

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Северо-Кавказский федеральный университет»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическим занятиям
по дисциплине «Физика»
для студентов направления подготовки
23.03.01 Технология транспортных процессов
(Направленность (профиль) «Транспортная логистика»)

Ставрополь, 2026

ПРЕДИСЛОВИЕ

Методические указания предназначены для оказания студентам помощи при выполнении лабораторного практикума на занятиях, а также при подготовке к ним.

В методических указаниях изложен теоретический материал по разделам «Явления переноса» и «Основы термодинамики» и представлены 8 лабораторных работ.

Каждую работу сопровождает краткое «Теоретическое обоснование», необходимое для понимания процессов и явлений, изучаемых по условиям учебного эксперимента.

В разделе «Аппаратура, оборудование и материалы» даётся достаточное количество сведений об объекте измерений, а также приводится описание лабораторной установки, на котором проводятся измерения.

Раздел «Методика и порядок выполнения работы» помогает понять принципы, заложенные в методику лабораторного эксперимента, поэтапно проводить все необходимые операции для получения той или иной характеристики объекта измерения.

В каждой лабораторной работе имеются контрольные вопросы, ответы на которые позволяют не только подготовиться к защите лабораторных работ, но и оценить степень усвоения соответствующего теоретического материала.

В методических указаниях приведен список рекомендуемой литературы, который окажет существенную помощь при подготовке к лабораторным работам.

1. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА

СРЕДНЯЯ ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ

Молекулы газа движутся хаотично, их траектории представляют собой ломанные линии из-за непрерывных соударений друг с другом. Путь, пройденный молекулами между двумя последовательными соударениями, называется длиной свободного пробега λ (рис. 1.1). Длина свободного пробега меняется от соударения к соударению, поэтому вводится понятие средней длины свободного пробега $\langle \lambda \rangle$, как среднего пути, пройденного молекулой между двумя последовательными соударениями.

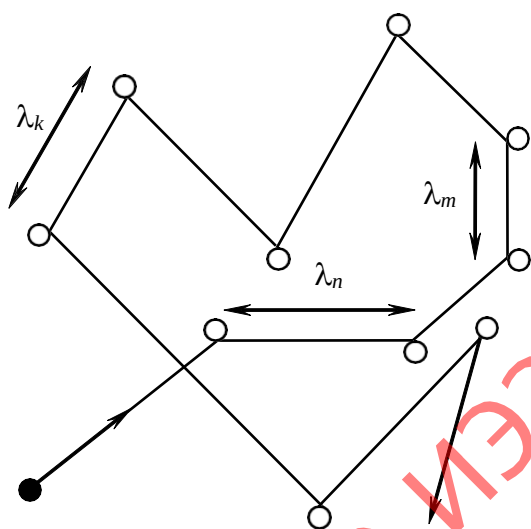


Рисунок 1.1

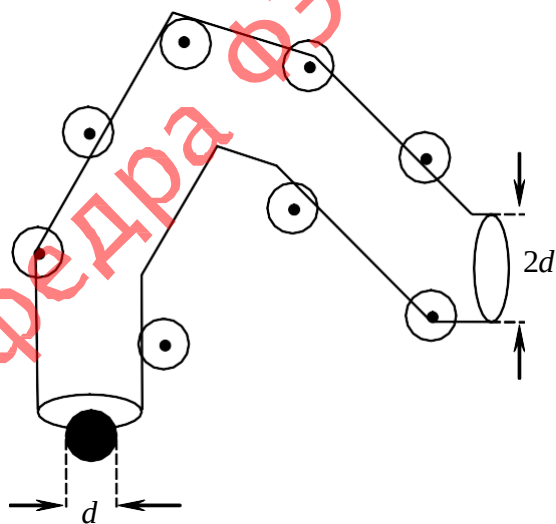


Рисунок 1.2

Для нахождения средней длины свободного пробега необходимо средний путь $\langle L \rangle$, пройденный молекулой за некоторый промежуток времени t , разделить на среднее число соударений $\langle Z \rangle$ за это же время

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle L \rangle}{\langle Z \rangle} \quad \text{или} \quad \langle \lambda \rangle = \frac{\langle u \rangle}{\langle z \rangle},$$

где $\langle u \rangle$ – средняя арифметическая скорость молекулы,

$\langle z \rangle$ – среднее число соударений в единицу времени.

При движении со скоростью $\langle u_{\text{отн}} \rangle$ молекула будет сталкиваться со всеми молекулами газа, центры которых отстоят от траектории ее движения на расстояниях меньших или равных эффективному диаметру молекулы d (рис. 1.2), то есть со всеми молекулами,

центры которых лежат внутри ломанного цилиндра длиной $\langle u_{\text{отн}} \rangle t$ и радиусом основания d .

Среднее число соударений молекулы в единицу времени

$$\langle z \rangle = \pi d^2 n \langle u_{\text{отн}} \rangle,$$

где n – концентрация молекул,

$\langle u_{\text{отн}} \rangle$ – средняя скорость движения молекул относительно друг друга (средняя относительная скорость).

Так как средняя относительная скорость $\langle u_{\text{отн}} \rangle$ связана со средней арифметической скоростью движения $\langle u \rangle$ соотношением

$$\langle u_{\text{отн}} \rangle = \sqrt{2} \langle u \rangle,$$

$$\text{то} \quad \langle z \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 n \langle u \rangle \quad (1.1)$$

$$\text{и} \quad \langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \pi n d^2}. \quad (1.2)$$

Выразив концентрацию n молекул из основного уравнения молекулярно-кинетической теории газа

$$p = nkT,$$

$$\text{получим} \quad \langle \lambda \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 p}. \quad (1.3)$$

ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ

Хаотичность теплового движения молекул приводит к постоянному перемешиванию частиц, изменению их импульсов и энергий. Если в газе существует пространственная неоднородность плотности, температуры или скорости упорядоченного перемещения отдельных слоев газа, то хаотическое движение молекул со временем выравнивает эти неоднородности, то есть в процессе хаотического теплового движения происходит перенос молекулами своих физических величин: массы, энергии или импульса. Механизм этих явлений одинаков и они носят название явлений переноса.

Исходя из представлений молекулярно-кинетической теории газов, получим общее уравнение для явлений переноса.

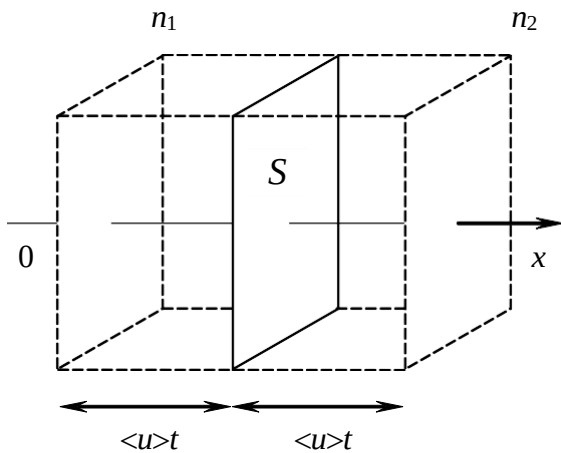


Рисунок 1.3

Рассмотрим некоторую площадку S , расположенную в газе (рис. 1.3).

Так как молекулы газа движутся хаотично, то в направлении оси Ox будет двигаться только $1/6$ часть всех молекул.

Двигаясь со средней арифметической скоростью $\langle u \rangle$ через площадку S пройдут все молекулы, находящиеся в объемах $\langle u \rangle t S$ слева (N_1) и справа

(N_2) от площадки

$$N_1 = \frac{1}{6} n_1 \langle u \rangle S t, \quad N_2 = \frac{1}{6} n_2 \langle u \rangle S t,$$

где n_1, n_2 – концентрация молекул слева и справа от площадки S .

Эти молекулы, перемещаясь через площадку S , переносят некоторую физическую величину φ (массу, энергию, импульс).

Количество физической величины, переносимое молекулами в направлении оси Ox через площадку S за время t ,

$$N_1 \varphi = \frac{1}{6} (n_1 \varphi) \langle u \rangle S t.$$

Количество физической величины, переносимое в обратном направлении, через площадку S за время t ,

$$N_2 \varphi = \frac{1}{6} (n_2 \varphi) \langle u \rangle S t.$$

Если рассматриваемый газ неоднороден по своим физическим характеристикам, то их перенос $\Delta N \varphi$ через площадку S за время t равен

$$\Delta N\varphi = \frac{1}{6} (n_1\varphi - n_2\varphi) \langle u \rangle St.$$

Перенос количества физической величины $n\varphi$ осуществляется при соударении молекул, поэтому значение физической величины φ сохраняется неизменным на расстоянии $\langle \lambda \rangle$ влево и вправо от площадки S . Поскольку $\langle \lambda \rangle$ мало, то разность $(n_1\varphi - n_2\varphi)$ можно представить в виде

$$n_1\varphi - n_2\varphi = - \frac{dn\varphi}{dx} 2\langle \lambda \rangle.$$

Тогда

$$\Delta N\varphi = - \frac{1}{3} \left(\frac{dn}{dx} \varphi \right) \langle \lambda \rangle \langle u \rangle St. \quad (1.4)$$

Знак « $-$ » показывает, что перенос физической величины происходит в направлении ее уменьшения.

Формула (1.4) называется уравнением переноса. На его основе рассмотрим явление переноса: диффузию, теплопроводность и внутреннее трение (вязкость) газов.

ДИФФУЗИЯ ГАЗОВ

Диффузия – явление, заключающееся в самопроизвольном взаимном проникновении и перемешивании частиц газа. Диффузия возникает вследствие неодинаковой плотности в различных частях объема газа или различия в концентрациях в разных частях объема смеси газов.

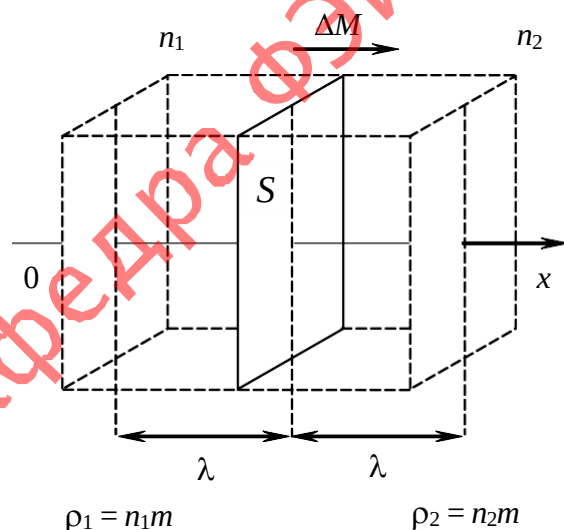


Рисунок 1.4

Диффузия заключается в переносе массы газа из области с большей концентрацией данного газа в область с меньшей концентрацией.

Рассмотрим некоторый объем газа (рис. 1.4) с неоднородностью плотности, то есть $\rho_1 > \rho_2$,

$$\rho_1 = n_1 m, \quad \rho_2 = n_2 m.$$

Переносимой физической величиной φ является масса m молекулы.

Тогда уравнение (1.4) примет вид:

$$\Delta Nm = \Delta M = - \frac{1}{3} \frac{dnm}{dx} \langle \lambda \rangle \langle u \rangle St = - \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle u \rangle \frac{d\rho}{dx} St,$$

где ΔM – масса газа, переносимая при диффузии за время t , через площадку S , перпендикулярно направлению убывания плотности ρ .

Обозначив $\frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle u \rangle = D,$

получим
$$\Delta M = - D \frac{d\rho}{dx} St. \quad (1.5)$$

Формула (1.5) называется уравнением диффузии или законом Фика.

Коэффициент диффузии D зависит от сорта газа и его состояния (p , T).

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГАЗОВ

Теплопроводность – явление выравнивания температур различных областей газа. Теплопроводность заключается в переносе энергии молекулами из более нагретых областей к более холодным.

Рассмотрим некоторый объем газа (рис. 1.5) с неоднородностью в отношении температуры ($T_1 > T_2$).

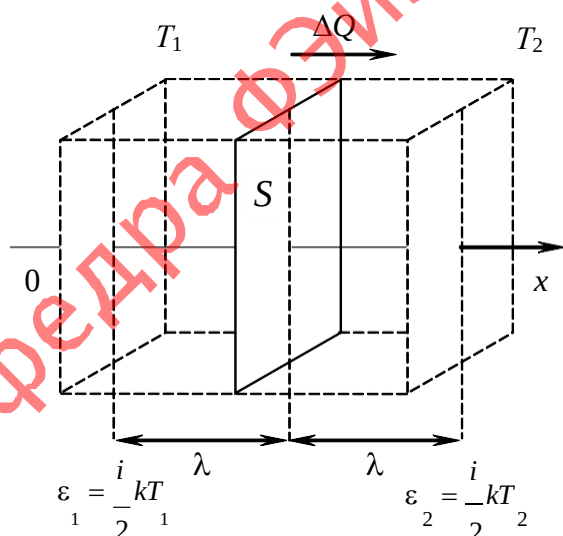


Рисунок 1.5

Переносимой физической величиной является энергия молекул ε . Так как наблюдается неоднородность по температуре, то есть $T_1 > T_2$, а

$$\varepsilon_1 = \frac{i}{2} kT_1, \quad \varepsilon_2 = \frac{i}{2} kT_2, \quad \text{то } \varepsilon_1 > \varepsilon_2,$$

где i – число степеней свободы молекулы газа.

Уравнение переноса (1.4) для теплопроводности можно записать:

$$\Delta N \frac{i}{2} kT = \Delta Q,$$

$$\Delta Q = - \frac{1}{3} \left(\frac{d}{dx} n \frac{i}{2} kT \right) \langle \lambda \rangle \langle u \rangle S t = - \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle u \rangle n \frac{i}{2} k \frac{dT}{dx},$$

где ΔQ – количество теплоты, переносимое за счет теплопроводности за время t через площадку S , в направлении убывания температуры T .

Обозначив
$$\frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle u \rangle n \frac{i}{2} k = \chi, \quad (1.6)$$

получим
$$\Delta Q = - \chi \frac{dT}{dx} S t. \quad (1.7)$$

Формула (1.7) – уравнение теплопроводности или закон Фурье.

Коэффициент теплопроводности χ не зависит от давления, если средняя длина свободного пробега меньше размеров сосуда.

ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ (ВЯЗКОСТЬ) ГАЗОВ

Внутреннее трение связано с взаимодействием между слоями газа, перемещающимися параллельно друг другу с разными по величине скоростями. Причиной внутреннего трения является наложение упорядоченного движения слоев газа с различными скоростями на хаотическое тепловое движение молекул со средней скоростью $\langle u \rangle$, величина которой зависит от температуры.

Благодаря тепловому движению, молекулы переходят из слоя, движущегося со скоростью $\bar{v}_1$, в слой, движущийся со скоростью $\bar{v}_2$ и наоборот. При этом молекулы переносят импульсы своего упорядоченного движения.

Рассмотрим (рис. 1.6) площадку S , расположенную между двумя слоями

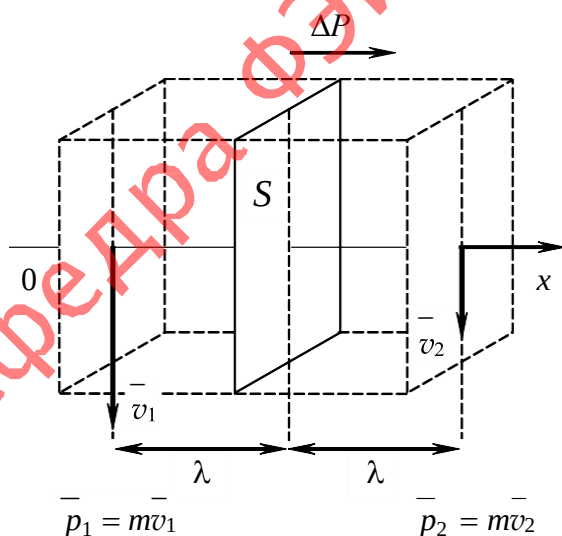


Рисунок 1.6

газа, движущегося соответственно со скоростями v_1 и v_2 ($v_1 > v_2$), то есть наблюдается неоднородность в отношении импульса упорядоченного движения молекул.

Так как $v_1 > v_2$, то $mv_1 > mv_2$ и уравнение (1.4) примет вид

$$\Delta P = \Delta N m v,$$

$$\Delta P = - \frac{d(nmv)}{dx} \langle \lambda \rangle \langle u \rangle S t = - \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle u \rangle n m \frac{dv}{dx} S t,$$

где ΔP – изменение импульса слоя, ограниченного площадкой S , за время t .

Изменение импульса слоя газа равно импульсу силы трения, действующему в направлении движения газа (параллельному площадке S), то есть $\Delta P = F_{\text{тр}} t$.

$$\text{Тогда} \quad f_{\text{тр}} = \frac{F_{\text{тр}}}{S} = - \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle u \rangle n m \frac{dv}{dx} = - \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle u \rangle \rho \frac{dv}{dx},$$

где $f_{\text{тр}}$ – сила трения, действующая на единицу площади,

ρ – плотность газа.

$$\text{Обозначив} \quad \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle u \rangle \rho = \eta, \quad (1.7)$$

$$\text{получим} \quad f_{\text{тр}} = - \eta \frac{dv}{dx}. \quad (1.8)$$

Уравнение (1.8) называется уравнением внутреннего трения (вязкости) или законом Ньютона.

Коэффициент внутреннего трения (вязкости) η не зависит от давления, если средняя длина свободного пробега меньше размеров сосуда.

ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕНОСА В ЖИДКОСТЯХ

Молекулы жидкости расположены, в отличие от молекул газа, близко друг к другу и взаимодействуют друг с другом. Между молекулами располагаются микрополости. Молекула жидкости колеблется около положения равновесия некоторое время τ , затем она «перескакивает» на расстояние порядка сред-

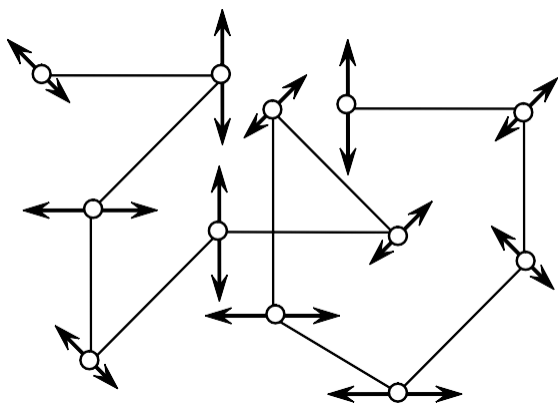


Рисунок 1.7

него расстояния $\langle \delta \rangle$ между соседними молекулами (рис. 1.7).

