

**Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Уфимский государственный авиационный технический университет**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА  
УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА  
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ВАКУУМНОЙ УСТАНОВКИ**

**Методические указания  
к лабораторной работе № 17  
по дисциплине «Физика»**

**Уфа 2007**

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Уфимский государственный авиационный технический университет

Кафедра физики

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА  
УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА  
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ВАКУУМНОЙ УСТАНОВКИ**

Методические указания  
к лабораторной работе № 17  
по дисциплине «Физика»

Уфа 2007

Составитель В.С. Осипов

УДК  
ББК

Экспериментальная проверка уравнения состояния идеального газа и определение рабочих характеристик вакуумной установки: Методические указания к лабораторной работе № 17 по дисциплине «Физика» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Сост. В.С. Осипов. – Уфа, 2007. – 12 с.

В работе изучается взаимосвязь параметров, определяющих состояние идеального газа и закономерности их изменения. Экспериментально проверяется уравнение состояния, находится предельное давление воздуха, достигаемое при его откачке из вакуумной установки поршневым насосом, а также объем рабочей камеры механического насоса и производительность электрического.

Приведены краткая теория метода, описание экспериментальной установки, указан порядок выполнения работы и форма представления результатов.

Методические указания предназначены для студентов, изучающих дисциплину «Физика».

Табл. 3. Ил. 3. Библиогр.: 4 назв.

Рецензенты: Краузе А.С.,  
Бикбулатов А.М.

© Уфимский государственный  
авиационный технический университет, 2007

Составитель ОСИПОВ Валерий Сергеевич

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА  
УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА  
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ВАКУУМНОЙ УСТАНОВКИ

Методические указания  
к лабораторной работе № 17  
по дисциплине «Физика»

Подписано в печать 2007. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Nimes New Roman Сур.  
Усл. печ. л. 1,1. Усл.-кр.-отт. 1,1. Уч-изд.л. 0,9.  
Тираж 300 экз. Заказ №  
ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет  
Центр оперативной полиграфии УГАТУ  
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12

## СОДЕРЖАНИЕ

### Лабораторная работа № 17 Экспериментальная проверка уравнения состояния идеального газа и определение рабочих характеристик вакуумной установки

1. Цель работы.....	4
2. Теоретическая часть .....	4
3. Экспериментальная установка.....	7
4. Порядок выполнения работы.....	7
4.1. Проверка уравнения состояния идеального газа .....	7
4.2. Определение предельного давления в вакуумной установке и объема рабочей камеры механического насоса .....	8
4.3. Определение предельного давления в вакуумной установке и производительности электрического насоса.....	10
5. Требования к отчету .....	11
6. Контрольные вопросы .....	12
Список литературы.....	12

# Лабораторная работа № 17

## Экспериментальная проверка уравнения состояния идеального газа и определение рабочих характеристик вакуумной установки

### 1. Цель работы

1.1. Экспериментальная проверка уравнения состояния идеального газа.

1.2. Определение предельного давления газа в вакуумной установке, объема рабочей камеры механического поршневого насоса и производительности электрического насоса.

### 2. Теоретическая часть

Идеальным газом называется множество беспорядочно движущихся материальных точек, взаимодействующих между собой и с другими телами только при непосредственных столкновениях, при которых они ведут себя как абсолютно упругие шары. Термодинамическое состояние идеального газа полностью определяется четырьмя параметрами: давлением, температурой, занимаемым объемом и параметром, задающим количество газа (числом частиц, или числом молей, или массой и т.п.). Для данного состояния все они взаимосвязаны между собой. Уравнение, выражающее эту взаимосвязь, называют уравнением состояния идеального газа.

Давление идеального газа можно рассчитать через силы взаимодействия частиц со стенками сосуда, в котором он находится. Средняя сила  $f$ , действующая со стороны какой-либо одной частицы, налетающей на достаточно малую плоскую площадку  $S$ , перпендикулярно ей за время соударения  $\Delta t$  в силу третьего и второго законов Ньютона по величине равна

$$f = \frac{|\Delta \vec{K}|}{\Delta t}, \quad (2.1)$$

где  $\Delta \vec{K}$  – изменение импульса частицы в результате абсолютно упругого столкновения.

