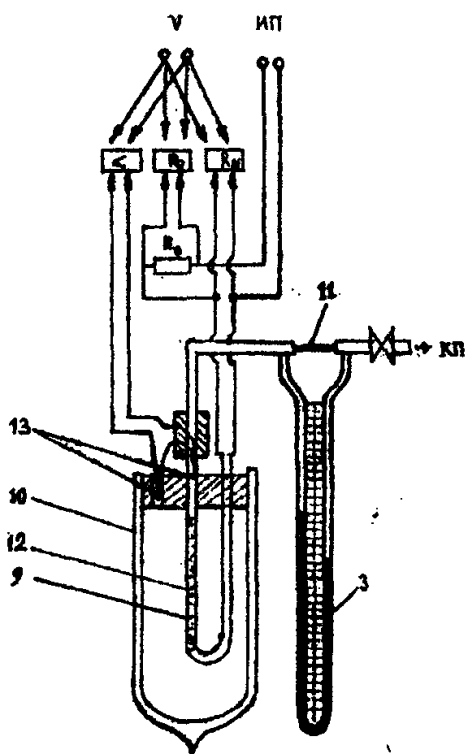


Рис. 3.2

Воздух прокачивается компрессором через трубку 9, размещённую в теплоизолирующей оболочке (сосуде Дьюара) 10. Измерение массового расхода воздуха производится по перепаду давления на капилляре 11, который вместе с трубкой 9, образует единую проточную магистраль. Протекая через трубку 9, воздух нагревается электрической спиралью 12. Разность температур воздуха, на входе и на выходе сосуда Дьюара измеряется дифференциальной термопарой 13. Электрический нагреватель 12 питается постоянным током от блока питания приборного модуля №1, подключенного к клеммам 4 модуля №7. Для определения значения электрического тока в нагревателе последовательно с ним включено балластное сопротивление  $R_0$ . Термо-ЭДС термопары, напряжение на балластном сопротивлении и напряжение на нагревателе измеряются мультиметром, подключенным с помощью соединительных проводов к клеммам 5 кнопочного переключателя 6. Массовый

расход воздуха в сосуде Дьюара измеряется с помощью водяного U-манометра по перепаду давления на капилляре.

В работе определяется количество тепла, отдаваемое нагревателем воздуха в единицу времени  $\Delta Q = I_n U_n$ , массовый расход воздуха  $m$ , разность температур воздуха,  $\Delta Q$  на входе и выходе сосуда Дьюара. Удельная теплоёмкость воздуха определяется из соотношения

$$C_p = \frac{Q}{\theta \cdot m} = \frac{I_n \cdot U_n}{\theta \cdot m}, \quad (2.9)$$

где:

$I_n = \frac{U_0}{R_0}$  — ток в нагревателе, рассчитывается по измеренному мультиметром

напряжению на образцовом сопротивлении,  $A$ ;

$U_0$  — напряжение на балластном сопротивлении,  $B$ ;

$R_0$  — номинальное значение балластного сопротивления,  $\text{Ом}$ ;

$m$  — массовый расход воздуха,  $\frac{\text{кг}}{\text{сек}}$ .

#### 4. Порядок выполнения работы.

1. Соединить источник питания приборного модуля с помощью проводов с гнездами 4 нагревателя модуля № 7.
2. Соединить мультиметр(вольтметр) приборного модуля с помощью проводов с гнездами 5 кнопочного переключателя объектов измерений модуля №7.
3. Соединить штуцер 8 пневмопровода модуля №7 со штуцером компрессора приборного модуля с помощью резинового шланга.
4. Включить электропитание приборного модуля, компрессора, источник питания, мультиметр (вольтметр).
5. Убедиться в том, что на выходе источника питания отсутствует напряжение. При этом регулятор напряжения необходимо повернуть против часовой стрелки до упора.
6. Установить предел измерения напряжения мультиметра (вольтметра)  $20\text{ В}$
7. Нажать кнопку  $R_H$  кнопочного переключателя модуля №7 для измерения напряжения на нагревателе  $U_n$
8. Регулятором напряжения источника питания установить первое из заданных значений напряжение на нагревателе:  $U_{n1} = 2\text{ В}$ .
9. Записать установленное значение в таблицу замеров.
10. Нажать кнопку “<” переключателя модуля №7, переключив предел измерения мультиметра (вольтметра) на  $200\text{ мВ}$ .
11. Наблюдать за показаниями вольтметра , измеряющего термо-ЭДС  $\Delta E$  термопары, до тех пор, пока прибор не будет регистрировать постоянное во времени значение термо-ЭДС (примерно через 3-5 минут), произвести отсчёт и записать измеренное значение  $\Delta E$  в таблицу.
12. Нажать кнопку  $R_0$  кнопочного переключателя модуля №7 , произвести отсчёт напряжения  $U_0$  на балластном сопротивлении. Результат записать в таблицу.
13. Произвести отсчёт разности уровней жидкости  $\Delta h$  в  $U$ -манометре.
14. Пункты 6-13 повторить для следующих четырёх значений напряжения на нагревателе:  
 $U_{H2}=4\text{В}, U_{H3}=6\text{В}, U_{H4}=8\text{В}, U_{H5}=10\text{В}$ .
15. Определить перепад давлений на концах капилляра по формуле:

