

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»

Кафедра Общей и технической физики  
(лаборатория виртуальных экспериментов)

# **Газовые законы. Тарировка газового термометра**

*Методические указания к виртуальной лабораторной работе  
для студентов всех специальностей*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2015

УДК 531/534 (075.83)

**СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА:**

Лабораторный практикум курса общей физики. Водкайло Е.Г., Кожокарь М.Ю./  
Национально минерально-сырьевой университет «Горный». С-Пб, 2015, 25 с.

Лабораторный практикум курса общей физики по статистической физике и термодинамике предназначен для студентов всех специальностей Санкт-Петербургского горного института.

С помощью учебного пособия студент имеет возможность, в предварительном плане, ознакомиться с физическими явлениями, методикой выполнения лабораторного исследования и правилами оформления лабораторных работ.

Выполнение лабораторных работ практикума проводится студентом индивидуально по графику.

Табл. 6. Ил. 7. Библиогр.: 7 назв.

Научный редактор доц. Н.Н. Смирнова

© Национально минерально-сырьевой  
университет «Горный», 2015 г.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Цель проведения лабораторного практикума, как и проведения дисциплины в целом – обеспечить приобретение знаний и умений по физике в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом (ФГОС) по различным направлениям подготовки специалистов и бакалавров.

В соответствии с требованиями ФГОС к результатам освоения дисциплины лабораторный практикум направлен на формирование общих и профессиональных компетенций заключающихся в способностях:

- организовать свою работу для достижения поставленных целей;
- применять на практике приобретенные навыки при поведении и описании исследований, в том числе экспериментальных;
- работать самостоятельно;
- использовать инновационные идеи;
- принимать участие в научно-исследовательских разработках по профилю подготовки.

Виртуальный лабораторный практикум по физике в рамках дополнения натурального и модельного вариантов, при обеспечении требуемой точности, делает виртуальный эксперимент существенным элементом повышения качества обучения и усиления его мотивации. Кроме того, физические задачи, выраженные не только в текстовом виде, но и представленные в модельно объёмном лабораторном варианте, позволяют обучать принятию технических решений различных уровней. Это является весьма важным элементом инженерного образования.

В виртуальной лабораторной работе реальную установку имитирует системный блок компьютера. Пульт управления является клавиатура. Монитор совмещает функцию цифрового индикатора измерительных приборов и экрана для наблюдения за работой установки и изучаемыми процессами. Элементы виртуальной установки реагируют на действия пользователя, которые регламентируются методическими указаниями.

Для экспериментальной проверки уравнений состояний идеального газа и демонстрации принципа работы газового термометра предлагается виртуальная представленная лабораторная работа. Программное обеспечение работы позволяет исследовать поведение идеального газа, в частности: изотермический, изобарный и изохорный процессы, а также провести тарировку газового термометра. Студенты при выполнении базовых заданий на основе экспериментальных данных определяют такие параметры как объем  $V$ , давление  $p$ , температуру  $T$  и строят графики для исследуемых процессов, а также калибровочный график зависимости  $p = f(t)$ .

Методика проведения измерений, обработки экспериментальных данных, оценки погрешностей прямых и косвенных измерений, а также процедура подготовки студентов к выполнению работы и защиты отчетов производится в таком же порядке, как и при выполнении работ реального физического практикума в соответствии требованиями кафедры Общей и технической физики.

# 1. ИДЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

## 1.1. Законы идеальных газов

Идеальным называется газ, в котором отсутствуют силы межмолекулярного взаимодействия и возможно пренебрежение размерами молекул газа. Модель идеального газа с достаточной степенью точности можно использовать при изучении реальных газов, так как они в условиях, близких к нормальным (например, кислород и гелий), а также при низких давлениях и высоких температурах близки по свойствам к идеальному газу.

Состояние идеального газа характеризуется переменными  $P$  (давление),  $V$  (объем) и  $T$  (температура), которые называются термодинамическими параметрами или параметрами состояния. Процессы в газе также характеризуются величинами  $\Delta Q$  (количество теплоты) и  $A$  (работа), определяющими энергетические процессы в системе газ-окружающая среда.

Рассмотрим процессы и законы, описывающие поведение идеального газа.

Изопроцессы идеального газа – процессы, при которых один из параметров остаётся неизменным.

1. Изохорический процесс. Закон Шарля.  $V = \text{const}$ .

Изохорическим процессом называется процесс, протекающий при постоянном объёме  $V$ . Поведение газа при этом изохорическом процессе подчиняется закону Шарля: при постоянном объёме и неизменных значениях массы газа и его молярной массы отношение давления газа к его абсолютной температуре остаётся постоянным:

$$P_1/T_1 = P_2/T_2 = \dots P_0/T_0 \text{ или } P/T = \text{const.}$$

График изохорического процесса на  $PV$ -,  $PT$ - и  $Vt$ - диаграммах называется изохорой (рис.1).