Среднее время $\langle \tau \rangle$ нахождения молекулы около положения равновесия (время релаксации) зависит от температуры, уменьшаясь с ее увеличением.

Средняя скорость перемещения молекул жидкости $\langle u \rangle = \frac{\langle \delta \rangle}{\langle \tau \rangle}$ невелика (значительно меньше, чем скорость молекул газа при той же температуре).

В жидкостях, как и газах, при появлении пространственной неоднородности плотности, температуры или скорости упорядоченного движения молекул, возникают явления переноса – диффузия, теплопроводность и внутреннее трение. Явления переноса в жидкостях, как и в газах, обусловлены тепловым движением молекул и подчиняются тем же законам Фика, Фурье и Ньютона.

Особенности строения жидкости и теплового движения их молекул сказываются на значениях коэффициентов переноса и на их зависимости от параметров состояния.

Коэффициент диффузии D жидкостей возрастает с увеличением температуры, что связано с сокращением времени релаксации и некоторым увеличением среднего расстояния $\langle \delta \rangle$ между положениями равновесия.

Процесс теплопроводности в жидкостях осуществляется путем взаимодействия колеблющихся молекул. Так как молекулы жидкости расположены близко друг к другу, то коэффициент теплопроводности у них значительно больше, чем у газов.

Механизм внутреннего трения у жидкостей отличен от газов. Молекулы жидкостей большую часть времени находятся около положения равновесия, поэтому масса жидкости увлекает соседние слои, в основном, за счет сил сцепления. Коэффициент внутреннего трения у жидкостей с ростом температуры резко уменьшается. Вязкость жидкости во много раз больше, чем вязкость газа.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.1

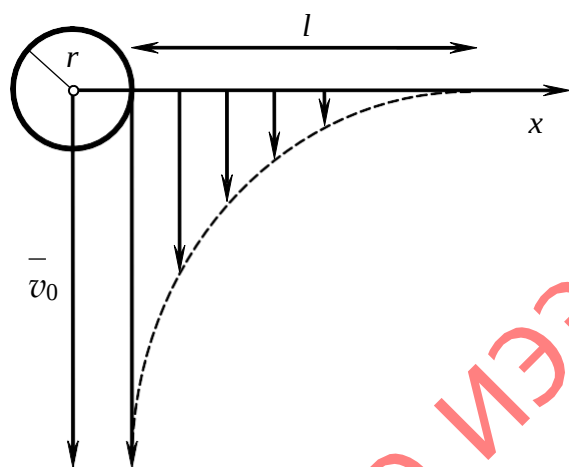
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ:

Изучить явление вязкости жидкости, определить коэффициент внутреннего трения (вязкости) жидкости.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ:

Рассмотрим движение шарика с малой скоростью v_0 в жидкости. Распределение скоростей в соседних слоях жидкости, увлекаемых шариком, имеет



вид, изображенный на рис. 2.1.1.

В непосредственной близости к поверхности шарика скорость слоев жидкости $v = v_0$, а по мере удаления она уменьшается и становится практически равной нулю на некотором расстоянии l от поверхности.

Чем больше радиус шарика r , тем большая масса жидкости вовлека-

Рисунок 2.1.1

ется им в движение и l должно быть пропорционально r :

$$l = \alpha r.$$

Для шара коэффициент пропорциональности $\alpha = \frac{2}{3}$.

Среднее значение градиента скорости

$$\left\langle \frac{dv}{dx} \right\rangle = \frac{v_0 - 0}{l} = \frac{v_0 - 0}{\alpha r} = \frac{v_0}{\alpha r}.$$

Сила сопротивления

$$F_C = f_{\text{тр}} S = -\eta \left\langle \frac{dv}{dx} \right\rangle S = -\eta \frac{v_0}{\alpha r} S = -\eta \frac{v_0}{\alpha r} 4\pi r^2 = -6\pi \eta r v_0, \quad (2.1.1)$$

где $f_{\text{тр}}$ – сила трения, действующая на единицу площади,

$S = 4\pi r^2$ – площадь поверхности шарика,

η – коэффициент внутреннего трения жидкости.

При падении шарика в вязкой жидкости на него действуют силы (рис. 2.1.2):

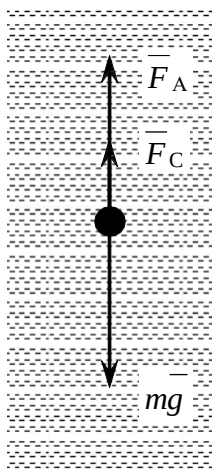


Рисунок 2.1.2

– сила тяжести mg

$$mg = \rho_{\text{ш}} g V = \rho_{\text{ш}} g \frac{4}{3} \pi r^3, \quad (2.1.2)$$

где V – объем шарика,

r – радиус шарика,

$\rho_{\text{ш}}$ – плотность материала шарика;

– выталкивающая сила Архимеда F_A

$$F_A = \rho_{\text{ж}} g V, \quad (2.1.3)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости;

– сила сопротивления движению (сила Стокса) F_C .

$$F_C = 6 \pi \eta r v_0.$$

Согласно второму закону Ньютона с учетом (2.1.1) – (2.1.3)

$$m \bar{g} + \bar{F}_A + \bar{F}_C = m \bar{a} \quad \text{или} \quad mg - F_A - F_C = ma,$$

$$\rho_{\text{ш}} g V - \rho_{\text{ж}} g V - 6 \pi \eta r v_0 = ma.$$

В начале движения скорость движения шарика возрастает, но по мере увеличения скорости сила сопротивления также возрастает и наступает момент, когда сила тяжести уравнивается суммой сил Архимеда и Стокса; равнодействующая всех сил становится равной нулю:

$$\rho_{\text{ш}} g V - \rho_{\text{ж}} g V - 6 \pi \eta r v_0 = 0 \quad (2.1.4)$$

и движение шарика становится равномерным.

Решая уравнение движения (2.1.4) относительно коэффициента внутреннего трения (вязкости) η жидкости, получим

$$\eta = \frac{\rho_{\text{ш}} g V - \rho_{\text{ж}} g V}{6 \pi r v_0} = \frac{(\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}}) g V}{6 \pi r v_0} = \frac{2 (\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}}) g r^2}{9 v_0}.$$

Скорость v_0 равномерного движения шарика можно определить, зная расстояние L равномерного участка пути и время t движения на этом участке.

Тогда
$$\eta = \frac{2 (\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}}) g r^2 t}{9 L} \text{ или } \eta = \frac{(\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}}) g d^2 t}{18 L}, \quad (2.1.5)$$

где d – диаметр шарика.

АППАРАТУРА, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Для определения коэффициента внутреннего трения (вязкости) η жидкости используется установка, внешний вид которой приведен на рис. 2.1.3.

Экспериментальная установка состоит из сосудов 1 с исследуемыми жидкостями, установленных вертикально, измерительной миллиметровой линейки 2, металлических шариков 3 различного диаметра, электронного секундомера 4 и штангенциркуля или микрометра.

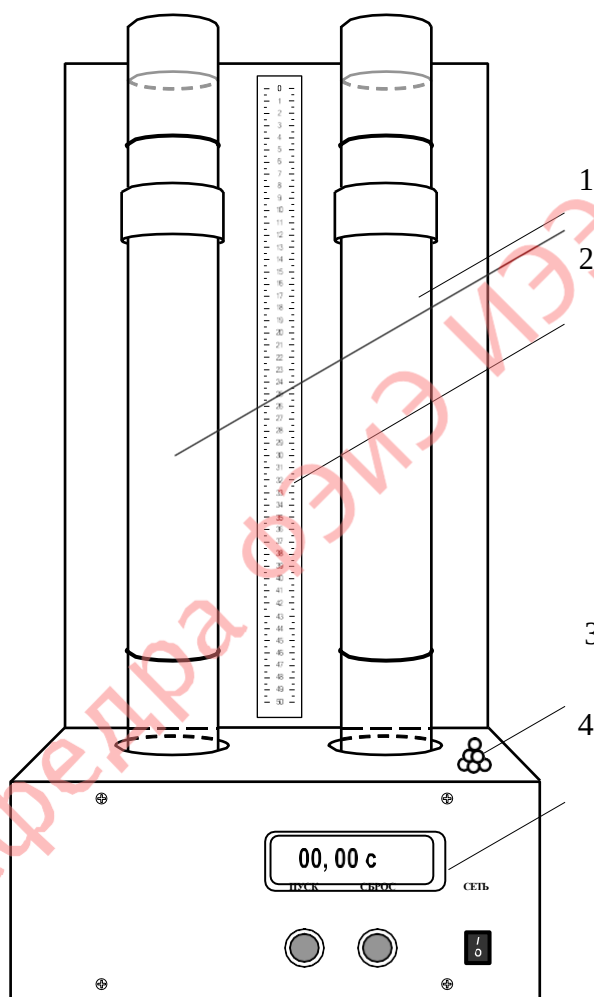


Рисунок 2.1.3

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ

БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторных работ необходимо выполнять основные правила внутреннего распорядка и техники безопасности при работе в лабораториях [4].

К работе на приборах допускаются студенты только после изучения на-

стоящих методических указаний и получения допуска у преподавателя.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Установив верхнюю и нижнюю метки на линейке, измерить расстояние L между ними (верхняя метка должна быть на 5–10 см ниже уровня жидкости).
2. Измерив диаметр шарика d , опустить его в сосуд с жидкостью.
3. Измерить время t движения шарика между метками.
4. Повторив опыт не менее 5 раз, рассчитать коэффициент внутреннего трения (вязкости) η жидкости по формуле (2.1.5) и оценить погрешность измерений.
5. Повторить эксперимент по п.п.1–5 для другой жидкости.
6. Рассчитать погрешность измерений.
7. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 2.1.1.

Таблица 2.1.1

№ п/п	L , м	d , м	t , с	η_i , Па·с	η , Па·с	Примечание
1						$\rho_{\text{ш}} = \dots \text{ кг/м}^3$
2						$\rho_{\text{ж}} = \dots \text{ кг/м}^3$
...						$g = \dots \text{ м/с}^2$

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И ЕГО ФОРМА

Отчет по лабораторной работе оформляется в соответствии с формой, приведенной в приложении 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

В чем заключается метод определения коэффициента вязкости жидкости по Стоксу?

От чего зависит коэффициент вязкости η жидкости?

Какие силы действуют на шарик при его движении в жидкости?

Каков физический смысл коэффициента вязкости жидкости?

Почему измерения верны только при малых скоростях?

Как влияет на результат измерений диаметр сосуда?

Можно ли измерить коэффициент вязкости η жидкости, если плотность $\rho_{ш}$ шарика меньше плотности $\rho_{ж}$ жидкости?

Для какой жидкости глицерина или воды коэффициент вязкости можно определить точнее рассматриваемым методом?

Как выгоднее (с физической точки зрения) транспортировать жидкость по трубопроводу – в горячем или в холодном состоянии? а газ?

Кафедра ФЭиЭ ИЭЭиН ФГАОУ ВПО СКФУ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ И СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ ВОЗДУХА

ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ:

Определить коэффициент внутреннего трения (вязкости) и среднюю длину свободного пробега молекул воздуха.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ:

Рассмотрим ламинарное течение газа в трубе диаметром D и длиной L (рис. 2.2.1). Течение называют ламинарным (слоистым), если частицы газа (жидкости) движутся вдоль прямолинейных траекторий, то есть при течении не происходит смешивания слоев газа.

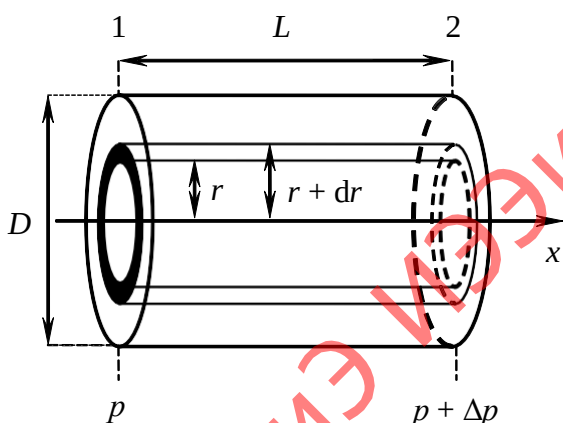


Рисунок 2.2.1

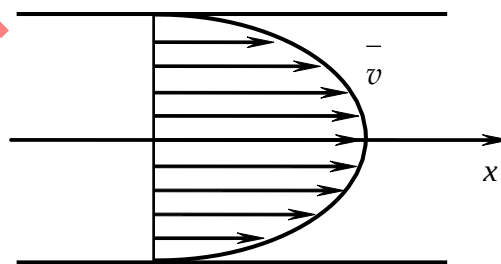


Рисунок 2.2.2

Рассмотрим в трубе цилиндрический слой газа внутренним радиусом r , толщиной dr и ограниченный поперечными сечениями 1 и 2.

Газ в слое движется из-за разности давлений Δp между поперечными сечениями 1 и 2 под действием силы, пропорциональной площади сечения слоя $dS = 2\pi r dr$

$$F = \Delta p dS = 2\pi r dr \Delta p. \quad (2.2.1)$$

где Δp – разность давлений на единице длины трубы.

Из-за действия сил внутреннего трения скорость газа в разных точках се-

чения трубы различна. Скорость слоев газа зависит от их расстояния до стенок трубы, она максимальна на оси трубы и равна нулю у стенок.

С внутренней стороны на этот слой действует сила

$$F_{\text{вн}} = -\eta \frac{dv}{dr} S = -\eta \frac{dv}{dr} 2\pi r. \quad (2.2.2)$$

С наружной стороны на слой действует сила в обратном направлении

$$F_{\text{нар}} = F_{\text{вн}} + dF = -\eta \frac{dv}{dr} 2\pi r L - \eta d\left(r \frac{dv}{dr}\right) 2\pi r L. \quad (2.2.3)$$

Движение газа в трубе стационарно, следовательно, эти силы уравниваются друг друга, то есть

$$F_{\text{вн}} - F_{\text{нар}} + F = 0.$$

С учетом (2.2.1) – (2.2.3) $-\eta d\left(r \frac{dv}{dr}\right) 2\pi r L = 2\pi r dr \Delta p$,

откуда:

$$d\left(r \frac{dv}{dr}\right) = -\frac{1}{\eta L} \Delta p r dr.$$

Интегрируя это выражение, получим:

$$r \frac{dv}{dr} = -\frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dr} r^2 \text{ или } dv = -\frac{1}{2\eta L} \Delta p r dr,$$

далее получим:

$$v = -\frac{1}{4\eta L} \Delta p r^2 + C.$$

Постоянную C найдем, положив $r = \frac{D}{2}$, тогда $v = 0$, откуда

$$C = \frac{1}{4\eta L} \Delta p \frac{D^2}{4}.$$

Тогда

$$v = \frac{1}{4\eta L} \Delta p \left(\frac{D^2}{4} - r^2 \right).$$

Эта формула определяет скорость движения газа в зависимости от расстояния до оси трубы. Распределение скоростей по сечению трубы происходит по параболическому закону (рис. 2.2.2).

Через цилиндрический слой радиуса r и толщиной dr за время t пройдет газ объемом:

$$dV = 2\pi r v t dr = \frac{\pi}{2\eta L} \Delta p t \left(\frac{D^2}{4} r - r^3 \right) dr.$$

Через все поперечное сечение трубы пройдет газ объемом

$$V = \frac{\pi}{2\eta L} \Delta p t \int_0^{D/2} (D^2 r - r^3) dr = \frac{\pi}{2\eta L} \Delta p t \left(\frac{D^4}{16} - \frac{D^4}{32} \right) = \frac{1}{128} \frac{\pi D^4 \Delta p t}{\eta L}. \quad (2.2.4)$$

Формула (2.2.4) носит название формулы Пуазейля.

Коэффициент внутреннего трения (вязкости)

$$\eta = \frac{\pi D^4}{128 V L} \Delta p t. \quad (2.2.5)$$

Рассматривая движение газа в трубе, можно определить среднюю длину свободного пробега $\langle \lambda \rangle$ молекул газа. Согласно уравнению (1.7)

$$\frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle u \rangle \rho = \eta,$$

где $\langle \lambda \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекул газа,

$\langle u \rangle$ – средняя арифметическая скорость молекул газа,

ρ – плотность газа.

Средняя арифметическая скорость молекул газа

$$\langle u \rangle = \sqrt{\frac{8 R T}{\pi \mu}}.$$

Плотность газа можно выразить из уравнения Менделеева – Клапейрона

$$\rho = \frac{\mu p}{R T},$$

где μ – молярная масса газа,

p – давление воздуха при температуре T ,

R – универсальная газовая постоянная.

Тогда среднюю длину свободного пробега $\langle \lambda \rangle$, с учетом (2.2.5), можно найти как

$$\langle \lambda \rangle = \frac{3\eta}{p} \sqrt{\frac{\pi RT}{8\mu}} = \frac{3\pi D^4 p t}{256 V L p} \sqrt{\frac{\pi RT}{2\mu}}. \quad (2.2.6)$$

АППАРАТУРА, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Для определения коэффициента η внутреннего трения (вязкости) воздуха используется установка, принципиальная схема и внешний вид которой приведены на рис. 2.2.3 и рис. 2.2.4.