$$\Delta P = \rho g \Delta h , \quad (4.10)$$

где :  $\Delta h$  – перепад уровней , м

$\rho$  - плотность жидкости,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

16. Определить расход воздуха в установке, используя соотношение Пуазейля:

$$m = \frac{\pi r_0^4 \Delta P}{8L\eta} \rho_{\text{в}}, \quad (4.11)$$

где:

$r_0$  – радиус капилляра, м

$L$  – длина капилляра, м

$\eta$  – коэффициент внутреннего трения воздуха при данной температуре, Па\*с.

### 5. Данные установки и таблица результатов измерений.

Радиус капилляра  $r_0 = 0.5$  мм.

Длина капилляра  $L = 50$  мм.

Балластное сопротивление  $R_0 = 0.1$  Ом.

Коэффициент внутреннего трения воздуха  $\eta = 187 * 10^{-7}$  Па\*с

Плотность воздуха  $\rho = 1.18$  кг/м<sup>3</sup>

Плотность жидкости  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>

Таблица 5.1

| № | $U_n, В$ | $U_0, В$ | $\Delta E, мВ$ | $Q, Дж/с$ | $\theta, ^\circ C$ | $I_n, А$ | $\Delta h, м$ |
|---|----------|----------|----------------|-----------|--------------------|----------|---------------|
| 1 |          |          |                |           |                    |          |               |
| 2 |          |          |                |           |                    |          |               |
| 3 |          |          |                |           |                    |          |               |
| 4 |          |          |                |           |                    |          |               |
| 5 |          |          |                |           |                    |          |               |

### 6. Обработка результатов измерений.

1. Рассчитать ток в нагревателе для каждого значения напряжения  $U_0$ , измеренного мультиметром  $I_n = \frac{U_0}{R_0}$

2. Определить кол-во тепла, отдаваемого нагревателем по формуле

$$Q = U_n * I_n \quad (6.1)$$

3. Определить разность температур воздуха на выходе и входе калориметра  $\theta$ , зная  $\Delta E$  и используя приложение (табл.1).

4. По полученным данным построить график линейной зависимости  $f(Q) = U_n * I_n$

См.рис.6.1.

5. Провести оптимальную прямую через набор экспериментальных точек. Ограничить полосу, в которой находятся экспериментальные точки прямыми, параллельными оптимальной линии, и проходящими через наиболее удалённые от оптимальной прямой точки.

6. Определить тангенс угла наклона оптимальной прямой по формуле.

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{U_n \cdot I_n}{\theta_0} \quad (6.2)$$

7. Рассчитать удельную теплоёмкость воздуха при постоянном давлении:

$$c_p = \frac{I_n \cdot U_n}{\theta_0 \cdot m} = \frac{\operatorname{tg}(\alpha)}{m} \quad \text{— по 4.11.} \quad (6.3.)$$

8. Погрешность  $\Delta c_p$  рассчитать по формуле:

$$\Delta c_p = c_p \sqrt{\left(\frac{\Delta(I_n U_n)}{I_n U_n}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\theta}{\theta}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2} \quad \text{— по формуле} \quad (6.4)$$

Абсолютные погрешности для разности температур  $\Delta\theta$  и мощности  $\Delta(U_n \cdot I_n)$  определяются из графика (рис 7.3)  $\frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta h'}{\Delta h}$   $\Delta h' = 2 \text{ мм}$  — погрешность измерения по шкале манометра.