Если температура газа выражена в градусах Цельсия, то уравнение изохорического процесса записывается в виде

$$P = P_0(1 + \alpha t), \quad (1)$$

где  $P_0$  – давление при  $0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  – температурный коэффициент давления газа равный  $1/273 \text{ град}^{-1}$ .

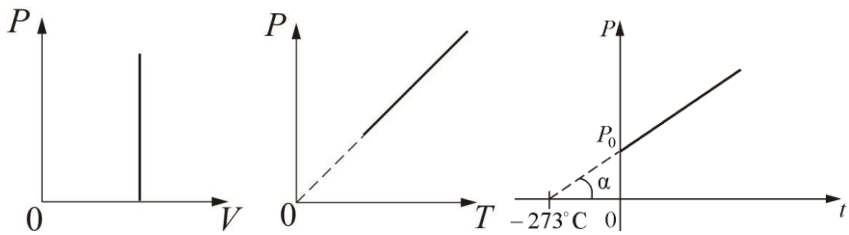


Рис. 1. Графики изохорического процесса.

2. Изобарический процесс. Закон Гей-Люссака.  $P = \text{const}$ .

Изобарическим процессом называется процесс, протекающий при постоянном давлении  $P$ . Поведение газа при изобарическом процессе подчиняется закону Гей-Люссака: при постоянном давлении и неизменных значениях массы и газа, и его молярной массы отношение объёма газа к его абсолютной температуре остаётся постоянным:

$$V_1/T_1 = V_2/T_2 = \dots V_0/T_0 \text{ или } V/T = \text{const}.$$

График изобарического процесса на  $PV$ -,  $PT$ - и  $Vt$ - диаграммах называется изобарой (рис. 2).

Если температура газа выражена в градусах Цельсия, то уравнение изобарического процесса записывается в виде:

$$V = V_0(1 + \alpha t), \tag{2}$$

где  $V_0$  – объём при  $0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha = 1/273$  град $^{-1}$  – температурный коэффициент расширения.

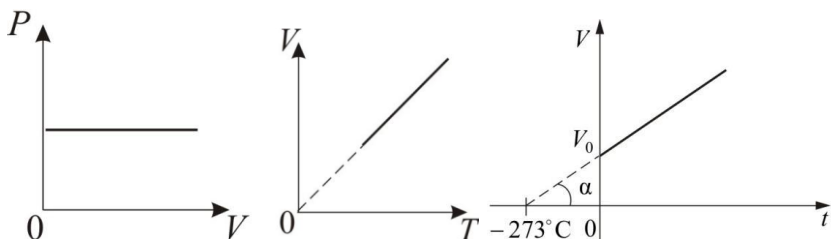


Рис. 2. Графики изобарического процесса.

Из (1) и (2) следует, что изобары и изохоры пересекают ось температур в точке  $t = -1/\alpha = -273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , определяемой из условия  $1+\alpha t = 0$ . Если перенести начало отсчета в эту точку, то происходит переход к шкале Кельвина, откуда  $T = t + 1/\alpha$ .

Вводя в формулы (1) и (2) термодинамическую температуру, законам можно придать более удобный вид:

$$V = \alpha \cdot V_0 \cdot T = V_0 \cdot \frac{T}{T_0},$$

$$P = \alpha \cdot P_0 \cdot T = P_0 \cdot \frac{T}{T_0}.$$

где  $T_0 = 273,15\text{ }^{\circ}\text{K}$ .

3. Изотермический процесс. Закон Бойля – Мариотта.  $T = \text{const}$ .

Изотермическим процессом называется процесс, протекающий при постоянной температуре  $T$ . Поведение идеального газа при изотермическом процессе подчиняется закону Бойля – Мариотта: при постоянной температуре и неизменных значениях массы газа и его молярной массы произведение объёма газа на его давление остаётся постоянным:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = \dots = P_0 V_0 \text{ или } PV = \text{const}.$$

График изотермического процесса называется изотермой и изображается на  $PV$ -диаграмме в виде гиперболы (рис. 3). С повышением температуры газа изотерма удаляется от начала координат.

4. Адиабатический процесс (изоэнтروпийный  $\Delta S = 0$ ,  $S = \text{const}$ ):

Адиабатический процесс – термодинамический процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой.

Уравнение адиабаты:  $V^\gamma P = \text{const}$ , где  $\gamma$  – показатель адиабаты.

На рис. 4. показаны график и различных изо процессов в  $PV$ -координатах. Как видно из рисунка, адиабата идет круче, чем изотерма.