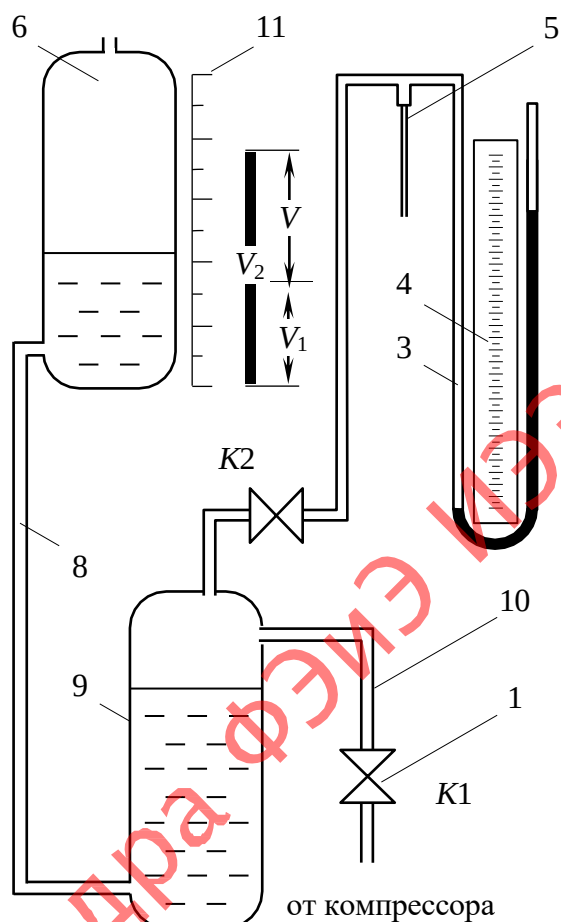


Рисунок 2.2.3

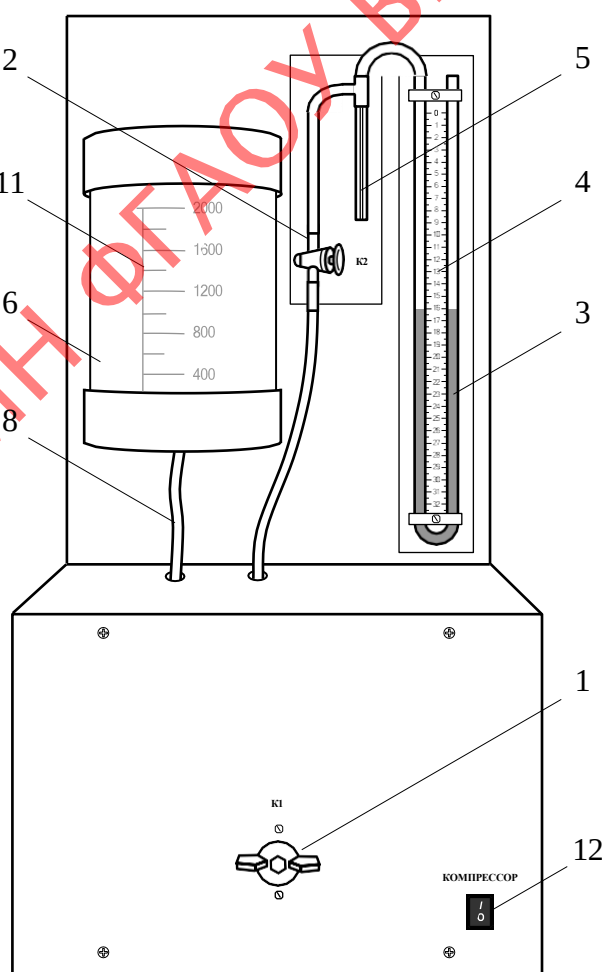


Рисунок 2.2.4

На передней панели расположены: клапан $K1$ (1) перепуска воды из вспомогательного бачка в мерную емкость (6), клапан $K2$ (2) напуска воздуха в мерную емкость для перепуска воды из этой емкости во вспомогательную, во-

дяной U-манометр (3), уровнемер с измерительными шкалами (4), капилляр (5) и тумблер «КОМПРЕССОР»(12) включения микрокомпрессора.

Схема установки включает капилляр (5), соединенный одним концом через систему пневмопровода с мерной емкостью (6) и U-манометром (3). Другой конец капилляра сообщается с атмосферой. Мерная емкость соединена трубкой (8) со вспомогательным сосудом (9), в котором находится вода. С помощью трубки (10) бачок (9) соединен с микрокомпрессором.

При закрытом клапане K_2 и открытом клапане K_1 вода из вспомогательной емкости (9) через трубку перетекает в мерную емкость (6).

При закрытом клапане K_1 и открытом клапане K_2 вода, перетекая из мерной емкости (6) во вспомогательную емкость (9), вытесняет воздух из нее через капилляр в атмосферу (при этом объем вытекшей из сосуда жидкости равен объему воздуха, прошедшему через капилляр). Так как сечение капилляра мало, то возникает разность давлений воздуха на его концах, которая измеряется водяным U-манометром. С помощью секундомера измеряется время истечения заданного объема воздуха из мерной емкости и указанный объем с помощью уровнемера (11).

Для повторения опыта закрывают клапан K_2 и, включив компрессор, открывают клапан K_1 .

Поскольку разность давлений на концах капилляра в момент включения секундомера и в момент его выключения различна, то необходимо взять среднюю разность давлений за время проведения опыта.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторных работ необходимо выполнять основные правила внутреннего распорядка и техники безопасности при работе в лабораториях [4].

К работе на приборах допускаются студенты только после изучения настоящих методических указаний и получения допуска у преподавателя.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить электропитание микрокомпрессора – тумблером "КОМПРЕССОР".
2. Открыть кран $K1$ и установить уровень воды в мерной емкости на отметке уровнемера около 1700 мл. Закрыть кран $K1$.
3. Открыть кран $K2$ и, дождавшись установления стационарного потока (разность давлений воздуха на концах капилляра 5, а следовательно, и разность уровней жидкости в U -манометре 3, должна установиться постоянной) в момент прохождения уровня воды мерной емкости верхней отметки уровнемера 11 включить секундомер.
4. В момент прохождения уровня воды в мерной емкости нижней отметки уровнемера 11 прекратить измерения, закрыть кран $K2$. Результаты измерений записать в таблицу 2.2.1.
5. Пункты 2 – 4 повторить не менее трех раз.
6. Определить температуру T и давление p окружающей среды по термометру и барометру в лаборатории. Диаметр D и длина L капилляра указаны на установке. Результаты измерений записать в таблицу 2.2.1.
7. По формулам (2.2.5) и (2.2.6) вычислить коэффициент внутреннего трения η и среднюю длину свободного пробега $\langle \lambda \rangle$ молекул воздуха.
8. Рассчитать погрешность измерений
9. Результаты расчетов занести в таблицу 2.2.1.

Таблица 2.2.1

№ п/п	t, с	Δp , Па	V_3 , м ³	η_{is} , Па·с	η , Па·с	$\langle \lambda \rangle_i$, м	$\langle \lambda \rangle$, м	Примечание
1								$D = \dots$ м
2								$L = \dots$ м
3								$T = \dots$ К
								$p = \dots$ Па
...								$\mu_{\text{возд}} = \dots \frac{\text{г}}{\text{моль}}$

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И ЕГО ФОРМА

Отчет по лабораторной работе оформляется в соответствии с формой, приведенной в приложении 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Почему в газах возникает внутреннее трение?

Каков физический смысл коэффициента внутреннего трения η газа?

От чего зависят значения коэффициента внутреннего трения η и длина свободного пробега молекул $\langle \lambda \rangle$ газа?

Оцените численные значения коэффициента внутреннего трения η и длины свободного пробега молекул газа $\langle \lambda \rangle$ по теоретическим формулам (1.3), (1.7) и сравните их с измеренными.

Что изменится в Ваших измерениях, если диаметр капилляра увеличить в 2 раза?

Можно ли имеющуюся установку применить для измерения длины свободного пробега молекул $\langle \lambda \rangle$ и коэффициента внутреннего трения η сжатых газов?

Каким образом в лабораторной установке осуществляется ламинарное течение воздуха? Ответ обосновать.

Почему длина свободного пробега зависит от атмосферного давления? Ответ обосновать.

Почему эффективный диаметр молекул газа не является константой, а зависит от температуры?

Как влияет точность и качество изготовления капилляра на точность измерений?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ДИАМЕТРА МОЛЕКУЛЫ АЗОТА МЕТОДОМ НАГРЕТОЙ НИТИ

ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ:

Изучение явления теплопроводности газа, определение эффективного диаметра молекулы азота.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ:

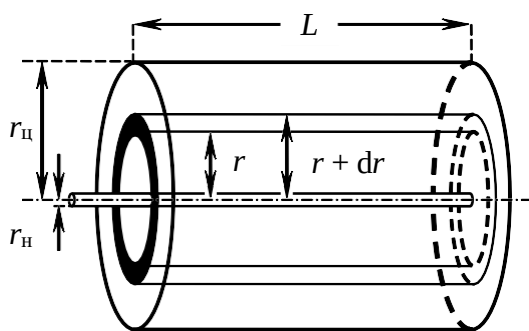


Рисунок 2.3.1

Рассмотрим явление теплопроводности в цилиндрическом нагревателе (рис. 2.3.1) заполненном азотом, представляющим собой цилиндрическую оболочку радиусом $r_{\text{ц}}$ и длиной L , с расположенной на оси нитью накала радиусом $r_{\text{н}}$. В цилиндре рассмотрим две коаксиальные цилиндрические по-

верхности радиусами r и $r + dr$.

Согласно уравнению теплопроводности (1.7) количество теплоты, перенесенной через поверхность радиусом r за время dt

$$dQ_r = -\chi_r \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_r S dt = -\chi_r \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_r 2\pi r L dt = -\chi_r \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_r 2\pi L, \quad (2.3.1)$$

где $S = 2\pi r L$ – площадь поверхности цилиндра.

Часть этой теплоты $dQ_{\text{в}}$ расходуется на увеличение внутренней энергии газа в слое между цилиндрическими поверхностями.

Часть теплоты переносится за счет явления теплопроводности через поверхность радиусом $r + dr$

$$dQ_{r+dr} = -\chi_{r+dr} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r+dr} S' dt = -\chi_r \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r+dr} 2\pi (r+dr) L dt =$$

$$= -\chi_{r+dr}(r+dr)\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r+dr}2\pi L dt, \quad (2.3.2)$$

где $S' = 2\pi(r+dr)L$ – площадь поверхности цилиндра.

Тогда с учетом уравнений (2.3.1) – (2.3.2) можно записать

$$dQ_r = dQ_b + dQ_{r+dr},$$

$$-\chi_r r \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_r 2\pi L dt = c_v \rho 2\pi r L dr dT - \chi_{r+dr}(r+dr)\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r+dr} 2\pi L dt.$$

В условиях стационарного распределения температуры между двумя концентрическими цилиндрами изменения внутренней энергии газа не происходит, то есть $dQ_b = 0$.

Количество теплоты, подводимое к газу, можно определить из закона Джоуля–Ленца

$$dQ = IU dt,$$

тогда, очевидно

$$\chi_r r \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_r 2\pi L = IU. \quad (2.3.3)$$

Учитывая, что в соответствии с (1.2), (1.6)

$$\chi = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle u \rangle n \frac{i}{2} k,$$

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n},$$

а

$$\langle u \rangle = \sqrt{\frac{8 k N_A T}{\pi \mu}},$$

где $\langle \lambda \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекул газа,

$\langle u \rangle$ – средняя арифметическая скорость молекул,

i – число степеней свободы молекул,

μ – молярная масса газа,

d – эффективный диаметр молекулы,

k – постоянная Больцмана,

N_A – число Авогадро,

можно записать, что

$$\chi = \frac{1}{3\pi\sqrt{\pi}} \frac{ik}{d^2} \sqrt{\frac{kN_A}{\mu}} \sqrt{T}.$$

Подставив (2.3.4) в выражение (2.3.3), получим

$$-\frac{1}{3\pi\sqrt{\pi}} \frac{ik}{d^2} \sqrt{\frac{kN_A}{\mu}} \sqrt{T} r \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=2\pi L} = IU.$$

При постоянной мощности IU на нити накала можно записать

$$-\frac{2\pi L}{3\pi\sqrt{\pi}} \frac{ik}{d^2} \sqrt{\frac{kN_A}{\mu}} \int_{T_H}^{T_{\text{ц}}} \sqrt{T} dT = IU \int_{r_H}^{r_{\text{ц}}} \frac{dr}{r},$$

откуда

$$\frac{4}{9\sqrt{\pi}} \frac{ikL}{d^2} \sqrt{\frac{kN_A}{\mu}} \frac{1}{UI} (T_{\text{ц}}^{3/2} - T_H^{3/2}) = \ln \frac{r_{\text{ц}}}{r_H}.$$

Очевидно что эффективный диаметр d молекулы газа

$$d = \sqrt{\frac{\frac{4}{9} \sqrt{\frac{kN_A}{\mu}} \frac{ikL}{\ln \frac{r_{\text{ц}}}{r_H}} (T_{\text{ц}}^{3/2} - T_H^{3/2})}{IU}}. \quad (2.3.5)$$

Таким образом, для вычисления эффективного диаметра молекулы азота необходимо определить: температуру T_H нити накала; температуру $T_{\text{ц}}$ цилиндрической оболочки, которая равна температуре воздуха в лаборатории; мощность, выделяемую на нити накала при напряжении U на ней и токе I .

Для определения температуры T_H нити накала воспользуемся законом Ома, формулой зависимости сопротивления проводника от температуры и формулой сопротивления проводника

$$U = IR,$$

$$R = R_0(1 + \alpha(T_H - 273)),$$

$$R_0 = \rho \frac{l}{s},$$

где R_0 – сопротивление нити накала при 273 К,

α – температурный коэффициент сопротивления материала нити накала,

ρ – удельное сопротивление материала нити накала,

l – длина нити накала,

$s = \pi r_n^2$ – площадь поперечного сечения нити накала.

Тогда

$$T_n = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{U}{I \rho l} \pi r_n^2 - 1 \right) + 273. \quad (2.3.6)$$

АППАРАТУРА, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Для определения эффективного диаметра молекулы азота используется установка, принципиальная схема и внешний вид которой приведены на рис. 2.3.2 и рис. 2.3.3.

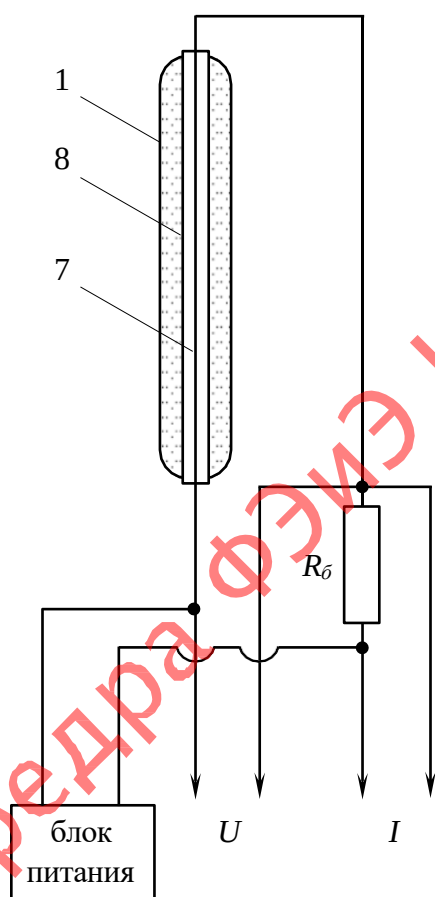


Рисунок 2.3.2

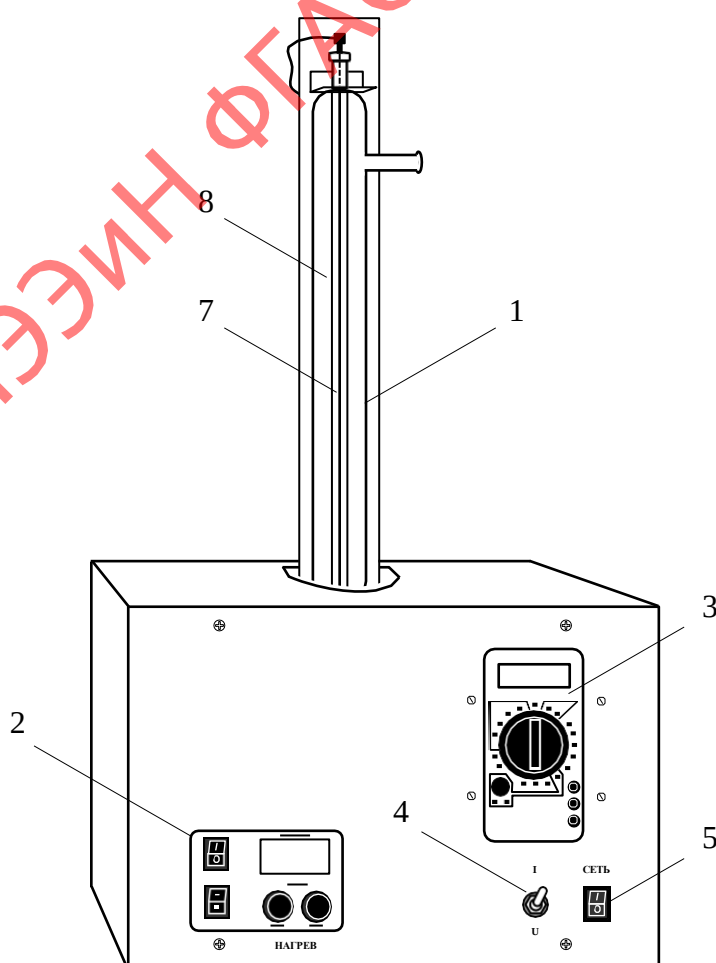


Рисунок 2.3.3

На передней панели расположены: корпус стеклянного баллона термоста-

та (1) с вольфрамовой нитью, источник питания (2) и мультиметр (вольтметр) (3), тумблер (4) для подключения мультиметра в режиме измерения тока – положение « I » и положение « U » в режиме измерения напряжения на нити, тумблер включения электропитания установки «СЕТЬ» (5).

Нагреваемая вольфрамовая проволока – нить (7) находится в стеклянной цилиндрической трубке (8). Между двойными стенками термостата залита вода. Температура воды в баллоне и, следовательно, температура стенки T трубки постоянна в течение опыта. Вольфрамовая проволока через соединительные провода подключается к источнику питания постоянного тока. Ток в нити определяется по падению напряжения U на балластном сопротивлении $R_0 = 1$ Ом. Напряжение на проволоке U и падение напряжения на балластном сопротивлении U измеряется мультиметром при соответствующем положении переключателя (4).