В системе координат, одна из осей которой перпендикулярна площадке  $S$ , в соответствии с рис. 2.1

$$|\Delta \vec{K}| = \Delta K_y = m_1 v_y - (-m_1 v_y) = 2 m_1 v_y, \quad (2.2)$$

где  $m_1$  – масса частицы,  $v_y$  – проекция ее скорости  $v$  на ось  $y$ , перпендикулярную площадке.

В случае равенства проекций скоростей всех частиц на ось  $y$  за время  $\Delta t$  с площадкой  $S$  могут столкнуться только те, которые расположены от площадки  $S$  на расстояниях, не превышающих  $v_y \Delta t$ . Если концентрация частиц равна  $n$ , то число всех таких частиц будет равно  $n S v_y \Delta t$ . Но из них в среднем лишь половина движется по направлению к площадке, поэтому средняя сила  $F$ , действующая за время  $\Delta t$  на площадку по нормали к ней, равна

$$F = n S m_1 v_y^2. \quad (2.3)$$

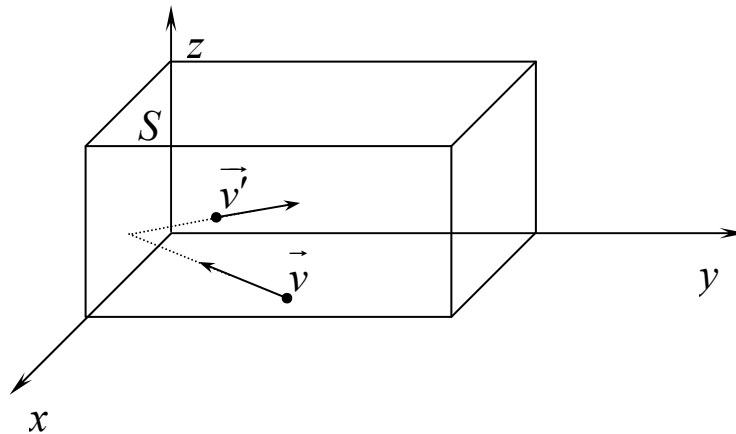


Рис. 2.1

С учетом разброса скоростей частиц по величине и направлению их движения, величину  $v_y^2$  в (2.3) следует заменить ее средним значением  $\langle v_y^2 \rangle$ , которое ввиду полной беспорядочности движения равно

$$\langle v_y^2 \rangle = \langle v_x^2 \rangle = \langle v_z^2 \rangle = \frac{1}{3} \langle v^2 \rangle. \quad (2.4)$$

В итоге давление газа оказывается равным

$$P = \frac{F'}{S} = \frac{1}{3} n m_1 \langle v^2 \rangle. \quad (2.5)$$

По закону равномерного распределения энергии теплового движения

$$\frac{m_1 \langle v^2 \rangle}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (2.6)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура газа.

Из (2.5) и (2.6) получаем уравнение состояния идеального газа в виде

$$P = nkT, \quad (2.7)$$

называемое уравнением Клапейрона.

Если газ занимает объем  $V$ , то

$$n = \frac{\nu N_A}{V}, \quad (2.8)$$

где  $\nu$  – число молей газа,  $N_A$  – число Авогадро.

Подстановкой (2.8) уравнение (2.7) приводится к виду

$$PV = \nu RT, \quad (2.9)$$

где  $R = k N_A$  – газовая постоянная.

Если же количество газа характеризовать его массой  $m$ , то уравнение состояния представится в форме

$$PV = \frac{m}{M} R T, \quad (2.10)$$

где  $M$  – молярная масса газа.

Это уравнение называют уравнением Менделеева-Клапейрона.