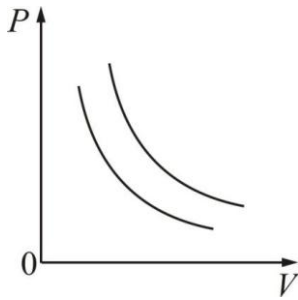


Рис. 3. Графики изотермического процесса.

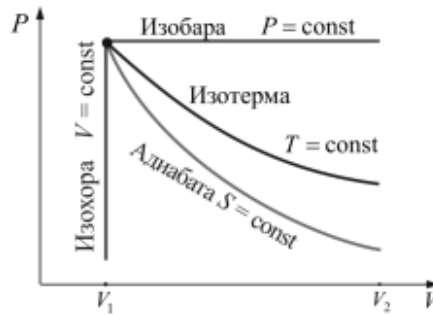


Рис. 4. Графики различных изопроцессов в PV-координатах.

5. Политропический процесс – процесс, при котором теплоёмкость газа остаётся постоянной. Политропический процесс – общий случай всех перечисленных выше процессов.

6. Закон Авогадро: при одинаковых температурах и давлениях в равных объемах любого газа содержится одинаковое число молекул  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>. Следствием этого закон является то, что моли любых газов, при одинаковых температуре и давлении, занимают одинаковые объемы. При нормальных условиях объем моля равен  $V_\mu = 22,41 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/моль.

7. Закон Дальтона: давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений  $P$ , входящих в неё газов:

$$P_{см} = P_1 + P_2 + \dots + P_n. \quad (3)$$

Парциальное давление  $P_n$  – давление, которое оказывал бы данный газ, если бы он один занимал весь объем.

При  $P_{см} = P_1 + P_2$ ,  $v_{см} = m_1/\mu_1 + m_2/\mu_2$  давление смеси газов:

$$P_{см} = \frac{m_1 \cdot R \cdot T}{\mu_1 \cdot V} + \frac{m_2 \cdot R \cdot T}{\mu_2 \cdot V} = \frac{R \cdot T}{V} \left( \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} \right). \quad (4)$$

Где  $\mu$  – молярная масса газа, кг/моль;  $R$  – газовая постоянная, равная 8,31 Дж/моль·град;



## 1.2. Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева – Клапейрона)

Между параметрами: давлением  $P$ , объёмом  $V$  и температурой  $T$  существует определенная связь, называемая уравнением состояния, которое в общем виде дается выражением

$$f(P, V, T) = 0,$$

где каждая из переменных является функцией двух других.

В соответствии с законами Бойля – Мариотта и Гей-Люссака, французский физик Б. Клапейрон сделал заключение, что для данной массы газа величина  $PV/T$  остаётся постоянной, т.е.

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \text{ или } \frac{PV}{T} = const. \quad (5)$$

Русский ученый Д.И. Менделеев объединил известные законы Бойля – Мариотта, Гей-Люссака и Шарля с законом Авогадро. Уравнение, связывающее все эти законы для состояния идеального газа, называется уравнением Менделеева – Клапейрона и записывается в виде:

$$P \cdot V = \nu \cdot R \cdot T = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot T, \quad (6)$$

где  $P$  - давление газа, Па;  $V$  - объём, занимаемый газом, м<sup>3</sup>;  $\nu$  - количество вещества, моль;  $m$  - масса газа, кг;  $\mu$  - молярная масса газа, кг/моль;  $R$  - газовая постоянная, равная 8,31 Дж/моль·град;  $T$  - температура, К.

Уравнение Менделеева – Клапейрона для смеси газов:

$$P \cdot V = \left( \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} + \dots + \frac{m_n}{\mu_n} \right) \cdot R \cdot T. \quad (7)$$

### 1.3. Температура и средняя кинетическая энергия теплового движения молекул. Термометры. Температурные шкалы

Температура (от лат. *temperatura* — надлежащее смешение, нормальное состояние) — скалярная физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы. Температура всех частей системы, находящейся в равновесии, одинакова. Если система не находится в равновесии, то между её частями, имеющими различную температуру, происходит теплопередача (переход энергии от более нагретых частей системы к менее нагретым), приводящая к выравниванию температур в системе. Таким образом, именно средняя кинетическая энергия атомов и молекул служит характеристикой системы в состоянии равновесия. Это свойство позволяет определить параметр состояния, выравнивающийся у всех тел, контактирующих между собой, как величину, пропорциональную средней кинетической энергии частиц в сосуде. Чтобы связать энергию с температурой, Больцман ввел коэффициент пропорциональности  $k$ :

$$T = \frac{2}{3 \cdot k} \cdot \frac{m \cdot \langle v_{\text{кв}}^2 \rangle}{2}, \quad (8)$$

где  $\langle v_{\text{кв}}^2 \rangle$  — средняя квадратичная скорость молекул,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж·К<sup>-1</sup> — постоянная Больцмана.