При нагревании нити вдоль радиуса трубки создается градиент температуры. Площадь, через которую передается тепло, равна площади поверхности цилиндра, коаксиального с нагретой нитью.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторных работ необходимо выполнять основные правила внутреннего распорядка и техники безопасности при работе в лабораториях [4].

К работе на приборах допускаются студенты только после изучения настоящих методических указаний и получения допуска у преподавателя.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить электропитание тумблером «СЕТЬ» (мультиметр включается одновременно). Установить на мультиметре предел измерения напряжений «20 В». Включить источник постоянного напряжения.

2. Убедиться в том, что на выходе источника питания отсутствует напряжение. При этом регулятор напряжения необходимо повернуть против ча-

совой стрелки до упора

3. Установить тумблер (4) в положение « U » для измерения напряжения на вольфрамовой проволоке.

4. Установить первое значение напряжения на источнике питания, следя за показаниями мультиметра (рекомендуемые значения напряжений, устанавливаемые на источнике питания: 2, 3, 4, 5, 6 В). Произвести отсчет напряжения на вольфрамовой проволоке.

5. Переключить тумблер (4) в положение « I » для измерения падения напряжения на балластном сопротивлении, пропорциональном силе тока в цепи вольфрамовой нити.

6. Переключить предел измерения напряжения мультиметра на 200 мВ. Дождавшись стационарного режима нагревателя (сила тока при этом должна оставаться неизменной) произвести отсчет падения напряжения на балластном сопротивлении.

7. Переключить предел измерения напряжения мультиметра на 20 В.

8. Пункты 3 – 7 повторить для следующих значений напряжения на вольфрамовой проволоке.

9. Изменяя напряжение и ток на нити накала, повторить измерения не менее 5 раз.

10. Рассчитать по формулам (2.3.5) – (2.3.6) эффективный диаметр d молекулы азота.

11. Рассчитать погрешность измерений

12. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 2.3.1.

Таблица 2.3.1

№ п/п	U , В	I , А	$T_{\text{н}}$, К	$T_{\text{ц}}$, К	d_i , м	d , м	Примечание
1							$r_{\text{ц}} = \dots$ м, $r_{\text{н}} = \dots$ м, $L = \dots$ м, $\rho = \dots$ Ом, $\alpha = \dots$ К ⁻¹ ,
2							
3							

4							$l = \dots \text{ М,}$
...							$\mu_{\text{возд}} = \dots \frac{\text{Г}}{\text{МОЛЬ}},$

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И ЕГО ФОРМА

Отчет по лабораторной работе оформляется в соответствии с формой, приведенной в приложении 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Каков механизм переноса тепла в газах?

Что характеризует коэффициент теплопроводности тел?

От каких параметров газа зависит коэффициент теплопроводности?

Как зависит коэффициент теплопроводности газа от температуры?

Что такое эффективный диаметр молекулы газа?

В чем заключается идея метода нагретой нити и какова схема установки?

Как рассчитать коэффициент теплопроводности газа по методу нагретой нити?

Объясните принцип действия сосуда Дьюара (термоса)&

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.4

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВАКУУМА

ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ:

Экспериментальное получение вакуума, оценка степени разрежения газа.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Под вакуумом понимают такое состояние разряженного газа, которому соответствует область давления ниже 10^5 Па, т.е. ниже атмосферного давления. В зависимости от степени разрежения различают низкий, средний, высокий и сверхвысокий вакуум.

Характеристики газов, соответствующие различному вакууму, показаны на рис. 2.4.1.

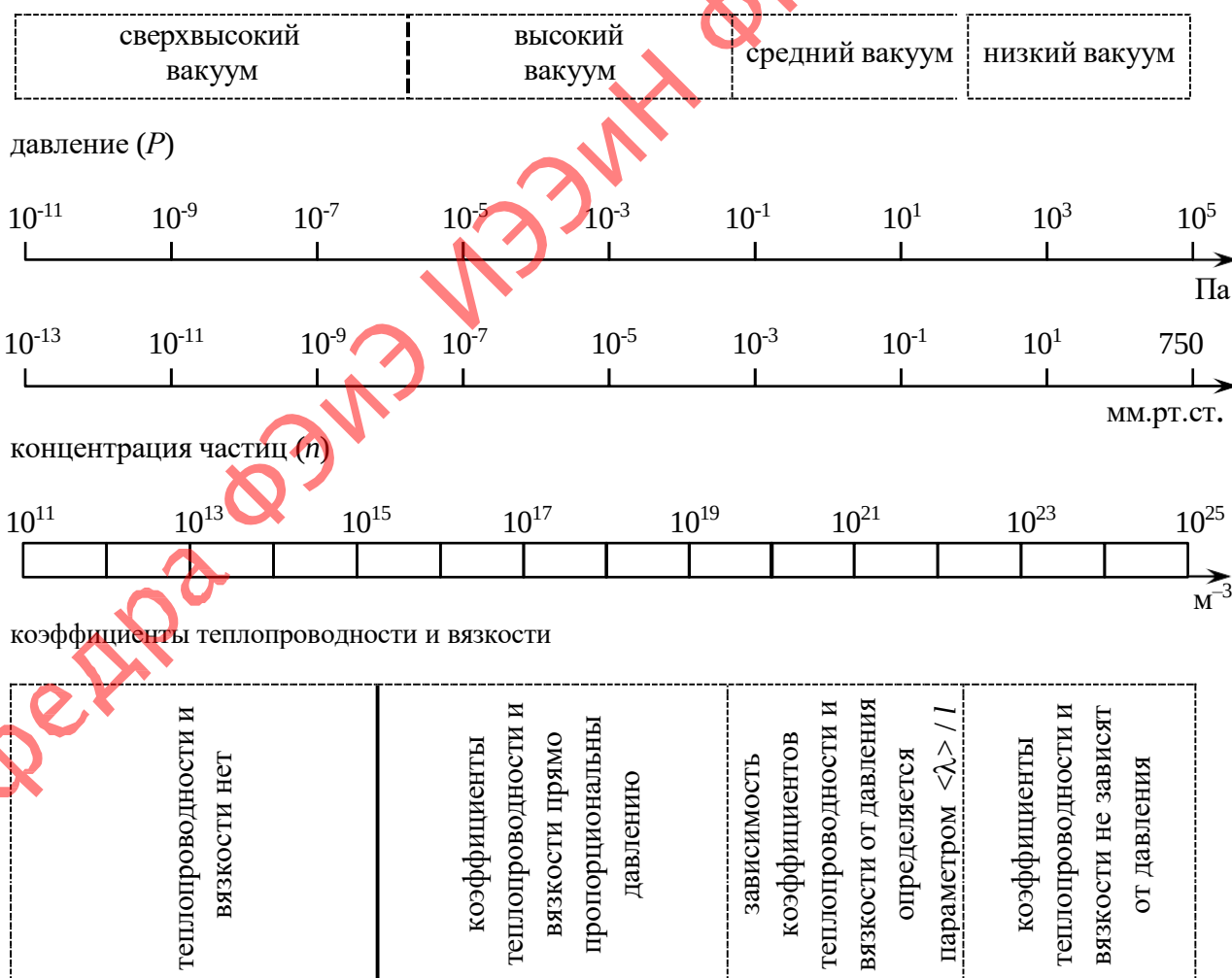


Рисунок 2.4.1. Некоторые характеристики различных степеней вакуума

Вакуум находит широкое применение в различных областях науки и технологии. Использование необходимых свойств вакуума предполагает применение правильно подобранного оборудования вакуумной системы. В неудачно сконструированной вакуумной системе параметры оборудования могут оказаться значительно хуже оптимальных.

Для их достижения необходимо понимать основные принципы работы вакуумной техники. Это особенно важно для сверхвысокого вакуума, когда число молекул газа, адсорбированных поверхностью вакуумной камеры, может значительно превышать число молекул, находящихся в объеме.

Предельное остаточное давление, достижимое в вакуумной системе, зависит, с одной стороны, от потока натекающего газа, а с другой – от быстроты откачки. Поток натекающего газа может изменяться в очень широких пределах (на несколько порядков) и может быть значительно уменьшен путем тщательного выбора материалов и методов их обработки, тогда как быстрота откачки ограничена производительностью насоса. Для того чтобы уменьшить остаточное давление при неизменном потоке натекающего газа, необходимо увеличить проводимость впускного отверстия и быстроту откачки вакуумного насоса.

ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ

Большинство насосов способно откачивать газ в ограниченном диапазоне давлений, а вне его скорость откачки падает до нуля. Следовательно, при рассмотрении задачи откачивания газа из системы весьма важно правильно выбрать подходящий насос.

Поскольку не существует насосов способных откачивать во всем диапазоне давлений – от атмосферного до сверхвысокого, в действительности речь идет о выборе оптимальной комбинации нескольких насосов. Одним из главных критериев сравнения насосов являются скорость откачки и предельный вакуум. Эти характеристики насоса могут значительно изменяться в зависимости от давления откачиваемого газа, его состава, состояния насоса и вакуумного объема. При этом для достижения предельного вакуума в большинстве случаев

вакуумный объем необходимо обезгазить прогревом до температуры 350 – 400°C в течение нескольких часов. Скорость откачки измеряется объемом газа, проходящим под давлением P через сечение впускного парубка за единицу времени и выражается формулой

$$V = \frac{Q}{P},$$

где: Q – количество газа, удаляемого насосом из откачиваемого объема в единицу времени (поток газа),

P – давление у впускного патрубка насоса.

Ввиду того, что откачиваемый объем, как правило, подключается к вакуумному насосу через соединительный трубопровод, который, как всякий канал оказывает сопротивление движущемуся через него потоку газа (т.е. имеет определенную проводимость), на концах трубопровода возникает перепад давлений, вследствие чего эффективная быстрота откачки объема $V_{эф}$ оказывается меньше скорости откачки. Поток газа через трубопровод проводимостью G создает перепад давления

$$P_1 - P_2 = \frac{Q}{G},$$

где P_1 и P_2 – давление в вакуумной камере и на входе в насос соответственно.

Поток газа в насосе:

$$Q = V_0 P_2.$$

Эффективная быстрота откачки вакуумной камеры

$$V_{эф} = \frac{Q}{P_1}.$$

Тогда

$$V = \frac{G}{1 + \frac{G}{V_0}},$$

т.е. при постоянной проводимости G и любой быстроте действия вакуумного насоса V_0 максимально достижимая эффективная быстрота откачки камеры не

превышает G . Откачивающая способность насоса может быть реализована полностью только в том случае, если насос непосредственно подсоединен к вакуумной камере ($G = \infty$). Если же $G = V_0$, то

$$V_{\text{эф}} = \frac{V_0}{2}.$$

НИЗКОВАКУУМНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ НАСОСЫ

Механические насосы с масляным уплотнением используют для предварительного разрежения в вакуумной системе и создания форвакуумного давления. Механические насосы производят откачку, начиная с атмосферного давления. Наибольшее распространение получили три типа вращательных насосов с масляным уплотнением: пластинчато-роторные, пластинчато-статорные и плунжерные насосы.

ПЛАСТИНЧАТО-РОТОРНЫЙ НАСОС. На рис. 2.4.2 приведена схема устройства и этапы работы пластинчато-роторного насоса. Корпус насоса 1 представляет собой полый цилиндр, внутри которого вокруг оси, смещенной относительно оси корпуса, вращается ротор 2. В сквозной прорези ротора размещены две пластины 3. Пластины плотно прижимаются к корпусу насоса пружиной 4. Полезный объем рабочей камеры разделен на три полости: I – полость всасывания; II – полость перемещения газа; III – полость сжатия и вытеснения газа. При вращении ротора в направлении, указанном стрелкой, полость I увеличивается и газ поступает в нее через впускной патрубок 7, а полость II уменьшается и сжатый газ выбрасывается через выпускной патрубок

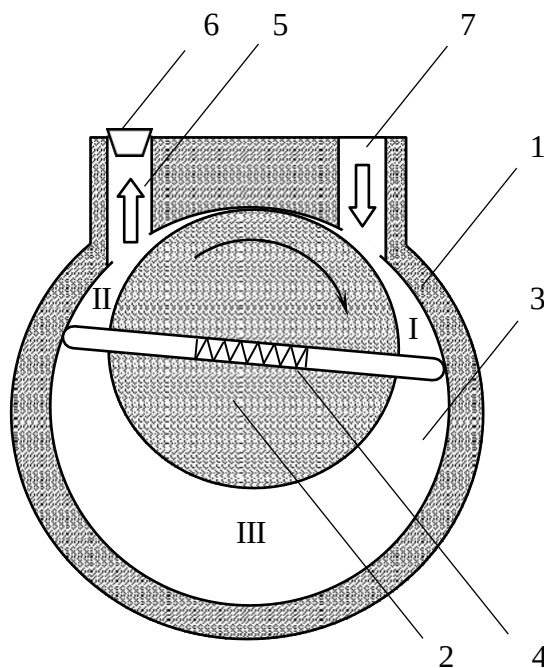


Рисунок 2.4.2. Устройство пластинчато-роторного насоса

5 в атмосферу. Выпускной патрубок 5 снабжен клапаном 6.

В пластинчато-роторном насосе за один оборот ротора происходит два цикла откачки, т. е. отделяются от откачиваемого объема и вытесняются из насоса две порции газа. Как видно из конструкции насоса, между вращающимся ротором и статором, а также между пластинами и статором имеются зазоры, по которым газ со стороны выхлопа может поступать на сторону всасывания. Уплотнение зазоров, предотвращающее перетекание газа, осуществляется вакуумным маслом марок ВМ-4 и ВМ-6 (толщина масляной пленки 0,05 – 0,1 мм), поступающим из масляного резервуара. Масло, просачиваясь через зазоры и заполняя их, защищает откачной механизм от натекания воздуха и обеспечивает смазывание трущихся деталей механизма. Предельное остаточное давление насосов с масляным уплотнением определяется конструкцией насоса и свойствами рабочей жидкости и равно 1,33 Па, а для двухступенного насоса 0,133 Па. Быстрота действия пластинчато-роторных насосов в интервале давлений $10^2 - 10^5$ Па от 0,21 л/с до 3 л/с.

НАСОС КОМОВСКОГО. Насос вакуумный Комовского предназначен для разрежения воздуха до 0,3 мм ртутного столба и для нагнетания до 4 атм.

Насос Комовского (рис. 2.4.3) состоит из цилиндра 1, внутри которого движется вверх и вниз поршень 2, приводимый в движение с помощью кривошипа и шатуна 3. К нижнему отверстию цилиндра прижимается с помощью пружины дно 4, которое одновременно служит и клапаном. При верхнем положении поршня открывается боковое

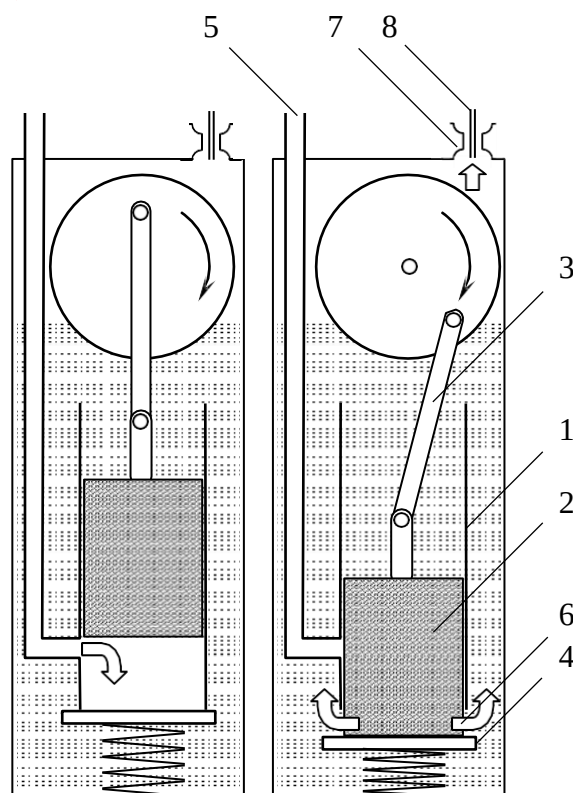


Рисунок 2.4.3. Насос Комовского

отверстие, прорезанное в цилиндре и сообщающиеся с трубкой 5, которая соединяется с разрезаемым пространством.

Вся система цилиндра с поршнем помещается в сосуд, наполненный маслом. Ход поршня рассчитан таким образом, что при своем нижнем положении поршень нажимает на клапан – дно, открывает его и сам некоторой своей частью выходит в пространство с маслом.

Работа насоса происходит по принципу отсечки: во время хода поршня вверх между ним и дном цилиндра образуется разреженное пространство, куда входит воздух в тот момент, когда поршень дойдет до начала боковой щели 6. При обратном движении поршень закрывает эту боковую щель в цилиндре и, таким образом, отсекает вошедший воздух, сдавливает его и выталкивает в пространство с маслом.

Воздух, пройдя маслоуловитель 7, выходит наружу через ниппель 8. Маслоуловитель задерживает мелкие капли масла, увлекаемого воздухом, выходящим из кожуха через ниппель.

Недостатком механических насосов является наличие обратного потока масла на входе откачиваемого объема. Дело в том, что из-за возникновения высоких местных температур в области контактов трущихся поверхностей происходит разложение (крекинг) масла. Из-за этого легколетучие продукты крекинга масла имеют гораздо более высокие давления насыщения, чем само масло. Обратный поток продуктов крекинга масла может достигать $0,1 - 0,2 \text{ мг/}(\text{час см}^2)$ и, естественно, что он приводит к загрязнению откачиваемого объема. Для уменьшения обратного потока, поступающего из насоса в откачиваемый объем, во впускном патрубке насоса устанавливают ловушки или маслоотражатели.

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ НИЗКОГО ВАКУУМА

Приборы для измерения давления газа ниже атмосферного называются вакууметрами. Они обычно состоят из двух частей: монотрического преобразователя и измерительной установки. По принципу действия их можно свести в следующие классы:

- жидкостные (U – образные);
- деформационные, использующие в качестве чувствительного элемента сильфон, мембрану и др.;
- компрессионные, их действие основано на законе изотермического сжатия идеального газа;
- тепловые, использующие зависимость теплопроводности газа от давления;
- ионизационные, в которых используется ионизация газа.

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ. К деформационным преобразователям относятся трубчатые и мембранные преобразователи.