Из уравнения состояния следует, что во всех процессах с неизменным количеством газа

$$\frac{PV}{T} = \text{const}. \quad (2.11)$$

При этом изотермический процесс ( $T = \text{const}$ ) подчиняется закону Бойля-Мариотта

$$PV = \text{const}, \quad (2.12)$$

изобарный ( $P = \text{const}$ ) – закону Гей-Люссака

$$\frac{V}{T} = \text{const}, \quad (2.13)$$

а изохорный ( $V = \text{const}$ ) – закону Шарля

$$\frac{P}{T} = \text{const}. \quad (2.14)$$

На основе модели идеального газа удастся объяснить свойства реальных газов при условиях не очень сильно отличающихся от нормальных, так как в этом случае их поведение с очень большой



степенью точности тождественно поведению идеального газа.

### 3. Экспериментальная установка

Вакуумная установка (рис. 3.1) состоит из двух металлических цилиндрических сосудов 1 и 2 с объемами 2 л и 1 л соответственно. Сосуд 1 соединен непосредственно с манометром 3, и через вакуумный шланг 4 с краном 5 – с механическим или электрическим поршневым насосом 6. Сосуд 2 непосредственно сообщается с атмосферой через кран 7, а через вакуумный шланг 8 с краном 9 – с сосудом 1.

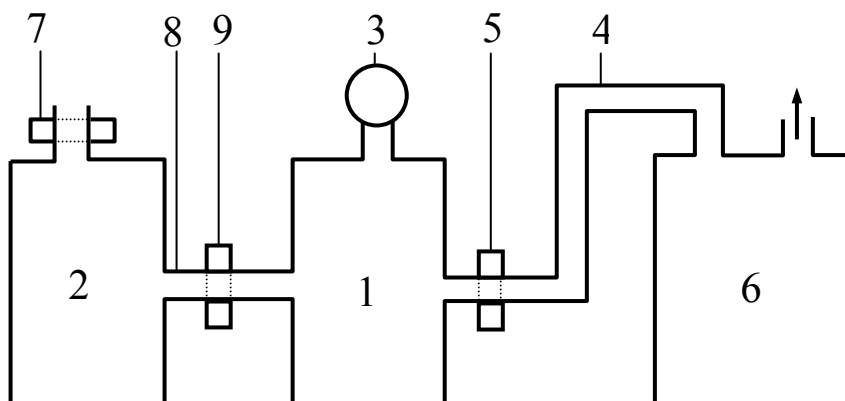


Рис. 3.1

### 4. Порядок выполнения работы

#### 4.1. Проверка уравнения состояния идеального газа

Если перекрыть сообщение между сосудами краном 9 и откачать из сосуда 1 часть воздуха, то давление  $P_1$  и объем  $V_1$  оставшихся там  $\nu_1$  молей газа будут связаны уравнением

$$P_1 V_1 = \nu_1 RT, \quad (4.1)$$

а параметры состояния воздуха в сосуде 2 емкостью  $V_2$  при сообщении его с атмосферой – уравнением

$$P_0 V_2 = \nu_2 RT, \quad (4.2)$$

где  $P_0$  – давление воздуха в этом сосуде, равное атмосферному,  $\nu_2$  – число молей в нем.

После перекрытия сообщения сосуда 2 с атмосферой и соединения его с сосудом 1 параметры состояния воздуха в сообщающихся сосудах, будут отвечать уравнению

$$P_2 (V_1 + V_2) = (v_1 + v_2) RT, \quad (4.3)$$

где  $P_2$  – давление в соединенных сосудах.

Из уравнений (4.1) - (4.3) следует, что

$$P_1 V_1 + P_0 V_2 = P_2 (V_1 + V_2). \quad (4.4)$$

Проверьте справедливость этого равенства, выполнив следующие операции:

- 1) откройте краны 5 и 7 и закройте кран 9;
- 2) откачайте насосом воздух из сосуда 1 до давления 40-50 кПа и измерьте значение этого давления  $P_1$  по манометру;
- 3) закройте краны 7 и 5, затем откройте кран 9 и измерьте давление  $P_2$  в сообщающихся сосудах;
- 4) повторите опыт еще два раза;
- 5) по барометру в лаборатории определите атмосферное давление  $P_0$  и для полученных в каждом из трех опытов значений  $P_1$  и  $P_2$  рассчитайте левую (А) и правую (В) части равенства (4.4);
- 6) определите абсолютные погрешности величин А и В, считая при этом, что относительная погрешность объемов сосудов составляет 1%.