9. Записать результат с учётом погрешности.

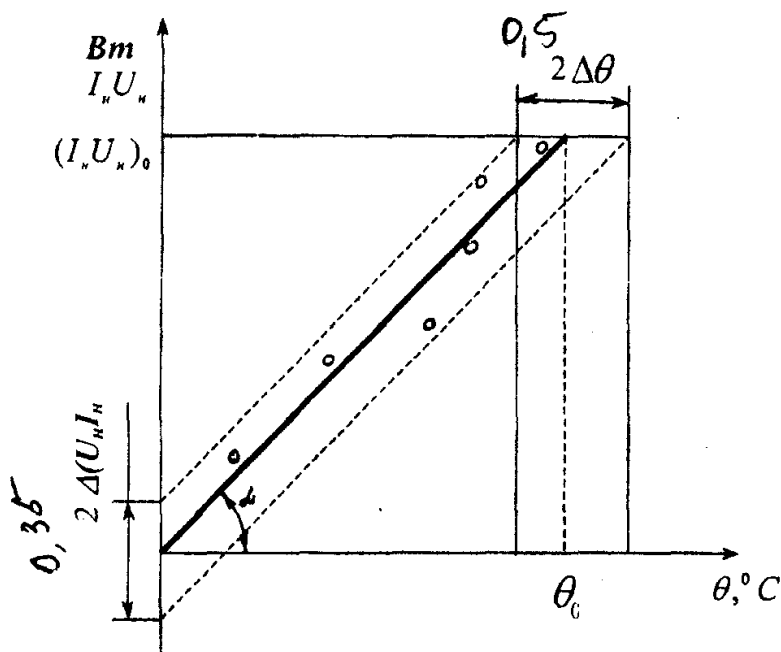


Рис 6.1. Графическая обработка экспериментальных данных (зависимость мощности, выделяемой нагревателем, от разности температур воздуха.).



### Контрольные вопросы.

1. Что называется теплоёмкостью? ...удельной теплоёмкостью?
2. Какой процесс называется квазистатическим ?
3. Первое начало термодинамики для квазистатического процесса?
4. Что такое идеальный газ ?
5. Уравнение состояния идеального газа? {Уравнение Клайперона}
6. Что такое изохорный ,изобарный, изотермический, адиабатический процесс?
7. Как определить  $C_{mv}$ ,  $C_{mp}$  в зависимости от строения молекул?
8. Уравнение Пуазейля?

### Литература.

1. *Болотина К.С.; Монахов А.М; Щербаков П.П.* Метрологические основы теплофизических экспериментов. М.: Московский энергетический институт,1986.с.57-59.
2. *Детлав А.А.* Курс физики.Т.1.Высшая школа.1974.с.194-204.
3. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики.Т.2.Термодинамика и молекулярная физика.М.:Наука 1979.с.67-69, 73-75, 82-83.

Таблица .1

Градуйрованная характеристика хром-копелевой термопары (по СТ СЭВ 1059-78)