Трубка Бурдона (рис. 2.4.4) – деформационный манометр в виде спиральной трубки 2, скручивающейся под действием атмосферного давления в случае откачки внутренней полости за счет разных радиусов кривизны, а следовательно, и площадей наружной и внутренней поверхностей трубки.

На поверхности с большим и меньшим радиусами действуют сила:

$$F_1 = (p_{\text{атм}} - p)S_1, \quad F_2 = (p_{\text{атм}} - p)S_2,$$

где S_1 и S_2 – площади наружной и внутренней поверхностей участка спиральной трубки.

$p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление;

p – давление в трубке;

Измерительное уравнение связывает между собой перемещение конца трубки x и разность давлений $(p_{\text{атм}} - p)$ соотношением

$$\Delta F = F_1 - F_2 = (p_{\text{атм}} - p)(S_1 - S_2) = k x,$$

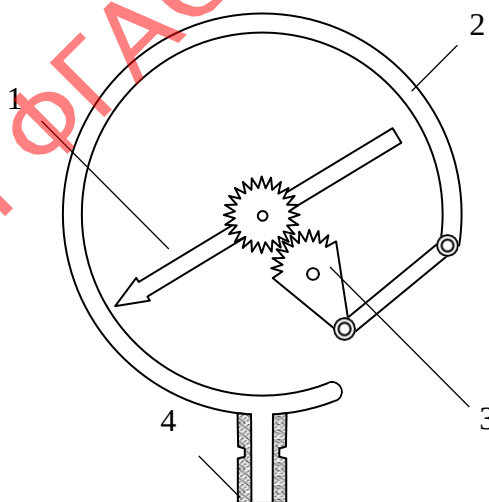


Рисунок 2.4.4. Трубка Бурдона

где k – жесткость трубки.

Манометр измеряет давления в пределах $10^5 \div 10^3$ Па. Измерение давлений ниже 10^3 Па затруднено тем, что трубка при малой жесткости должна быть достаточно прочной, чтобы выдержать атмосферное давление. Погрешность измерения равна 5% и ограничена упругим последствием трубки – медленным возвращением трубки в исходное положение после упругой деформации.

К вакуумной системе манометр подключается через штуцер 4. Регистрация перемещения спиральной трубки обычно рычажно-стрелочная, когда конец спиральной трубки связан через зубчатый сектор 3 со стрелкой 1.

Чувствительным элементом мембранных манометров (рис. 2.4.5) может быть жесткая (упругая) или вялая мембрана.

Упругие мембраны представляют собой медные или латунные диски с гофрами. Гофры увеличивают жесткость мембраны и ее способность к деформации. Из таких мембран изготавливают мембранные коробки (1), а из коробок – блоки.

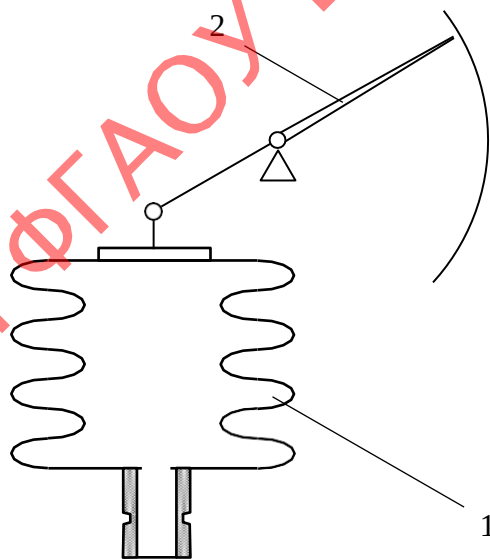


Рисунок 2.4.5. Мембранный преобразователь

Внутри герметичной полости, образованной мембранами (1), создается сравнительное давление $p_{ср.}$. Если измеряемое давление p не равно $p_{ср.}$, то происходит деформация мембран на Δx и перемещение стрелки (2) на $\Delta \varphi$, пропорциональное разности давлений

$$(p_{ср.} - p) \sim \Delta x \sim \Delta \varphi.$$

Такой прибор измеряет разность давлений и поэтому называется дифференциальным.

Вялые мембраны изготавливают из резины на тканевой основе в виде од-

ногофровых дисков. Используются они для измерения небольших избыточных давлений и разрежений.

ЖИДКОСТНЫЕ ВАКУУММЕТРЫ. В жидкостных вакуумметрах измеряемое давление или разность давлений от 10 – 5 Па до 1 Па (от 760 мм.рт.ст. до 10^{-2} мм.рт.ст.) уравнивается давлением столба жидкости. Вакуумметр представляет собой U-образную трубку, заполненную жидкостью (ртутью или вакуумным маслом). В одном из колен трубки над жидкостью находится газ при измеряемом давлении p , а в другом – при известном p_k . Разность давлений в коленах уравнивается столбом жидкости высотой h , т.е.

$$p - p_k = \rho g h,$$

где ρ – плотность жидкости,
 g – ускорение свободного падения.

Применяют вакуумметры с открытым ($p_k = p_{\text{атм}}$) и закрытым коленом ($p_k = 0$). Масляные вакуумметры более чувствительны, т.к. плотность масла примерно в 15 раз меньше плотности ртути (однако масла хорошо растворяют газы). Устройство масляного манометра может представлять собой вертикальную стеклянную трубку, один конец которой соединяют с пространством, где хотят измерить давление, а другой закрыт.

ТЕРМОПАРНЫЙ ВАКУУММЕТР. Для измерения низкого вакуума в вакуумных системах обычно используется термопарный вакуумметр. Монометрический преобразователь ПМТ-4М (рис. 2.4.6) представляет собой металлический или стеклянный корпус, в котором на двух вводах смонтирован никелевый подогреватель 3, на двух других вводах крепится термопара 4 (хромель-копель или хромель-алюмель). Термопара и подогреватель сварены через перемычку. Подогреватель нагревается током, который можно регулировать реостатом 5 и измерять миллиамперметром 2. Слой термопары, нагреваемый подогревателем, является источником термо-э.д.с., значение которой показывает милливольтметр 1.

Пока давление в вакуумной системе близко атмосферному, теплопроводность газа постоянна и практически не зависит от давления, поэтому стрелка милливольтметра при заданном для данной монометрической лампы токе накала стоит вблизи нуля. По мере откачки с уменьшением давления уменьшается теплопроводность газа и, следовательно, повышается температура перемычки. Термо-э.д.с. начинает расти, что фиксируется милливольтметром. При давлении $\leq 10^{-2}$ Па теплоотвод по газу от подогревателя пренебрежительно мал и вся подводимая мощность расходуется на излучение и теплоотвод по вводам. В этом случае стрелка милливольтметра совпадает с последним делением шкалы (подбирается ток подогревателя). Давление определяется по градуировочной кривой термопарного преобразователя.

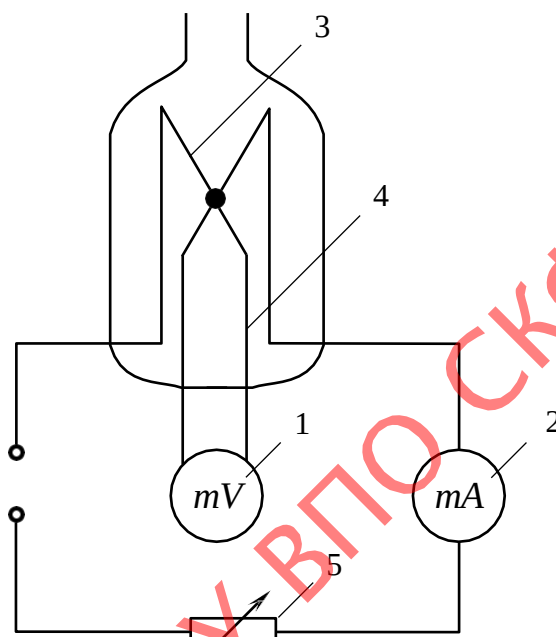


Рисунок 2.4.6. Монометрический преобразователь

АППАРАТУРА, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Для определения эффективного диаметра молекулы азота используется установка, принципиальная схема и внешний вид которой приведены на рис. 2.4.7 и рис. 2.4.8.

На передней панели расположены: тумблер «СЕТЬ» (1) включения установки, тумблер «НАСОС» (2) и кнопка запуска форвакуумного насоса (3), кран (4) подключения насоса к вакуумной системе, трехлитровый бустерный объем вакуумной системы (5), мановакуумметр (6), масляный вакуумметр (7), датчик термопарного вакуумметра (8), мультиметр для измерения тока нагрева термопары и термоЭДС (9), тумблер подключения мультиметра в режимы измерения тока или термоЭДС «U» – «I» (10), тумблер включения питания накала датчика

термопарного вакуумметра, ручка регулировки тока нагрева термопары (12), ручка вакуумного крана подсоединения к вакуумной системе капилляра (13) и место подсоединения капилляра с капилляром (14).

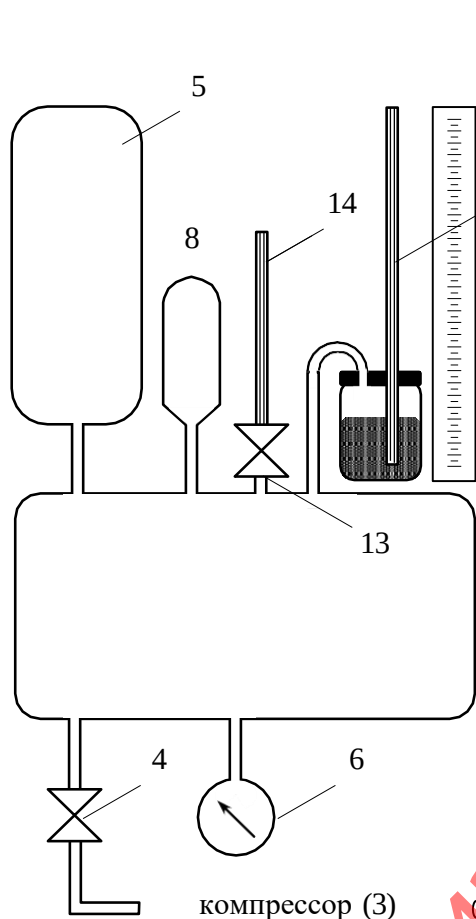


Рисунок 2.4.7

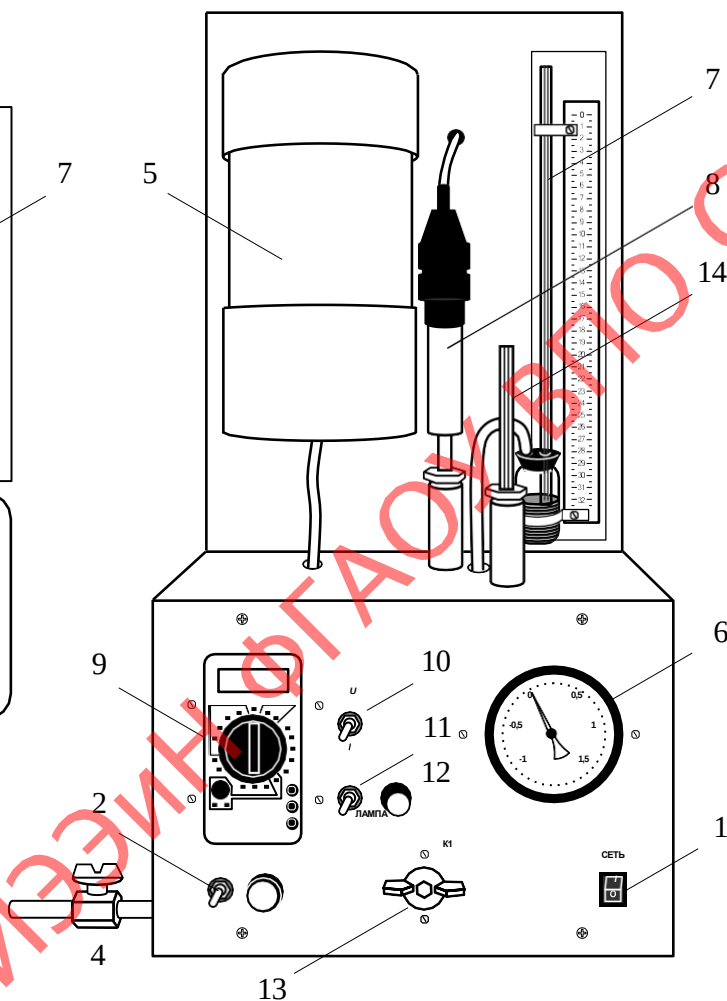


Рисунок 2.4.8

В экспериментальной установке «низкий» вакуум создается роторно-пластинчатым форвакуумным насосом. В установке предусмотрена возможность измерения вакуума тремя датчиками, реализующими три различных физических явления:

- мембранный мановакуумметр (6),
- масляный вакуумметр (7),
- термопарный вакуумметр (8).

Диапазоны рабочих давлений этих вакуумметров перекрываются, что позволяет калибровать и проверять калибровку одного вакуумметра по другому.

Градуировочный график термопарного датчика приведен в **приложении 2.**

Капилляр(14) позволяет исследовать диффузию молекул воздуха из атмосферы в вакуум.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторных работ необходимо выполнять основные правила внутреннего распорядка и техники безопасности при работе в лабораториях [4].

К работе на приборах допускаются студенты только после изучения настоящих методических указаний и получения допуска у преподавателя.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Перед началом работы **проверить уровень масла в форвакуумном насосе!**

Краны (4) и (13) должны быть закрыты.

2. Тумблером «СЕТЬ»(1) включить установку, включить форвакуумный насос тумблером «Насос»(2). Открыть кран (4) на вакуумную систему(5).

3. Наблюдать увеличение вакуума по изменению положения стрелки мановакуумметра (6).

4. Наблюдать уменьшение высоты положения мениска масляного вакуумметра (7). Откалибровать масляный вакуумметр, измеряя одновременно высоту масляного столба и показание мановакуумметра (6).

5. Измерить вакуум с помощью термопарного вакуумметра (8). Перевести тумблер (10) в положение «I». Установить ток накала (ток указан на градуировочном графике вакуумметрической лампы). Перевести тумблер (10) в положение «U». По измеренному значению термо-ЭДС и калибровочному графику вакуумметрической лампы, определить величину вакуума. Сравнить показания термопарного вакуумметра с показанием мановакуумметра.

6. Закрыть кран (4), выключить форвакуумный насос.

Обязательно при выключенном насосе закрывайте кран на вакуум-

ную систему для исключения попадания масла в вакуумную систему!

7. Данные измерений занести в таблицу 2.4.1.

Таблица 2.4.1

мембранный мановакуумметр	p , Па				...
масляный вакуумметр	мм ст.жид.				...
	p , Па				...
термопарный вакуумметр	E , мВ				...
	p , Па				...

8. Исследуйте диффузию молекул воздуха через капилляр из «атмосферы» в «вакуум». Для этого подсоедините капилляр (14) к посадочному месту. Открыть кран (13). Измеряйте изменение давления в вакуумной системе во времени с интервалом $20 \div 30$ с.

9. Данные измерений занести в таблицу 2.4.2.

Таблица 2.4.2

p , Па						...
t , с						...

10. По данным измерений построить график зависимости $p = f(t)$.

11. Рассчитать среднюю длину свободного пробега молекул воздуха $\langle \lambda \rangle$ для нескольких точек по указанию преподавателя.

Обязательно напускайте воздух в насос через штуцер в передней верхней части насоса в конце рабочего дня для исключения попадания масла в вакуумную систему!

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И ЕГО ФОРМА

Отчет по лабораторной работе оформляется в соответствии с формой, приведенной в приложении 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Что такое – длина свободного пробега молекулы?

Какой газ называется разреженным и ультраразреженным?

На какие группы по степени разреженности делится вакуум?

Какие типы вакуумных насосов вы знаете?

Как устроен роторный форвакуумный насос?

Какими приборами можно оценить степень разряжения воздуха в работе?

Расскажите о принципе действия каждого из них.

Как устроен ртутный барометр и барометр-анероид? На чем основано их действие?

Как ведут себя в условиях невесомости ртутный барометр и барометр-анероид?

Кафедра ФЭиЭ ИЭЭиН ФГАОУ ВПО СКФУ

2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Величины, характеризующие состояние газа, называются параметрами состояния. К ним относятся давление p , температура T , объем V .

Внутренняя энергия U системы молекул складывается из энергии хаотического движения молекул (поступательного и вращательного), а также колебательного движения атомов в молекулах, потенциальной энергии, обусловленной взаимодействием молекул. Энергию электронных оболочек атомов и ионов, а также энергию движения и взаимодействия нуклонов в атомных ядрах не включают в понятие внутренней энергии тела, так как эта энергия не изменяется в процессах, не связанных с химическими реакциями и другими превращениями электронных оболочек атомов и ионов, с ядерными реакциями.

Для идеального газа потенциальная энергия взаимодействия молекул считается равной нулю. Поэтому внутренняя энергия идеального газа определяется только кинетической энергией движения всех его молекул.

Средняя энергия движения одной молекулы согласно закону равномерного распределения энергии по степеням свободы молекул

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} kT,$$

где i – число степеней свободы молекул,

k – постоянная Больцмана.

Числом степеней свободы называется число независимых координат, которые полностью определяют положение тела в пространстве. Одноатомные молекулы имеют $i = 3$, двухатомные жесткие¹ молекулы – $i = 5$, трех- и более атомные жесткие молекулы – $i = 6$.

Внутренняя энергия идеального газа

¹ Жесткие молекулы – это молекулы с неизменным расположением атомов, то есть атомы не совершают колебаний. В этом случае можно не учитывать колебательные степени свободы.

$$U = N\langle\varepsilon\rangle = \nu N_A\langle\varepsilon\rangle = \frac{m}{\mu} N_A\langle\varepsilon\rangle,$$

где N – число молекул в газе,

N_A – число Авогадро,

ν – число молей газа,

m – масса газа,

μ – молярная масса газа.

Тогда

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} k N_A T = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R T, \quad (2.1)$$

где R – универсальная газовая постоянная.

Изменение внутренней энергии идеального газа

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T,$$

где ΔT – изменение температуры газа.

Изменить состояние тела можно, передавая энергию от одного тела термодинамической системы² к другому. Передача энергии может происходить двумя качественно различными способами: путем совершения работы A или путем передачи теплоты Q .