Величину  $T$  называют абсолютной температурой и измеряют в градусах Кельвина (К). Она служит мерой кинетической энергии теплового движения частиц идеального газа.

Из (8) получим:

$$E_k = \frac{m \cdot \langle v_{\text{кв}}^2 \rangle}{2} = \frac{3}{2} kT. \quad (9)$$

Формула (9) применима для расчетов средней кинетической энергии на одну молекулу идеального газа.

Так как температура определяется средней энергией движения молекул, то она, как и давление, является статистической величиной, то есть параметром, проявляющимся в результате совокупного действия огромного числа молекул. Изходя из этого

основное уравнение молекулярно-кинетической теории можно вывести из  $P = \frac{2}{3} n \langle E_k \rangle$ , где  $\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT$ ,  $n$  – концентрация молекул газа. Отсюда:

$$P = nkT. \quad (10)$$

Температура не может быть измерена непосредственно. Об изменении температуры судят по изменению других физических параметров тел (объёма, давления, электрического сопротивления, интенсивности излучения и др.), однозначно с ней связанных (так называемых термометрических свойств). Изменение этого параметра однозначно связывается с изменением температуры. Классическим примером термодинамического термометра может служить газовый термометр, в котором температуру определяют методом измерения давления газа в баллоне постоянного объёма (рис. 5).

Объём газа в трубке  $V = \frac{n \cdot k}{P_0} T$  пропорционален температуре, а

поскольку высота подъёма ртутной капли пропорциональна объёму  $V$ , то она пропорциональна и температуре  $T$ . В газовом термометре



необходимо использовать идеальный газ, если в трубку вместо идеального газа поместить фиксированное количество жидкой ртути, то получим обычный ртутный термометр, так как объём ртути вблизи комнатной температуры изменяется почти пропорционально температуре.

Термометры, в которых вместо идеального газа используются какие-либо другие вещества, приходится калибровать по показаниям точных газовых термометров. Используемые в быту температурные шкалы — как Цельсия, так и Фаренгейта

Рис. 5. Газовый термометр.

(используемая, в основном, в США), — не являются абсолютными и

поэтому неудобны при проведении экспериментов в условиях, когда температура опускается ниже точки замерзания воды, из-за чего температуру приходится выражать отрицательным числом. Для таких случаев были введены абсолютные шкалы температур.

Одна из них называется шкалой Ранкина, а другая — абсолютной термодинамической шкалой (шкалой Кельвина); температуры по ним измеряются, соответственно, в градусах Ранкина ( $^{\circ}\text{Ra}$ ) и кельвинах (К). Обе шкалы начинаются при температуре абсолютного нуля. Различаются они тем, что цена одного деления по шкале Кельвина равна цене деления шкалы Цельсия, а цена деления шкалы Ранкина эквивалентна цене деления термометров со шкалой Фаренгейта. Температуре замерзания воды при стандартном атмосферном давлении соответствуют 273,15 К, 0  $^{\circ}\text{C}$ , 32  $^{\circ}\text{F}$ .

В физике и технике за абсолютную шкалу температур принята шкала Кельвина. В системе СИ термодинамическую шкалу Цельсия определяют через шкалу Кельвина:  $t(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15$ . Температура по шкале Фаренгейта связана с температурой по шкале Цельсия ( $t^{\circ}\text{C}$ ) соотношением  $t^{\circ}\text{C} = 5/9 (t^{\circ}\text{F} - 32)$  или  $t^{\circ}\text{F} = 9/5 t^{\circ}\text{C} + 32$ .

Современная термометрия основана на шкале идеального газа, где в качестве термометрической величины используют давление. Шкала газового термометра – является абсолютной ( $T = 0$ ;  $P = 0$ ). Также на практике для измерения температуры также используют жидкостные и механические термометры, термопару, термометр сопротивления, газовый термометр, пирометр. Самым точным практическим термометром является платиновый термометр сопротивления. Разработаны новейшие методы измерения температуры, основанные на измерении параметров лазерного излучения.

## 2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ. ТАРИРОВКА ГАЗОВОГО ТЕРМОМЕТРА

### Цель работы:

- 1) экспериментальная проверка уравнений состояния идеального газа;
- 2) демонстрация принципа работы газового термометра.

**Теоретическое содержание работы** представлено в первом разделе методических указаний.

### Экспериментальная установка

Вид и схема виртуальной экспериментальной установки для исследования газовых законов и тарировки газового термометра изображена на рисунках 6 и 7.