#### **4.2. Определение предельного давления в вакуумной установке и объема рабочей камеры механического насоса**

При каждом такте поршневого насоса, откачивающего воздух из сосуда 1, изолированного от сосуда 2, сначала происходит изотермическое расширение газа от объема  $V_1$  до объема, равного сумме  $V_1$  и объема рабочей камеры насоса  $V_k$ , после чего содержащийся в рабочей камере воздух отделяется и удаляется в атмосферу. Применяя закон Бойля-Мариотта для первого, второго и последующих тактов вплоть до некоторого  $i$  – го, получаем систему уравнений:

$$\begin{aligned} P_0 V_1 &= P_1 (V_1 + V_k), \\ P_2 V_1 &= P_2 (V_1 + V_k), \\ &\dots\dots\dots \\ P_{i-1} V_1 &= P_i (V_1 + V_k). \end{aligned} \quad (4.5)$$

Перемножение левых и правых частей уравнений дает

$$P_0 V_1^i = P_i (V_1 + V_k)^i, \quad (4.6)$$

откуда

$$\ln \frac{P_0}{P_i} = i \ln \left( 1 + \frac{V_k}{V_1} \right). \quad (4.7)$$

При условии малости  $V_k$  по сравнению с  $V_1$ , что справедливо для используемой вакуумной установки,

$$\ln \left( 1 + \frac{V_k}{V_1} \right) \approx \frac{V_k}{V_1} \quad (4.8)$$

и

$$\ln \frac{P_0}{P_i} = i \frac{V_k}{V_1}. \quad (4.9)$$

Используя это уравнение, определите объем рабочей камеры насоса. Для этого проделайте следующее:

1) закройте краны 7 и 9 и откройте кран 5;

2) откачивайте воздух из сосуда 1, снимая при этом показания манометра через каждые 10 тактов (оборотов маховика насоса), и делайте это до тех пор, пока показания манометра в течение 30 - 40 тактов перестанут меняться. Достигнутое при откачке наименьшее давление называют предельным или пороговым для данной вакуумной установки;

3) по полученным данным постройте график зависимости величины  $\ln \frac{P_0}{P_i}$  от числа тактов  $i$  в соответствии с рис. 3.2.

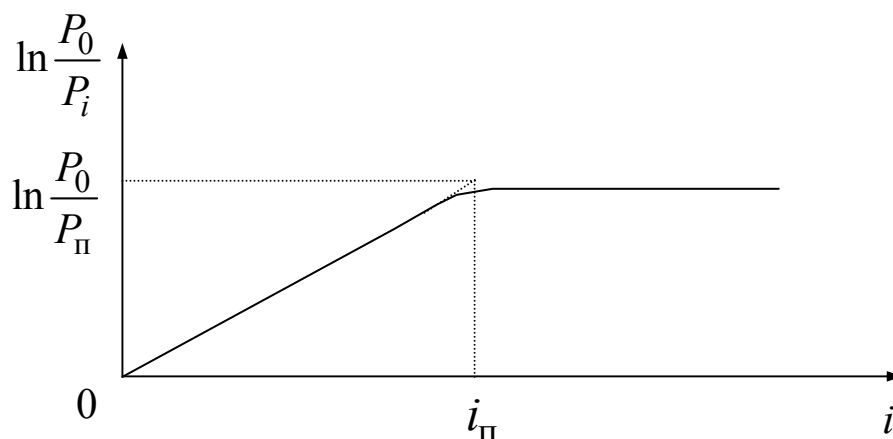


Рис. 3.2

Пользуясь усредненным линейным участком графика, найдите

отношение  $\frac{\ln \frac{P_0}{P_{\Pi}}}{i_{\Pi}}$  и (4.9), рассчитайте объем рабочей камеры насоса по формуле