Работа – есть мера изменения механической энергии при силовом воздействии между телами. Совершение работы всегда сопровождается перемещением тела или его макроскопических частей.

Энергия, переданная от одного тела к другому путем теплообмена, называется теплотой, отданной одним телом другому.

Элементарная работа δA , совершающаяся при расширении газа на dV , рассчитывается по формуле

$$\delta A = p dV,$$

² Под термодинамической системой тел понимается группа макроскопических тел, которой свойственны процессы, сопровождающиеся переходом теплоты в другие виды энергии и обратные процессы.

а работа, совершающаяся при расширении газа от V_1 до V_2 , по формуле

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV, \quad (2.2)$$

где p – давление, которое производится на газ внешними силами (внешнее давление);

V_1, V_2 – начальный и конечный объем газа.

Для определения количества теплоты δQ , переданного термодинамической системе для изменения ее температуры, введем понятия теплоемкостей. В зависимости от способа измерения количества вещества в системе подразделяют удельную теплоемкость, молярную теплоемкость и теплоемкость.

Удельной теплоемкостью называется физическая величина c , численно равная теплоте δQ , которую сообщают единице массы однородного тела для повышения его температуры на dT .

$$c = \frac{1}{m} \frac{\delta Q}{dT}. \quad (2.3)$$

Молярной теплоемкостью называется физическая величина C , численно равная теплоте δQ , сообщенной одному молю вещества для изменения его температуры на dT .

$$C = \frac{1}{\nu} \frac{\delta Q}{dT}. \quad (2.4)$$

где $\nu = \frac{m}{\mu}$ – число молей.

Очевидно, что $C = \mu c$. (2.5)

Теплоемкостью тела называется физическая величина, численно равная теплоте δQ , которую сообщают телу для повышения его температуры на dT ,

$$C = \frac{\delta Q}{dT}.$$

Тогда $C = cm$ и $C = C\nu$.

Существование двух способов передачи энергии термодинамической сис-

теме позволяет закон сохранения энергии представить в виде

$$\Delta U = A' + Q,$$

где ΔU – изменение внутренней энергии,

A' – работа, совершенная над системой внешними силами,

Q – переданная системе теплота,

или

$$Q = \Delta U + A,$$

где $A = -A'$ – работа, совершаемая самой системой против внешних сил.

Отсюда вытекает следующая формулировка 1 закона термодинамики: теплота, переданная системе в процессе изменения ее состояния, расходуется на изменение ее внутренней энергии и на совершение работы против внешних сил. Первый закон термодинамики записывают также для изменения состояния системы, вызванного сообщением ей малой теплоты δQ , совершением ей малой (элементарной) работы δA и приводящего к малому изменению внутренней энергии dU

$$\delta Q = dU + \delta A.$$

Обратим внимание на различие в записях малых величин (δQ , dU , δA).

Внутренняя энергия является однозначной функцией состояния термодинамической системы, то есть значение внутренней энергии в каком-либо произвольно выбранном состоянии не зависит от способа перевода ее в это состояние. Изменение внутренней энергии dU представляет собой полный дифференциал. Работа и теплота не являются функциями состояния и поэтому δQ , δA не являются полными дифференциалами.

Рассмотрим применение 1 закона термодинамики к изопроцессам, а также к адиабатическому процессу идеальных газов.

1. Изохорный процесс ($V = \text{const}$).

Элементарная работа, совершаемая газом $\delta A = p dV$.

Так как $V = \text{const}$, то $\delta A = 0$.

Для элементарного количества теплоты δQ 1-й закон термодинамики

$$\delta Q = dU \quad \text{или} \quad Q = \Delta U,$$

то есть при изохорном процессе вся подводимая к газу теплота затрачивается на увеличение внутренней энергии газа.

Из (2.3) удельная теплоемкость при постоянном объеме

$$c_V = \frac{1}{m} \frac{\delta Q}{dT} = \frac{1}{m} \frac{dU}{dT}.$$

С учетом (2.1), (2.5)

$$c_V = \frac{i}{2} \frac{R}{\mu},$$

$$C_V = \frac{i}{2} R. \quad (2.6)$$

Количество теплоты для изохорного процесса можно представить в виде

$$\delta Q = C_V dT = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R dT$$

или

$$Q = C_V \Delta T = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T. \quad (2.7)$$

2. Изобарный процесс ($p = \text{const}$).

Элементарная работа, совершаемая газом $\delta A = p dV$.

С учетом уравнения Клапейрона – Менделеева

$$\delta A = p dV = \frac{m}{\mu} R dT. \quad (2.8)$$

Работа, совершаемая газом при увеличении объема от V_1 до V_2

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p(V_2 - V_1) = p \Delta V = \frac{m}{\mu} R \Delta T.$$

Первый закон термодинамики можно представить в виде

$$\delta Q = c_V m dT + p dV \quad \text{или} \quad Q = c_V m \Delta T + \frac{m}{\mu} R \Delta T.$$

Из (2.4) следует

$$\delta Q = c_P m dT \quad \text{или} \quad Q = c_P m \Delta T.$$

где c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении.

Тогда
$$c_p m dT = c_v m dT + p dV. \quad (2.9)$$

С учетом (2.8), получим
$$c_p = c_v + \frac{R}{\mu}.$$

Если учесть (2.5), то
$$C_p = C_v + R. \quad (2.10)$$

Это соотношение называется уравнением Майера. Оно показывает, что молярная теплоемкость при постоянном давлении C_p больше молярной теплоемкости при постоянном объеме C_v на величину универсальной газовой постоянной R .

Из (2.6) и (2.10) получим:

$$C_p = \frac{i+2}{2} R. \quad (2.11)$$

С учетом выше изложенного, количество теплоты при изобарном процессе

$$\delta Q = c_v m dT + p dV = c_v m dT + \frac{m}{\mu} R dT = \frac{i+2}{2} \frac{m}{\mu} R dT$$

или
$$Q = c_v m \Delta T + p \Delta V = c_v m \Delta T + \frac{m}{\mu} R \Delta T = \frac{i+2}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T.$$

3. Изотермический процесс ($T = \text{const}$)

При изотермическом процессе внутренняя энергия газа не изменяется, то есть $dU = 0$, и 1 закон термодинамики имеет вид

$$\delta Q = \delta A \quad \text{или} \quad Q = A.$$

Теплота, подводимая к газу при изотермическом процессе, расходуется на совершение работы газом.

Элементарная работа, совершаемая газом

$$\delta A = p dV \quad \text{или} \quad A = \int_{V_1}^{V_2} p dV.$$

Учитывая уравнение Клапейрона – Менделеева, получим

$$\delta A = \frac{m}{M} RT \frac{dV}{V}.$$

Работа газа при изотермическом расширении от V_1 до V_2

$$A = \int_{V_1}^{V_2} \frac{m}{\mu} RT \frac{dV}{V}.$$

Количество теплоты для изотермического процесса

$$Q = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

4. Адиабатический процесс.

Адиабатический процесс – термодинамический процесс, в котором система не обменивается теплотой с окружающей средой, то есть $\delta Q = 0$.

Тогда 1 закон термодинамики для адиабатического процесса имеет вид

$$dU + \delta A = 0, \quad \delta A = -dU \quad (2.11)$$

или

$$\Delta U + A = 0, \quad A = -\Delta U.$$

Газ совершает работу за счет изменения своей внутренней энергии. При совершении работы температура газа изменяется от T_1 до T_2 .

Элементарная работа

$$\delta A = -dU = -c_V m dT = -\frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R dT.$$

Работа адиабатического расширения газа

$$A = -\Delta U = - \int_{T_1}^{T_2} \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R dT = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R (T_1 - T_2).$$

Из формулы (2.11), учитывая уравнения Клапейрона – Менделеева и Майера, можно получить уравнение адиабатического процесса.

$$p dV = \frac{1}{V} \frac{m}{\mu} R T dV = \frac{1}{V} \frac{m}{\mu} (C_P - C_V) T dV.$$

$$\frac{1}{V} \frac{m}{\mu} (C_P - C_V) T dV = - \frac{m}{\mu} C_V dT,$$

$$\frac{m}{\mu} (C_P - C_V) \frac{dV}{V} = - C_V \frac{m}{\mu} \frac{dT}{T},$$

$$\frac{dT}{T} + \frac{dV}{V} \frac{C_P - C_V}{C_V} = 0.$$

Обозначив $\frac{C_P}{C_V} = \gamma$, имеем

$$\frac{dT}{T} + (\gamma - 1) \frac{dV}{V} = 0.$$

Интегрируя это уравнение, получим

$$(\gamma - 1) \ln V + \ln T = \text{const},$$

$$\ln V^{\gamma - 1} + \ln T = \text{const},$$

$$TV^{\gamma - 1} = \text{const}. \quad (2.12)$$

Используя уравнение Клапейрона – Менделеева, можно записать

$$T^{\gamma} p^{1 - \gamma} = \text{const} \quad (2.13)$$

или

$$pV^{\gamma} = \text{const}. \quad (2.14)$$

Уравнения (2.12) – (2.14) называются уравнениями адиабаты или уравнениями Пуассона.

ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ. ЭНТРОПИЯ

Для описания термодинамических процессов одного первого закона термодинамики недостаточно. Первый закон термодинамики выражает всеобщий закон сохранения и превращения энергии, но не позволяет определить направление протекания процессов. Опытным путем показано, что самопроизвольной передачи теплоты от менее нагретого тела к более нагретому не происходит, хотя такой процесс не противоречит 1-ому закону термодинамики. Обобщение огромного экспериментального материала привело к необходимости сформулировать 2-ой закон термодинамики и ввести новые понятия: приведенная теплота, энтропия, обратимые и необратимые процессы и т.д.

Тепловые процессы могут быть естественными и искусственными. Есте-

ственный процесс происходит самопроизвольно, например, передача теплоты от более нагретого тела к менее нагретому. Искусственные процессы никогда не протекают самопроизвольно. При осуществлении этих процессов необходима компенсация. Искусственными процессами, например, являются сжатие газа, перенос теплоты от менее нагретого тела к более нагретому и др.

Естественные процессы, в отличие от искусственных, протекают в направлении к состоянию равновесия. Равновесным состоянием системы называется такое состояние, при котором параметры системы остаются без изменения сколь угодно долго.

Кроме того, естественные процессы протекают так, что невозможно восстановить тем же путем первоначальное состояние.

Круговым процессом или циклом называется такой процесс, при котором система, пройдя через ряд состояний, возвращается в исходное.

Термодинамический процесс называется обратимым, если он может происходить как в прямом, так и в обратном направлении и после его завершения и возвращения системы в исходное положение в окружающей среде не осталось изменений. Всякий процесс, не удовлетворяющий этим условиям, является необратимым.

Равновесным процессом называется процесс, протекающий бесконечно медленно. Он складывается из непрерывного ряда равновесных состояний. Любой равновесный процесс является обратимым.

В реальных условиях обратимые процессы неосуществимы, однако на практике с известным приближением можно некоторые процессы считать обратимыми.

Для выяснения понятия энтропии рассмотрим отношение теплоты Q , полученной телом при изотермическом процессе к температуре теплоотдающего тела, называемое приведенным количеством теплоты. На бесконечно малом участке процесса приведенное количество теплоты, сообщаемое телу равно $\frac{\delta Q}{T}$.

Энтропией называется функция состояния тела, дифференциалом которой

является $\frac{\delta Q}{T}$, то есть

$$dS = \frac{\delta Q}{T}. \quad (2.14)$$

Энтропия обладает свойством аддитивности: энтропия системы равна сумме энтропий тел, входящих в систему.

Строгий теоретический анализ показывает, что в любом обратимом круговом процессе в замкнутой системе (система не обменивается теплотой с внешней средой)

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$$

или

$$\Delta S = 0, \quad (2.15)$$

то есть энтропия не изменяется.

В термодинамике доказывается, что энтропия замкнутой системы, совершающей необратимый круговой процесс, возрастает, то есть

$$\Delta S > 0. \quad (2.16)$$

Объединяя (2.15) и (2.16) можно получить неравенство Клаузиуса

$$\Delta S \geq 0.$$

Энтропия замкнутой системы может либо возрасть (для необратимых процессов), либо оставаться постоянной (в случае обратимых процессов). Энтропия замкнутой системы не может убывать при любых происходящих в ней процессах. Это одна из формулировок 2 закона термодинамики. Можно получить еще две формулировки 2 закона термодинамики:

1. Невозможен процесс, единственным результатом которого является передача теплоты.
2. Невозможен процесс, единственным результатом которого является совершение работы за счет охлаждения одного тела.

Второй закон термодинамики определяет направление процессов, протекающих в замкнутых системах: для обратимых процессов – энтропия не изме-

няется, для необратимых – возрастает.

Из (2.14) видно, что dS и δQ имеют один и тот же знак. Это позволяет по характеру изменения энтропии судить о направлении процесса теплообмена. При нагревании тела $\delta Q > 0$ и энтропия возрастает ($dS > 0$), при охлаждении $\delta Q < 0$ и энтропия убывает ($dS < 0$). В обратимом адиабатном процессе $\delta Q = 0$, ($dS = 0$) и $S = \text{const}$.

Существует связь 2 закона термодинамики с молекулярно-кинетической теорией, согласно которой каждому состоянию молекулярной системы соответствует некоторое распределение ее молекул по объему и распределение молекул по скоростям.

Число всевозможных распределений молекул по объему (координатам) и скоростям, соответствующих данному термодинамическому состоянию называется термодинамической вероятностью состояния W тела или системы.

Между энтропией S и термодинамической вероятностью состояния W существует связь

$$S = k \ln W,$$

где k – постоянная Больцмана.

Термодинамическая вероятность состояния замкнутой системы при всех протекающих в ней процессах не может убывать. Это статистическое истолкование 2 закона термодинамики.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.5

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ КАЛОРИМЕТРА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ

ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ:

Определить тепловой эквивалент калориметра, определить теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ:

Количество теплоты, необходимое для нагревания газа зависит от количества нагреваемого газа и от того, на сколько градусов должна быть изменена его температура и при каких условиях это изменение происходит. Поэтому для характеристики тепловых свойств газов, как и всяких других тел пользуются особой величиной – теплоемкостью.

Теплоемкостью системы называется количество тепла, которое нужно подвести к ней или отнять от нее для изменения ее температуры на 1 К.

Если при нагревании постоянным остаётся объем, то теплоёмкость называется теплоёмкостью при постоянном объеме C_V :

$$C_V = \frac{\delta Q}{dT}.$$

Для непосредственного измерения количества теплоты, отданного или полученного системой, служат специальные приборы – калориметры. В наиболее простой своей форме калориметр представляет собой сосуд, заполненный веществом, теплоемкость которого хорошо известна.

Измеряемое количество теплоты тем или иным путем передается калориметру, в результате чего изменяется его температура.

Необходимо учитывать, что теплота передаётся не только веществу калориметра, но и сосуду и различным устройствам, которые могут в нём помещаться. Поэтому для использования калориметра в большинстве случаев необходимо знать так называемый тепловой эквивалент калориметра C – количество

теплоты, нагревающее «пустой» калориметр на один градус.

Кроме того необходимо учитывать поправки, возникающие вследствие неизбежного теплообмена с окружающей средой. Термостатирование калориметра снижает теплообмен, но не может свести его к нулю.

Рассмотрим процесс передачи тепла веществу, находящемуся в калориметре в результате чего его температура возрастает и понижение температуры вещества после прекращения подачи теплоты.

Воспользуемся графиком температурного хода калориметра, который из-за теплообмена калориметра с окружающей средой представляет собой сложную функцию времени (рис.2.5.1 а).

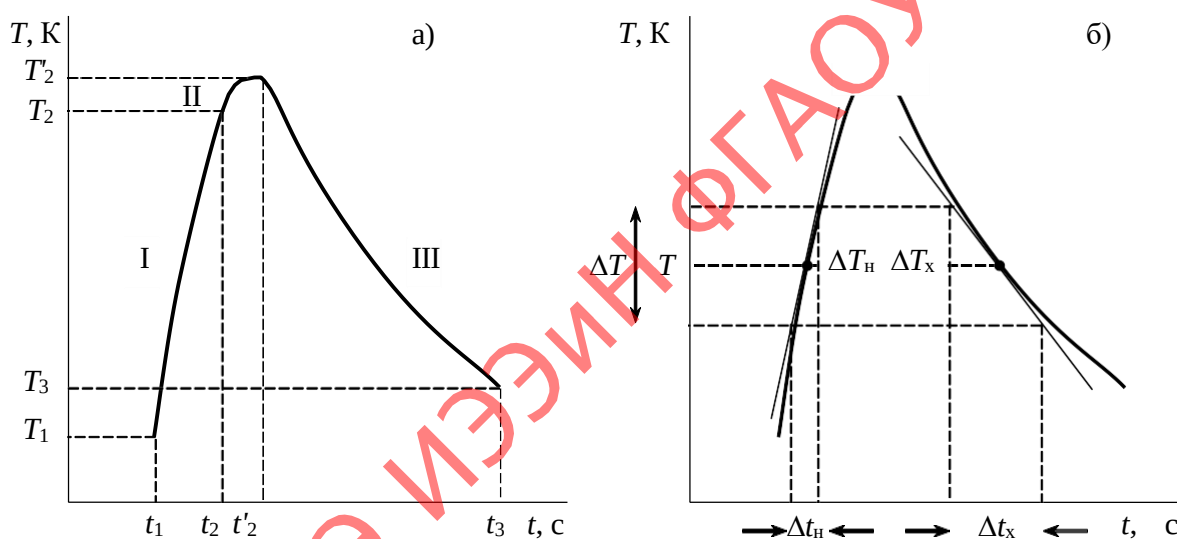


Рисунок 2.5.1. График температурного хода калориметра

В интервале времени от t_1 до t_2 калориметр получает от нагревателя больше тепла, чем отдает вследствие теплообмена; t_2 – момент выключения нагревателя, но из-за тепловой инерции максимальная температура T'_2 достигается позднее – в момент t'_2 (область II). В интервале от t'_2 до t_3 (выключение секундомера, конец опыта) идет охлаждение в результате теплообмена от максимальной температуры T'_2 до конечной T_3 (область III).

Выбрав на графике (рис.2.5.1 б) в областях нагрева I и охлаждения III газа точки с одинаковым значением температуры, т.е. $T = T_{\text{н}} = T_{\text{х}}$, составим для них уравнения теплового баланса.