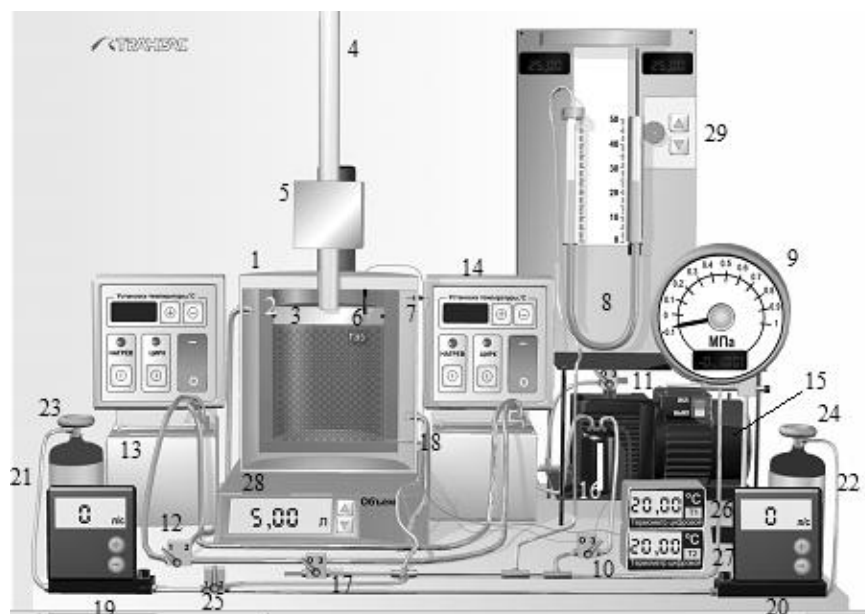


Рис. 6. Общий вид виртуальной экспериментальной установки

Назначение и характеристика основных элементов установки:

а) Термостатированный резервуар (1), с заключенным в нем цилиндром (2) с поршнем (3). Посредством штока (4) и реверсивного шагового привода (5) поршень может перемещаться в цилиндре. Управляется шаговый привод пультом (28), отображающим текущий объем под поршнем.

Параметры:

- объем под поршнем (геометрический):  $V_{\min} = 0$  л,  $V_{\max} = 5$  л;
- допустимое давление:  $P_{\max} = 10$  атм =  $10^6$  Па;
- теплоемкость резервуара:  $C_S = 7000$  Дж/°С.

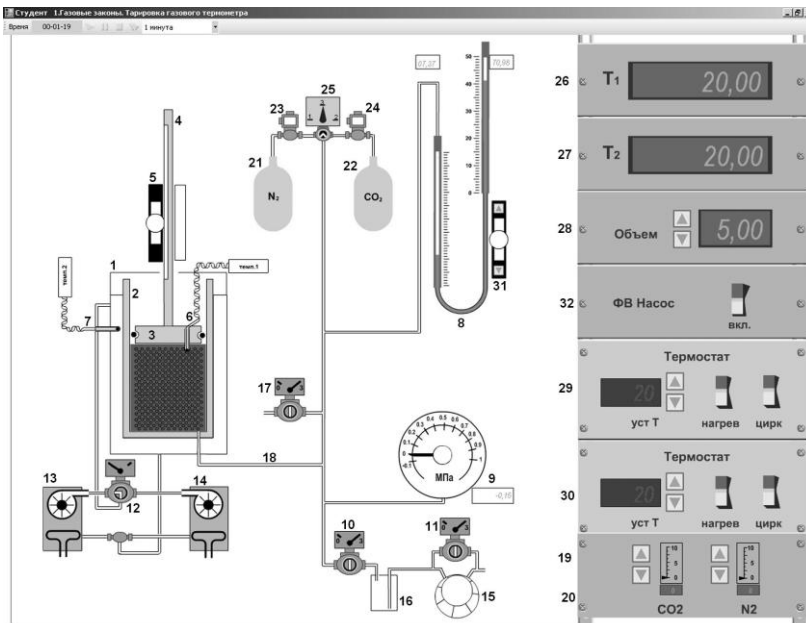


Рис. 7. Схема установки.

б) Термостаты. Термостатирование объема осуществляется прокачиваемой водой, температура которой поддерживается термостатами (13) и (14). Выбор термостата, вода из которого в данный момент подается в объем (1), осуществляется краном (12). Каждый термостат имеет собственный пульт управления: (29) и (30).

Термостаты расположены ниже уровня цилиндра и при отключении циркуляционного насоса вода из рубашки цилиндра стекает в соответствующий термостат. Термостат может находиться в трех состояниях:

1) "ВЫКЛ" - переключатели [нагрев] и [цирк.] в положении [выключено], если в этом состоянии термостат подключен к системе краном (12), то в него стекает вода из рубашки цилиндра;

2) "ВКЛ" - переключатели [нагрев] и [цирк.] в положении [включено], при этом на выходе термостата температура равна заданной регулятором [Уст. Т] независимо от величины температуры на входе;

3) "ЦИРК." - переключатель [нагрев] в положении [выключено], переключатель [цирк.] в положении [включено], при этом температура на выходе термостата равна температуре на входе.