| $t, ^\circ\text{C}$ | Термоэлектродвижущая сила, мВ |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                     | 0                             | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      |
| 0                   | 0,000                         | 0,064  | 0,128  | 0,192  | 0,256  | 0,321  | 0,386  | 0,451  | 0,516  | 0,580  |
| 10                  | 0,646                         | 0,711  | 0,776  | 0,841  | 0,907  | 0,973  | 1,039  | 1,105  | 1,171  | 1,237  |
| 20                  | 1,303                         | 1,370  | 1,437  | 1,504  | 1,571  | 1,638  | 1,705  | 1,772  | 1,840  | 1,908  |
| 30                  | 1,976                         | 2,044  | 2,112  | 2,180  | 2,248  | 2,316  | 2,384  | 2,452  | 2,520  | 2,589  |
| 40                  | 2,658                         | 2,727  | 2,796  | 2,865  | 2,934  | 3,003  | 3,072  | 3,141  | 3,210  | 3,280  |
| 50                  | 3,350                         | 3,350  | 3,420  | 3,490  | 3,560  | 3,630  | 3,700  | 3,840  | 3,910  | 3,980  |
| 60                  | 4,050                         | 4,121  | 4,192  | 4,263  | 4,334  | 4,405  | 4,476  | 4,547  | 4,618  | 4,689  |
| 70                  | 4,760                         | 4,331  | 4,902  | 4,973  | 5,044  | 5,115  | 5,186  | 5,257  | 5,327  | 5,398  |
| 80                  | 5,469                         | 5,540  | 5,611  | 5,682  | 5,753  | 5,824  | 5,895  | 5,966  | 6,037  | 6,108  |
| 90                  | 6,179                         | 6,250  | 6,322  | 6,394  | 6,466  | 6,538  | 6,610  | 6,682  | 6,754  | 6,826  |
| 100                 | 6,898                         | 6,970  | 7,043  | 7,116  | 7,189  | 7,252  | 7,335  | 7,408  | 7,481  | 7,554  |
| 110                 | 7,627                         | 7,700  | 7,774  | 7,848  | 7,922  | 7,996  | 8,070  | 8,144  | 8,218  | 8,292  |
| 120                 | 8,366                         | 8,440  | 8,515  | 8,590  | 8,665  | 8,740  | 8,815  | 8,890  | 8,985  | 9,040  |
| 130                 | 9,115                         | 9,190  | 9,265  | 9,340  | 9,415  | 9,490  | 9,565  | 9,640  | 9,715  | 9,790  |
| 140                 | 9,865                         | 9,940  | 10,016 | 10,092 | 10,168 | 10,244 | 10,320 | 10,396 | 10,472 | 10,548 |
| 150                 | 10,624                        | 10,700 | 10,777 | 10,854 | 10,931 | 11,008 | 11,085 | 11,162 | 11,239 | 11,316 |
| 160                 | 11,393                        | 11,470 | 11,548 | 11,626 | 11,704 | 11,782 | 11,860 | 11,938 | 12,016 | 12,084 |
| 170                 | 12,172                        | 12,250 | 12,329 | 12,408 | 12,487 | 12,566 | 12,645 | 12,724 | 12,803 | 12,882 |
| 180                 | 12,961                        | 13,040 | 13,120 | 13,200 | 13,280 | 13,360 | 13,440 | 13,520 | 13,600 | 13,680 |
| 190                 | 13,760                        | 13,841 | 13,922 | 14,003 | 14,084 | 14,165 | 14,246 | 14,327 | 14,408 | 14,489 |
| 200                 | 14,570                        | 14,654 | 14,732 | 14,813 | 14,894 | 14,975 | 15,056 | 15,137 | 15,218 | 15,299 |
| 210                 | 15,380                        | 15,462 | 15,514 | 15,626 | 15,708 | 15,790 | 15,872 | 15,954 | 16,036 | 16,118 |
| 220                 | 16,200                        | 16,283 | 16,366 | 16,449 | 16,532 | 16,615 | 16,698 | 16,781 | 16,864 | 16,947 |
| 230                 | 17,030                        | 17,118 | 17,196 | 17,279 | 17,362 | 17,445 | 17,528 | 17,611 | 17,694 | 17,777 |

**Содержание**

|   |    |
|---|----|
| 1. Цель работы                                      | 3  |
| 2. Теоретические основы работы                      | 3  |
| 3. Описание установки. Вывод расчетных формул       | 4  |
| 4. Порядок выполнения работы.                       | 6  |
| 5. Данные установки и таблица результатов измерений | 7  |
| 6. Обработка результатов измерения                  | 7  |
| Контрольные вопросы                                 | 9  |
| Литература  | 9  |
| Приложение  | 10 |

Лабораторная работа № 7

**Измерение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении**

Методические указания

Мельников В.И., Кулешина С.В.

Редактор Халдеева Г.П.  
Компьютерная верстка Крутикова О.Д.

Подписано в печать 05.06.00    Формат 60х90  $\frac{1}{16}$   
Усл.печ.л. 0,6    Тираж 50    Заказ 3

Издатель : ВФ МЭИ (ТУ), 404110, г.Волжский, пр.Ленина, 69  
Отпечатано: ВФ МЭИ (ТУ), 404110, г.Волжский, пр.Ленина, 69