В области нагрева I количество теплоты, переданное калориметру нагревателем затрачено на нагревание газа внутри калориметра, на нагревание самого калориметра и устройств внутри калориметра, на нагревание окружающей среды за счет теплообмена, т.е.

$$IUdt_{\text{н}} = mc_v dT + CdT + \alpha(T - T_{\text{ср}})dt_{\text{н}}, \quad (2.5.1)$$

где $IUdt_{\text{н}}$ – количество теплоты, полученное калориметром от электрического нагревателя за время нагрева $dt_{\text{н}}$;

I, U – сила тока и напряжение на нагревателе;

dT – измеренное повышение температуры в калориметре;

m – масса газа, находящегося в калориметре;

c_v – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме;

C – теплоемкость (тепловой эквивалент) калориметра и устройств, которые в него помещены;

α – коэффициент теплопередачи калориметра, определяющий количество теплоты, отданное в окружающую среду в единицу времени при разности температур с ней в 1 К;

T – температура калориметра в исследуемый момент времени;

$T_{\text{ср}}$ – температура окружающей среды.

В области охлаждения III количество теплоты, накопленное калориметром газом внутри калориметра, самим калориметром и устройствами внутри калориметра расходуется на нагревание окружающей среды за счет теплообмена, т.е.

$$mc_v dT + CdT = \alpha(T - T_{\text{ср}})dt_{\text{х}} \quad (2.5.2)$$

где $dt_{\text{х}}$ – время охлаждения

Если заменить $\frac{dT}{dt_{\text{н}}}$ величиной $\frac{\Delta T}{\Delta t_{\text{н}}}$ и $\frac{dT}{dt_{\text{х}}}$ величиной $\frac{\Delta T}{\Delta t_{\text{х}}}$, рассчитать эти величины из графика температурного хода калориметра, и преобразовать уравнения (2.5.1) и (2.5.2), то можно записать

$$IU = \frac{\Delta T}{\Delta t_{\text{H}}} (mc_V + C) \left(1 + \frac{\Delta t_{\text{H}}}{\Delta t_{\text{X}}}\right), \quad (2.5.3)$$

где масса газа может быть выражена из уравнения Клапейрона – Менделеева

$$m = \frac{pV\mu}{RT}. \quad (2.5.4)$$

где p – давление газа в калориметре при температуре T ;

V – объем газа в калориметре;

R – универсальная газовая постоянная;

μ – молярная масса газа в калориметре.

В полученных уравнениях лишь две величины неизвестны (c_V , C), остальные могут быть определены экспериментально (I , U , p , T , ΔT , Δt_{X} , Δt_{H}), являются параметрами установки (V), физическими постоянными (R) или известными значениями (μ).

Если провести рассмотрение нагревания газа в калориметре при измененных по отношению к предыдущему эксперименту условиях (I^* , U^* , p^* , T^* , ΔT^* , Δt_{X}^* , Δt_{H}^*), то по аналогии с (2.5.3) и (2.5.4) можно записать

$$IU = \frac{\Delta T^*}{\Delta t_{\text{H}}^*} (m c_V + C) \left(1 + \frac{\Delta t_{\text{H}}^*}{\Delta t_{\text{X}}^*}\right), \quad (2.5.5)$$

$$m^* = \frac{p^* V \mu}{RT^*}. \quad (2.5.6)$$

Решая совместно уравнения (2.5.3) – (2.5.6) можно найти теплоемкость воздуха при постоянном объеме и теплоемкость (тепловой эквивалент) калориметра с устройствами внутри него:

$$c_V = \left(\frac{I^* U^*}{\Delta T^* \Delta t_{\text{H}}^*} - \frac{IU}{\Delta T \Delta t_{\text{H}}} \right) \frac{R}{\left(\frac{1}{T^*} - \frac{1}{T} \right) V \mu}, \quad (2.5.7)$$

$$C = \left(\frac{I U}{\Delta T_{\text{н}} + \frac{\Delta T}{\Delta t_x}} \right) - \left(\frac{I^* U^*}{\Delta T_{\text{н}}^* + \frac{\Delta T^*}{\Delta t_x}} - \frac{I U}{\Delta T_{\text{н}} + \frac{\Delta T}{\Delta t_x}} \right) \frac{1}{p^* T \left(\frac{1}{p T^*} - 1 \right)}. \quad (2.5.8)$$

АППАРАТУРА, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Для определения теплового эквивалента калориметра, определения теплоемкости воздуха при постоянном объеме используется установка, принципиальная схема и внешний вид которой приведены на рис. 2.5.2 и рис. 2.5.3.

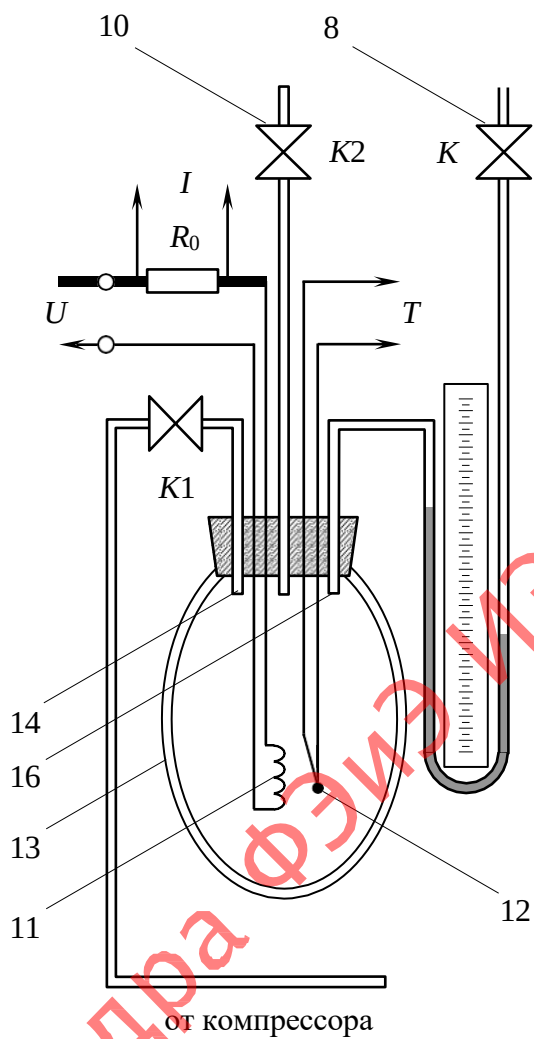


Рисунок 2.5.2

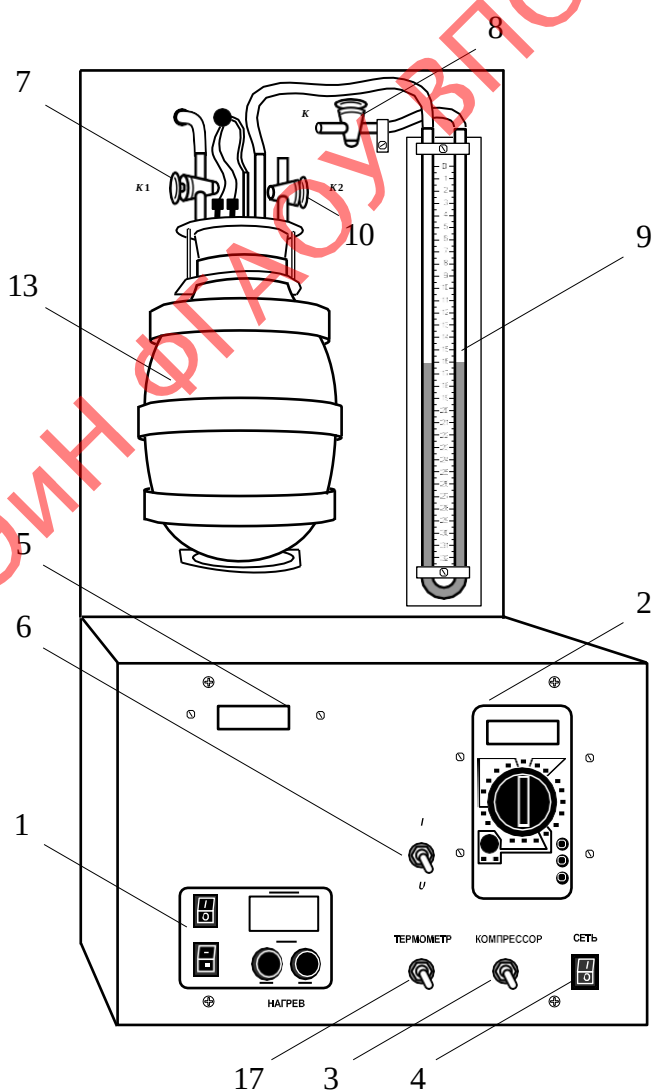


Рисунок 2.5.3

На передней панели расположены: источник питания (1), мультиметр (2), тумблер «КОМПРЕССОР» (3) для включения микрокомпрессора, кран $K1$ (7) служит для напуска воздуха в рабочий объем от микрокомпрессора, кран « K » (8) перекрывает правое колено водяного манометра (9), тумблер «СЕТЬ» (4),

индикатор термометра (5), тумблер «I» – «U» (6) для подключения мультиметра в режиме измерения тока нагревателя либо напряжения на нагревателе, калориметрический сосуд (13) и кран «K2»(10) для соединения рабочего объема с атмосферой. Тумблер (17) включения термометра.

Воздух, находящийся в калориметрическом герметизированном сосуде (13), нагревается электрической спиралью (11). Температура воздуха измеряется температурным датчиком (12), концы которого соединены с индикатором (5). К переключателю (6) подсоединены провода от образцового сопротивления R_0 , соединенного последовательно с нагревателем (11).

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторных работ необходимо выполнять основные правила внутреннего распорядка и техники безопасности при работе в лабораториях [4].

К работе на приборах допускаются студенты только после изучения настоящих методических указаний и получения допуска у преподавателя.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Перекрыть вентили (8) (сообщения правого колена U -манометра с атмосферой), (7) (сообщения рабочего объема сосуда с микрокомпрессором) и (10) (сообщения рабочего объема сосуда с атмосферой).

2. Включить электропитание приборного модуля тумблером «СЕТЬ» (мультиметр включается одновременно), включить блок питания нагревателя (1), включить термометр (17).

3. Ручкой регулятора напряжения источника питания приборного модуля установить напряжение на нагревателе калориметрического сосуда по указанию преподавателя ($U = 5 \div 15$ В) и одновременно включить секундомер.

4. Переключить тумблер (6) в положениеи "U" – измерьте напряжение на нагревателе, переключите тумблер (6) в положениеи "I" – измерьте ток нагревателя

5. Произвести отсчет значений температуры по показаниям индикатора термометра и давления по показаниям манометра (9) через каждые 30 с после установки напряжения на нагревателе колориметрического сосуда до увеличения температуры на 25 – 30 К.

6. Отключить источник питания нагревателя (1), нажав клавишу "СЕТЬ" (4).

7. Продолжить проведение отсчета значений температуры по показаниям индикатора термометра и давления по показаниям манометра (9) через каждые 30 с до уменьшения температуры на 15 – 30 К.

8. Результаты отсчетов занести в таблицу 2.5.1

Таблица 2.5.1.

№ п.п.	1	2	3	...	Примечание
t , с					$U = \dots$ В; $I = \dots$ А; $V = \dots$ м ³ ; $p = \dots$ Па; $\mu = \dots \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$
T , К					
h , мм вод.ст.					
p , Па					

7. По полученным данным построить график зависимости $T = f(t)$.

8. Определить по ртутному термометру температуру воздуха в лаборатории и принять ее равной температуре окружающей среды $T_{\text{ср}}$.

9. На графике зависимости $T = f(t)$ в областях нагрева и охлаждения, примерно в середине температурных интервалов, выбрать точки с одинаковыми температурами $T = T_{\text{н}} = T_{\text{х}}$ и определить значение производных $\frac{dT}{dt_{\text{н}}}$ и $\frac{dT}{dt_{\text{х}}}$.

10. С целью подготовки установки к новой серии экспериментов перекрыть кран (8) на атмосферу, открыть кран (7) и (10), включить микрокомпрессор для прокачки нагретого воздуха в калориметре. После достижения комнатной температуры термометром, выключить микрокомпрессор, закрыть краны (7) и (10).

11. Повторить п.п. 2 – 7 установив напряжение на нагревателе калориметрического сосуда по указанию преподавателя ($U^* = 5 \div 15$ В, при этом $U^* \neq U$) и незначительно изменить массу воздуха в калориметре (а следовательно и первоначальное давление воздуха p^* в нем), открыв вентиль (7) и включив микрокомпрессор тумблером (3) на 10 – 15 с.

12. Рассчитать по формулам (2.5.7), (2.5.8) тепловое значение калориметрического сосуда и удельную теплоемкость воздуха при постоянном объеме.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И ЕГО ФОРМА

Отчет по лабораторной работе оформляется в соответствии с формой, приведенной в приложении 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Что такое теплоёмкость?

Запишите уравнение I начала термодинамики.

Почему теплоемкость газов зависит от условий нагревания?

Почему C_p больше, чем C_v ?

Может ли газ в данной работе считаться идеальным и почему?

Каков смысл теплового эквивалента калориметра?

Каким образом в работе учтен теплообмен с окружающей средой?

Каким образом проводится определение $\frac{dT}{dt_h}$ и $\frac{dT}{dt_x}$?.

Почему интенсивность теплообмена зависит от разности температур «нагревателя» и «холодильника»?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.6

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ:

Измерить удельную теплоемкость воздуха при постоянном давлении методом протока.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ:

Удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении

$$c_p = \frac{Q}{m \Delta T}, \quad (2.6.1)$$

где Q – теплота, которую сообщают воздуху при $p = \text{const}$,

m – масса воздуха,

ΔT – изменение температуры.

Измерив Q , ΔT , m , можно рассчитать c_p .

Для измерения этих величин используется метод протока.

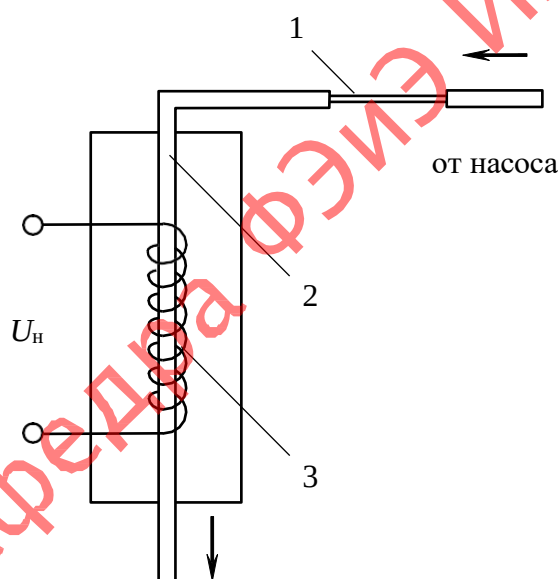


Рисунок 2.6.1

Воздух прокачивается насосом через капилляр 1 (рис. 2.6.1) и попадает в трубку 2. Протекая через трубку 2, воздух нагревается электрической спиралью 3.

Согласно закона Джоуля – Ленца количество теплоты, переданное нагревателем воздуху за время t

$$Q = IUt, \quad (2.6.2)$$

где I – ток, протекающий по спирали,

U – напряжение на ней.

Так как воздух при нагревании протекает через капилляр, то измерение

массы m воздуха, нагреваемого за время t производится по перепаду давлений Δp на капилляре 1, который вместе с трубкой образуют проточную магистраль.

Из уравнения Пуазейля (2.2.4) с учетом формулы плотности $\rho = \frac{m}{V}$,

получим

$$m = \frac{1}{\eta} \frac{\pi D^4 \rho \Delta p}{128 L} t, \quad (2.6.3)$$

где D – диаметр капиллярной трубки,

L – длина капиллярной трубки,

Δp – разность давлений на концах капилляра,

η – коэффициент вязкости воздуха.

Подставив (2.6.3) и (2.6.2) в (2.6.1), получим

$$c_p = \frac{128 \eta I U L}{\pi d^4 \Delta T \Delta p \rho}.$$

Согласно (1.7) и (1.3)

$$\eta = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle u \rangle \rho,$$

$$\langle \lambda \rangle = \frac{RT}{\sqrt{2} \pi d^2 p N_A},$$

где $\langle \lambda \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекул воздуха,

$$\langle u \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}} \text{ – средняя арифметическая скорость молекул,}$$

T – температура воздуха,

p – давление воздуха,

d – эффективный диаметр молекулы,

N_A – число Авогадро.

μ – молярная масса газа.

Тогда формула для расчета c_p методом протока примет вид:

$$c_p = \frac{256}{3} \frac{I U}{\rho \Delta T D^4 d^2 p N_A} \sqrt{\frac{R^3 T^3}{\pi^3 \mu}}. \quad (2.6.4)$$

Зная параметры газа, размеры капилляра и мощность нагревательной

спирали, можно определить удельную теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

Температура воздуха в капилляре равна температуре воздуха в лаборатории. Давление в капилляре незначительно отличается от атмосферного давления $p_{\text{атм}}$. Это отличие практически не вносит дополнительной погрешности в результат измерения c_p , поэтому можно считать, что $p = p_{\text{атм}}$.

АППАРАТУРА, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Для определения удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении используется установка, принципиальная схема и внешний вид которой приведены на рис. 2.6.2 и рис. 2.6.3.