$$V_{\text{к}} = \frac{V_1}{i_{\Pi}} \ln \frac{P_0}{P_{\Pi}}. \quad (4.10)$$

### 4.3. Определение предельного давления в вакуумной установке и производительности электрического насоса

При откачке газа электрическим поршневым насосом справедливы все рассуждения, приведенные в предыдущем пункте. При постоянной мощности насоса число тактов  $i$  пропорционально времени  $t$ , затраченного на них, и откаченный за это время объем газа будет равен  $V_t \cdot t$ , где  $V_t$  – объемная скорость откачки (производительность) насоса, равная объему, откаченному за одну секунду. Но этот объем равен объему рабочей камеры насоса, помноженному на число тактов

$$V_t \cdot t = i \cdot V_{\text{к}}. \quad (4.11)$$

С учетом этого из (4.9) имеем

$$\ln \frac{P_0}{P_t} = \frac{V_t}{V_1} t, \quad (4.12)$$

где  $P_t$  – давление газа по прошествии времени  $t$  после начала откачки.

С помощью этого уравнения определите предельное давление, достигаемое в установке с электрическим насосом и его производительность. Для этого необходимо:

- 1) закрыть краны 7, 9 и открыть кран 5;
- 2) включив насос, откачать воздух из сосуда 1, измеряя при этом по манометру давление  $P_t$  через каждые 10 с до тех пор, пока давление перестанет меняться, т.е. до достижения предельного давления  $P_{\Pi}$ ;

3) по полученным данным построить график зависимости  $\ln \frac{P_0}{P_t}$  от времени  $t$ , по которому определяются значения  $P_{\Pi}$  и времени  $t_{\Pi}$

достижения предельного давления  $P_{\Pi}$ ;

4) по следующей из (4.12) формуле

$$V_t = \frac{V_1}{V_{\Pi}} \ln \frac{P_0}{P_{\Pi}}, \quad (4.13)$$

рассчитайте производительность насоса  $V_t$ .

### 5. Требования к отчету

Результаты измерений и расчетов представляются в виде таблиц

1, 2, 3, а также графиков зависимостей значений  $\ln \frac{P_0}{P_i}$  от числа тактов

$i$  и  $\ln \frac{P_0}{P_t}$  от времени  $t$ . Под табл. 2 записать найденное значение

объема  $V_{\kappa}$ , а под табл. 3 – производительность  $V_t$ .

Таблица 1

$P_0$ , кПа	$P_1$ , кПа	$P_2$ , кПа	$A$ , Дж	$B$ , Дж	$\Delta A$ , Дж	$\Delta B$ , Дж

Таблица 2

$i$				
$P_i$ , кПа				
$\ln \frac{P_0}{P_i}$				

Таблица 3

$t$ , с				
$P_t$ , кПа				
$\ln \frac{P_0}{P_t}$				

## **6. Контрольные вопросы**

1. Что такое идеальный газ?
2. Сколько термодинамических параметров полностью определяют состояние идеального газа? Какие это параметры?
3. Какие формы записи уравнения состояния идеального газа Вы знаете?
4. Каким газовым законам подчиняется идеальный газ? Представьте их графически.
5. Каким образом в работе подтверждается справедливость уравнения состояния?
6. На основе какого закона и как определяется объем рабочей камеры и производительность насоса?

## **Список литературы**

1. *Савельев И.В.* Курс физики, т. 1. – М.: Наука, 1989.
2. *Кикоин А.К., Кикоин И.К.* Молекулярная физика. – М.: Наука, 1976.
3. *Матвеев А.Н.* Молекулярная физика. – М.: Высшая школа, 1987.
4. *Трофимова Т.И.* Курс физики. – М.: Высшая школа, 2004.
5. *Детлаф А.А., Яворский В.М.* Курс физики. – М.: Высшая школа, 2002.