Параметры:

- диапазон задаваемых температур:  $t_{\min} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\max} = 98 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

- объем циркулирующей воды: 5 л.

в) Система заполнения цилиндра. Для заполнения или вентиляции объема цилиндра служат краны: (17) - соединяет внутренний объем цилиндра с атмосферой; (25) подключает к магистрали баллоны (21) и (22), содержащими азот и углекислый газ. Давление подаваемого газа задается редукторами (23) и (24), которые управляются с пультов (19) и (20). Кран (25) имеет три положения: "3" - закрыт; "1" - баллон (21); "2" - баллон (22).

г) Система откачки цилиндра. Узел откачки газа состоит из форвакуумного насоса (15), ресивера-маслоотделителя (16), кранов (10) и (11). Включение насоса осуществляется с пульта (32). Состояние кранов при выключенном насосе: кран (11) открыт, кран (10) закрыт. После включения насоса сначала закрывается кран (11), затем открывается кран (10). Перед выключением насоса сначала закрывается кран (10), затем открывается кран (11), после этого выключается насос. При нарушении порядка открывания-закрывания кранов может происходить выброс масла из насоса в маслоотделитель (16), если это произошло, то при закрытых кранах (10) и (11) должен на некоторое время включаться насос для закачки

масла обратно в картер насоса. Контроль давления при откачке осуществляется мановакуумметром (9).

д) Контроль давления. Для контроля давления служит мановакуумметр (9). Прибор подключаются к магистрали (18). Показания приборов - относительно атмосферного давления.

Параметры:

- шкала мановакуумметра: -  $0,1 \div 0 \div 1$  МПа.
- точность -  $0,01$  МПа.

е) Измерение температуры внутри цилиндра осуществляется термопарой (6), индикация температуры - цифровой термометр (26). Для измерения температуры воды используется термопара (7), индикация температуры - цифровой термометр (27).

з) Для выполнения "*Тарировки газового термометра*" к внутреннему объему цилиндра подключается жидкостный (ртутный) "U"-образный абсолютный манометр (8) с заглушенной правой трубкой, колена которого соединены гибким шлангом. Правое колено манометра может перемещаться вверх-вниз посредством привода (31).

Параметры:

- шкала столбика:  $0 \div 500$  мм;
- точность показаний  $0,25$  мм.

#### **Порядок выполнения работы**

1. Запустите лабораторную работу. Отметьте в лабораторном журнале указанный преподавателем тип используемого газа ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ) и его начальное давление (не более  $0,2$  Мпа).

2. Изотермический процесс. Установите на термостатах температуры, отличающиеся на  $50 \div 70^\circ\text{C}$ . Подключите левый термостат к системе. Установите поршень в крайнее верхнее положение, заполните систему заданным газом при требуемом давлении. Перед заполнением системы новым газом необходимо выполнить вакуумирование системы.

Перемещая поршень вниз, запишите пары значений (давление и объем) для 10 промежуточных положений поршня. Повторите измерения, подключив к системе правый термостат. По полученным данным заполните таблицу 1 и постройте графики процесса в ( $P - V$ ) координатах.



3. Изобарный процесс. Установите на левом термостате максимальную температуру, подключите его к системе. Заполните систему заданным газом при требуемом давлении. Запишите начальные параметры состояния. Уменьшите температуру на  $10^{\circ}\text{C}$ , дождитесь установления температуры в цилиндре. Переместите поршень вниз, чтобы восстановить начальное давление, запишите полученные параметры состояния. Продолжайте охлаждение газа и перемещение поршня до температуры  $20^{\circ}\text{C}$ . Повторите измерения для другого начального давления в системе. По полученным данным заполните таблицу 1 и постройте графики процесса в  $(P - V)$  координатах.

4. Изохорный процесс. Установите на левом термостате температуру  $20^{\circ}\text{C}$ , подключите его к системе. Заполните систему заданным газом при требуемом давлении и объеме. Запишите начальные параметры состояния. Увеличивайте температуру до максимальной с шагом  $10^{\circ}\text{C}$ , записывая параметры состояния. Повторите измерения для других начальных параметров. По полученным данным заполните таблицу 1 и постройте графики процесса в  $(P - V)$  координатах.

5. Тарировка газового термометра. Установите поршень в верхнее положение. Установите на левом термостате температуру  $20^{\circ}\text{C}$ , подключите его к системе. Откачайте систему до давления  $-0,02 \div -0,06$  МПа. Подключите к магистрали ртутный манометр. Перемещением правого колена добейтесь, чтобы правый столбик ртути не доходил до верхнего края трубки на  $20 \div 30$  мм. Запишите параметры состояния газа и значения уровней ртути в коленах манометра. Поднимите температуру на  $10^{\circ}\text{C}$ , дождитесь установления температуры в цилиндре. Перемещением правого колена добейтесь, чтобы уровень ртути в левом колене вернулся к исходному значению. Запишите параметры состояния газа и значения уровней ртути в коленах манометра. Продолжайте измерения, повышая температуру газа до максимальной.

По полученным результатам измерений заполните таблицу 2 и рассчитайте давление газа (в мм рт. ст.) для каждой температуры. Постройте калибровочный график зависимости  $P = f(t)$ .

## Обработка результатов измерений

1. Занесите результаты измерений в таблицы

Таблица 1.

Физические величины	Номер опыта	1	...	n
	Единицы измерений			
$t$	$^{\circ}\text{C}$			
$P$	Па			
$V$	л			

Таблица 2.

Физические величины	Номер опыта	1	...	n
	Единицы измерений			
$t$	$^{\circ}\text{C}$			
$P$	Па			
$l_{\text{лев}}$	мм			
$l_{\text{прав}}$	мм			

2. На координатных осях указать откладываемые физические величины и обозначить единицы величин.

3. Указать масштаб на осях координат (при очень больших или очень малых величинах, показательную часть в записи величины указать рядом с единицами измерений на оси).

4. Нанести полученные экспериментальные данные на координатную плоскость, обозначив их крестиком, кружочком или жирной точкой.

5. Провести через экспериментальные точки плавную линию, в соответствии с выбранным законом аппроксимации экспериментальных данных.

6. Определить абсолютные погрешности прямых измерений.

7. Вывести формулы для оценки максимальной абсолютной и относительной погрешности косвенных измерений.

8. Выполнить оценку максимальной абсолютной и относительной погрешности косвенных измерений.
9. Выполнить сравнительную оценку экспериментальных и справочных результатов.

### **Контрольные вопросы**

1. Опишите установку и порядок выполнения работы.
2. Дайте понятие идеального газа.
3. Поясните, почему изучая поведение реальных газов, мы часто пользуемся моделью идеального газа?
4. Запишите основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа и поясните его.
5. Дайте понятие моля вещества, как рассчитывается количество молей идеального газа, число молекул газа?
6. Сформулируйте законы идеального газа. Приведите графики изотерм, изобар, изохор.
7. Поясните физический смысл газовой постоянной  $R$ .
8. Что называется термодинамическим процессом?
9. В сосуде объемом  $V = 30$  л содержится идеальный газ при температуре  $0$  °С. После того, как часть газа была выпущена наружу, давление в сосуде понизилось на  $\Delta p = 0,78$  атм (без изменения температуры). Найти массу выпущенного газа. Плотность данного газа при нормальных условиях  $\rho = 1,3$  г/л.

### 3. ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Отчет оформляется в печатном виде на листах формата А4 в соответствии с требованиями, предъявляемыми кафедрой ОТФ, в котором помимо стандартного титульного листа должны быть раскрыты следующие пункты:

I. Цель работы.

II. Краткое теоретическое содержание:

1. явления, изучаемые в работе;
2. определение основных физических понятий, объектов, процессов и величин;
3. законы и соотношения (использованные при выводе расчетной формулы);
4. пояснения к физическим величинам, входящим в формулы, и единицы их измерений.

III. Схема установки.

IV. Основные расчетные формулы.

V. Формулы погрешности косвенных измерений.

VI. Таблицы с результатами измерений и вычислений. Таблицы должны иметь номер и название. Единицы измерения физических величин должны быть указаны в отдельной строке.

VII. Пример вычислений (для одного опыта):

1. исходные данные;
2. погрешности прямых измерений;
3. вычисления: [*величина = формула = подстановка чисел = результат вычисления, единицы измерений*].
4. вычисление погрешностей косвенных измерений.

VIII. Графический материал:

1. аналитическое выражение функциональной зависимости, которую необходимо построить;
2. на осях координат указать масштаб, наименование физической величины и единицы измерения;
3. на координатной плоскости должны быть нанесены экспериментальные точки;

4. по результатам эксперимента, представленным на координатной плоскости, провести плавную линию – аппроксимирующую функциональную теоретическую зависимость в соответствии с методом наименьших квадратов.

IX. Окончательный результат с указанием погрешности косвенных измерений.

X. Анализ полученного результата. Выводы.

#### **4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЗАЩИТЕ ОТЧЕТА**

К защите допускаются студенты, подготовившие отчет в соответствии с требованиями к его содержанию в установленные сроки. После проверки преподавателем содержания отчета, при наличии ошибок и недочетов, работа возвращается студенту на доработку.

При правильном выполнении лабораторной работы, соблюдении всех требований к содержанию и оформлению отчета, студент допускается к защите.

Для успешной защиты отчета необходимо изучить теоретический материал по теме работы, а также освоить математический аппарат, необходимый для вывода расчетных формул работы.

При подготовке к защите, помимо данного методического указания, необходимо использовать учебники и другие учебные пособия, рекомендованные к учебному процессу кафедрой ОТФ и Министерства образования и науки.

Во время защиты студент должен уметь ответить на вопросы преподавателя в полном объеме теоретического и методического содержания данной лабораторной работы, уметь самостоятельно вывести необходимые расчетные формулы, выполнить анализ полученных зависимостей и прокомментировать полученные результаты.

## 5. ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 3 – Множители и приставки для образования десятичных и кратных единиц

Множитель	Приставка		Множитель	Приставка	
	Наименование	Обозначение		Наименование	Обозначение
$10^3$	кило	к	$10^{-3}$	милли	м
$10^6$	мега	М	$10^{-6}$	микро	мк
$10^9$	гига	Г	$10^{-9}$	нано	н
$10^{12}$	тера	Т	$10^{-12}$	пико	п

Таблица 4 – Основные физические постоянные

Физическая величина	Численное значение
Атомная единица массы (унифицированная)	$1 \text{ а.е.м.} = 1,660531(11) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ $= 931,481(52) \text{ МэВ}$
Число Авогадро	$6,022169(40) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Давление атмосферное нормальное	$1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па}$
Молярная газовая постоянная	$8,3144(26) \text{ Дж/К} \cdot \text{моль}$
Объем идеального газа при нормальных условиях	$22,4136 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$
Постоянная Больцмана	$1,380622(59) \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$

Таблица 5 – Пересчет температуры между основными шкалами

Шкала условное обозначение	Из цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ )	В цельсий
Фаренгейт ( $^{\circ}\text{F}$ )	$[\text{F}] = [\text{C}] \times 9/5 + 32$	$[\text{C}] = ([\text{F}] - 32) \times 5/9$
Кельвин (К)	$[\text{K}] = [\text{C}] + 273.15$	$[\text{C}] = [\text{K}] - 273.15$

Rankin(Ренкин) (°R)	$[\text{°R}] = ([\text{°C}] + 273.15) \times \frac{9}{5}$	$[\text{°C}] = ([\text{°R}] - 491.67) \times \frac{5}{9}$
------------------------	---	---

Таблица 6 – Сравнение температурных шкал

Описание	Кельвин	Цельсий	Фаренгейт	Ранкин
Абсолютный нуль	0	-273,15	-459,67	0
Температура таяния смеси Фаренгейта (соль и лёд в равных количествах)	255,37	-17,78	0	459,67
Температура замерзания воды (Нормальные условия)	273,15	0	32	491,67
Средняя температура человеческого тела	309,75	36,6	98,2	557,9
Температура кипения воды (Нормальные условия)	373,15	100	212	671,67

условия)				
Солнце	5800	5526	9980	10440

## **6. РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

### ***Основная литература***

1. *Калашиников Н.П.* Основы физики. Т. 1. М.: Дрофа, 2004.
2. *Савельев И.В.* Курс физики. Т. 1. М.: Высшая школа, 2009.
3. *Детлаф А.А.* Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. М.: Высшая школа, 2009.
4. *Матвеев А.Н.* Молекулярная физика. Спб, М., Краснодар: Лань, 2009.

### ***Базы данных, информационно-справочные и поисковые системы.***

5. Информационная система «Единое окно доступа к образовательным ресурсам» (<http://window.edu.ru/>).
6. Научная электронная библиотека <http://elibrary.ru/>.
7. Электронные версии учебников, пособий, методических разработок, указаний и рекомендаций по всем видам учебной работы, предусмотренных вузовской рабочей программой, находящиеся в свободном доступе для студентов, обучающихся в вузе, на внутри сетевом сервере <http://www.spmi.ru/>.



## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Идеальные газы.....	5
1.1. Законы идеальных газов.....	5
1.2. Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева – Клапейрона).....	9
1.3. Температура и средняя кинетическая энергия теплового движения молекул. Термометры. Температурные шкалы.....	10
2. Лабораторная работа. Газовые законы. Тарировка газового термометра.....	13
3. Требования к содержанию отчета по лабораторной работе.....	20
4. Рекомендации по защите отчета.....	21
5. Приложение.....	22
6. Рекомендательный библиографический список.....	24