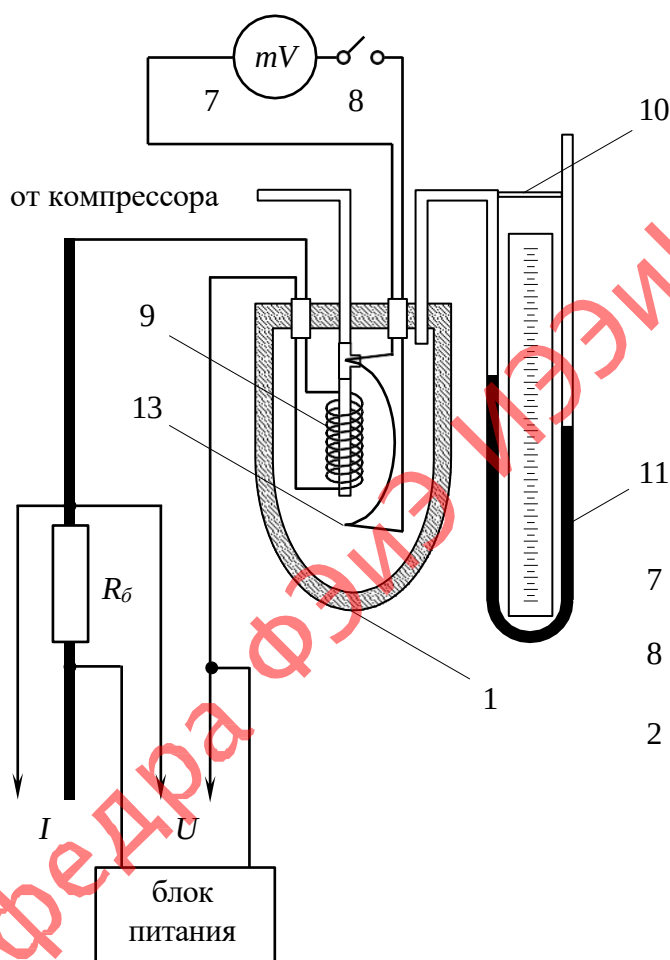


Рисунок 2.6.2

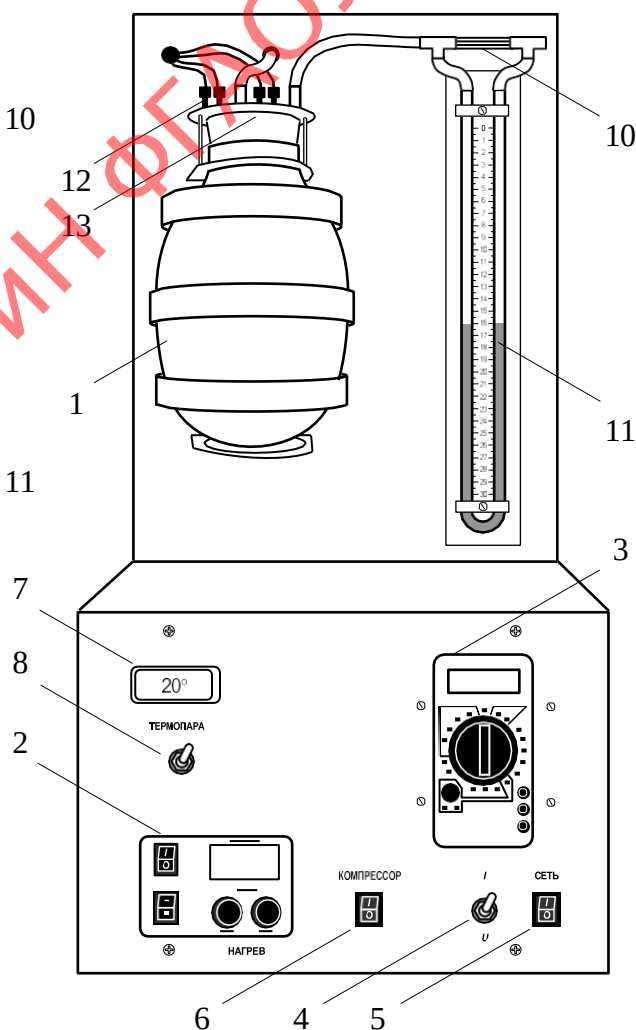


Рисунок 2.6.3

На передней панели расположены: корпус стеклянного баллона термоста-

та (1), источник питания (2) и мультиметр (вольтметр) (3), тумблер (4) для подключения мультиметра в режиме измерения тока – положение « I » и положение « U » в режиме измерения напряжения на нити, тумблер включения электропитания установки «СЕТЬ» (5), тумблер «КОМПРЕССОР» (6) включения микрокомпрессора, цифровой индикатор термометра (7), тумблер включения термометра (8). Сзади справа находится клемма заземления установки.

Схема установки включает капилляр (10), соединенный одним концом через систему пневмопровода с термостатом (1), другой конец капилляра сообщается с атмосферой. U -манометр (11) соединен к обоим концам капилляра (10).

Нагреваемая вольфрамовая спираль (9) намотана на стеклянную трубку, по которой в баллон прокачивается воздух.

Вольфрамовая проволока через соединительные провода (12) подключается к источнику питания постоянного тока (2). Ток в нити определяется по падению напряжения U на балластном сопротивлении $R_0 = 1$ Ом. Напряжение на проволоке U и падение напряжения на балластном сопротивлении U измеряется мультиметром при соответствующем положении переключателя (4).

Для прокачивания воздуха используется микрокомпрессор, включаемый тумблером (6). Воздух прокачивается насосом через пневмопровод, трубку, нагреваемую вольфрамовой спиралью, термостат (1) и капилляр (10).

Разность давлений Δp на концах капилляра измеряется с помощью манометра (11).

Разность температур на входе и выходе трубки измеряется термопарой³ (13) с милливольтметром, цифровой индикатор которого (7), размещен на передней панели установки.

³ Термопара – устройство для измерения температур. Она состоит из двух разнородных проводников, сваренных своими концами, образующими два спаи. Если спаи находятся при разных температурах, то в цепи термопары возникает термо-ЭДС, величина которой пропорциональна разности температур спаев.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторных работ необходимо выполнять основные правила внутреннего распорядка и техники безопасности при работе в лабораториях [4].

К работе на приборах допускаются студенты только после изучения настоящих методических указаний и получения допуска у преподавателя.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить электропитание тумблером «СЕТЬ» (мультиметр включается одновременно).
2. Установить на мультиметре предел измерения напряжений «20 В». Включить источник постоянного напряжения.
3. Убедиться в том, что на выходе источника питания отсутствует напряжение. При этом регулятор напряжения необходимо повернуть против часовой стрелки до упора.
4. Установить тумблер (4) в положение «U» для измерения напряжения на вольфрамовой проволоке.
5. Установить рекомендованное преподавателем значение напряжения на источнике питания, следя за показаниями мультиметра. Произвести отсчет напряжения на вольфрамовой проволоке.
6. Переключить тумблер (4) в положение «I» для измерения падения напряжения на балластном сопротивлении, пропорциональном силе тока в цепи вольфрамовой нити.
7. Переключить предел измерения напряжения мультиметра на 200 mV. Дождавшись стационарного режима нагревателя (сила тока при этом должна оставаться неизменной) произвести отсчет падения напряжения на балластном сопротивлении.
8. Зарегистрировать значение разности температур по цифровому индикатору термометра (7) при установлении стационарного режима (показания индикатора должны оставаться неизменным во времени).

9. Произвести отсчет разности уровней жидкости Δh в коленях манометра (11) и определить разность давлений Δp на концах капилляра по формуле

$$\Delta p = \rho_{\text{ж}} g \Delta h,$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости в манометре.

10. Повторить измерения по п.п. 2 – 9 для различных значений U (не менее 5 раз).

11. Определить по лабораторным термометру и барометру температуру и давление окружающей среды – воздуха.

12. Рассчитать значения c_p по формуле (2.6.4).

13. Рассчитать погрешность измерений.

14. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 2.6.1.

Таблица 2.6.1

№ п.п.	U , В	I , А	T , К	ΔT , К	Δh , мм. вод.ст.	Δp , Па	$c_{p\text{ из}}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}$	c_p , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}$	Примечание
1									$L = \dots$ м; $D = \dots$ м; $d = \dots$ м; $T = \dots$ К; $p = \dots$ Па; $\mu = \dots \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$
2									
3									
4									
...									

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И ЕГО ФОРМА

Отчет по лабораторной работе оформляется в соответствии с формой, приведенной в приложении 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Что называется теплоемкостью, удельной теплоемкостью и молярной теплоемкостью газа?

Почему теплоемкости при постоянном давлении не равны теплоемкостям при постоянном объеме?

Почему вычисленная в данной работе удельная теплоемкость является теплоемкостью при постоянном давлении?

В чем заключается метод потока?

Каково назначение капилляра в лабораторной установке?

Кафедра ФЭиЭ ИЭЭиН ФГАОУ ВПО СКФУ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ГАЗОВ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Измерить отношение удельных теплоемкостей воздуха $\frac{c_p}{c_v}$.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ:

Рассмотрим один из способов определения отношения $\frac{c_p}{c_v} = \gamma$.

Пусть мы имеем стеклянный сосуд A , соединенный с манометром M . По-
средством кранов сосуд может соединяться с атмосферой и насосом (рис. 2.7.1).

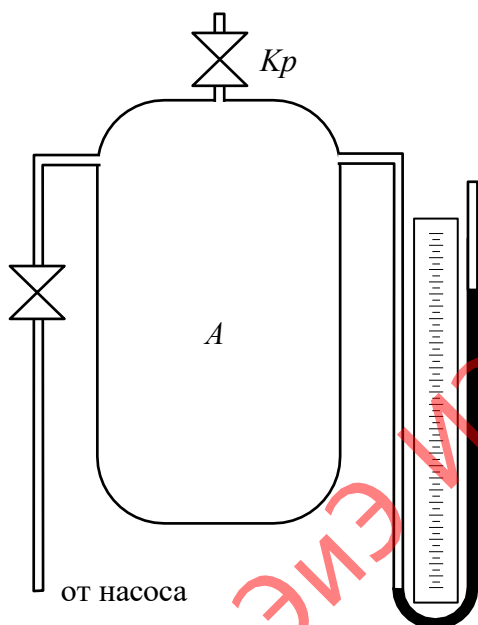


Рисунок 2.7.1

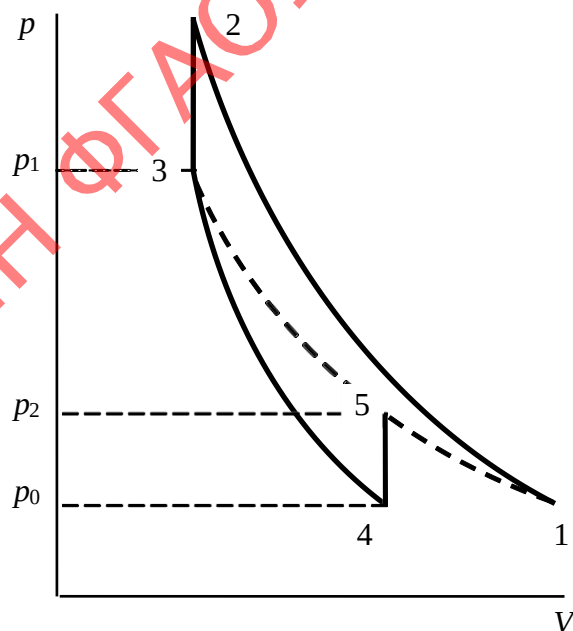


Рисунок 2.7.2

Накачаем насосом воздух в сосуд A (процесс 1 – 2), через некоторое время изохорически (процесс 2 – 3) его температура станет равной температуре окружающей среды, а давление $p_1 = p_0 + \Delta p_1$ (состояние 3 – p_1, T_0), (рис. 2.5.2).

Изменение давления Δp в сосуде регистрируется жидкостным манометром M по разности высот h

$$\Delta p = \rho gh,$$

где ρ – плотность жидкости в манометре.

Если быстро открыть кран, то воздух в сосуде будет расширяться адиабатически, пока давление его не станет равным p_0 , при этом он охладится от температуры окружающего воздуха T_0 до температуры T_1 (состояние 4 – p_0, T_1). Если сразу после открывания снова закрыть кран, то давление внутри сосуда начнет возрастать вследствие того, что охладившийся при расширении воздух в сосуде начнет снова нагреваться. Возрастание давления прекратится, когда температура воздуха в сосуде сравняется с внешней температурой T_0 . При этом давление станет равным p_2 (состояние 5 – p_2, T_0).

$$p_2 = p_0 + \Delta p_2, \quad \Delta p_2 = \rho g h_2.$$

При переходе из состояния 3 в 4:

$$\left(\frac{T_0}{T_1}\right)^\gamma = \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\gamma-1}, \quad (2.7.1)$$

где $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$.

При переходе из состояния 4 в 5 состояние ($V = \text{const}$):

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{p_0}{p_2}. \quad (2.7.2)$$

Подставляя $\Delta p_1 = \rho g h_1$ в (2.7.1), получим

$$\left(\frac{p_0 + \Delta p_1}{p_0}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_0}{T_1}\right)^\gamma, \quad \text{или} \quad \left(1 + \frac{\Delta p_1}{p_0}\right)^{\gamma-1} = \left(1 + \frac{T_0 - T_1}{T_1}\right)^\gamma.$$

Так как $\frac{\Delta p_1}{p_0}$ и $\frac{T_0 - T_1}{T_1}$ – величины малые, то разлагая обе части равенства по

биному Ньютона и ограничиваясь членами I порядка малости, получим

$$1 + (\gamma - 1) \frac{\Delta p_1}{p_0} = 1 + \gamma \frac{T_0 - T_1}{T_1},$$

откуда

$$p_0 \frac{T_0 - T_1}{T_1} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \Delta p_1. \quad (2.7.3)$$

Подставляя $p_2 = p_0 + \Delta p_2$ в (2.7.2), получим

$$\frac{p_0 + \Delta p_2}{T_0} = \frac{p_0}{T_1},$$

отсюда

$$\Delta p_2 = p_0 \frac{T_0 - T_1}{T_1}. \quad (2.7.4)$$

Подставляя (2.7.4) в (2.7.3), получим

$$h_2 = \frac{\gamma - 1}{\gamma} h_1,$$

тогда

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (2.7.5)$$

Однако при таком методе расчета необходимо выполнение следующих условий:

– в процессе 3 – 4 (рис. 2.7.3) кран баллона должен быть перекрыт в момент, когда давление в баллоне станет равным p_0 .

– время, в течение которого давление в баллоне уменьшается от p_1 до p_2 должно быть достаточно мало, чтобы теплообменом с окружающим воздухом можно было пренебречь.

Практически эти условия выполнить трудно из-за ряда причин.

После открывания крана (процесс 3 –

4) давление в баллоне со временем τ уменьшается по закону

$$p = p_0 + \Delta p_1 \exp \left(- \frac{L\tau}{V_0} \right),$$

где L – проводимость канала выпускного крана,

V_0 – объем выпускного канала,

p – давление газа.

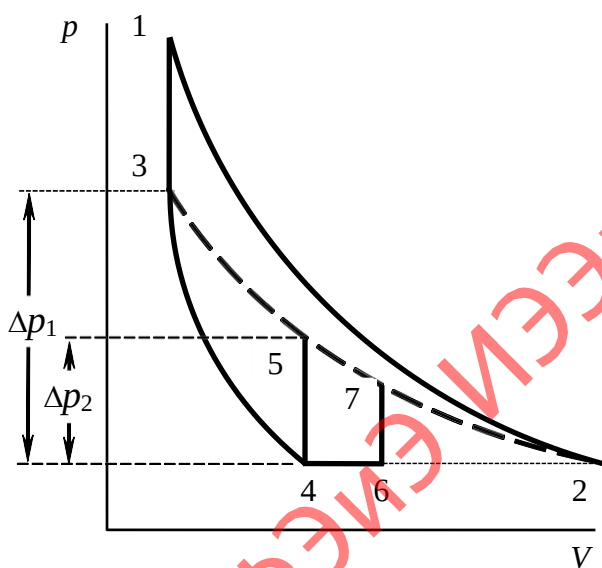


Рисунок 2.7.3

Расчет показывает, что через 0,1 с давление в баллоне отличается от p_0 не более, чем на $0,01 \Delta p_1$. Однако, вручную открыть кран на 0,1 с трудно, практически это время оказывается значительно больше.

Рассмотрим влияние времени t , в течение которого кран Kp остается открытым после достижения давления p_0 на результат опыта.

Предположим, что после достижения давления p_0 кран остается открытым еще некоторое время t . За это время происходит изобарный нагрев (процесс 4 – 6) за счет теплообмена газа со стенками баллона, а также выход части газа из баллона, вызванный нагревом и расширением этого газа. Величину t назовем временем выдержки.

После того, как кран Kp закрывают (точка 6) происходит изохорный нагрев (процесс 6 – 7). Давление в баллоне достигает величины $p_0 + \Delta p_2$. Конечное состояние (точка 7) лежит на той же изотерме, что и точки 1, 3, 5. Из этого рассмотрения видно, что Δp_2 зависит от t . Таким образом, если не принимать во внимание теплообмен и выход части газа из баллона за время t , то γ , рассчитанная по формуле (2.7.5), будет иметь погрешность.

Выведем зависимость Δp_2 от t . Для процесса 4 – 6 уравнение баланса энергии имеет вид:

$$-m c_p dT = \kappa (T - T_0) dt, \quad (2.7.6)$$

где c_p – удельная теплоемкость газа,

κ – коэффициент теплоотдачи,

$m = m_0 + \Delta m$ – переменная масса газа в баллоне,

m_0 – масса газа в баллоне до накачивания,

Δm – масса газа, вышедшего из баллона.

Из закона Менделеева – Клапейрона

$$m_0 = \frac{p_0 V_0 \mu}{RT_0}. \quad (2.7.7)$$

где V_0 – объем баллона.

Решая уравнения (2.7.6) и (2.7.7), получим

$$\ln \frac{T - T_0}{T} = - \frac{\kappa R T_0}{p_0 V_0 M_{CP}} t + \ln A.$$

При $t = 0$, $T_1 = T_0 - \Delta T_1$, тогда

$$\frac{T}{T_1} = \frac{T_1}{T_1} \exp\left(- \frac{\kappa t}{m_0 C_P}\right). \quad (2.7.8)$$

После того, как в момент времени t кран Kp перекрывается, нагрев газа в баллоне продолжается изохорически. Давление газа в конце концов достигает величины $p = p_0 + \Delta p_2$. Из условия изохоричности следует, что

$$\Delta p_2 = p_0 \frac{T}{T_0 - T}. \quad (2.7.9)$$

Для адиабатического процесса 3 – 4 имеет место соотношение

$$\frac{T_1}{T_1} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{p_1}{p_0}. \quad (2.7.10)$$

Подставляя (2.7.9), (2.7.10) в (2.7.8), получим

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \exp\left(- \frac{\kappa t}{m_0 C_P}\right). \quad (2.7.11)$$

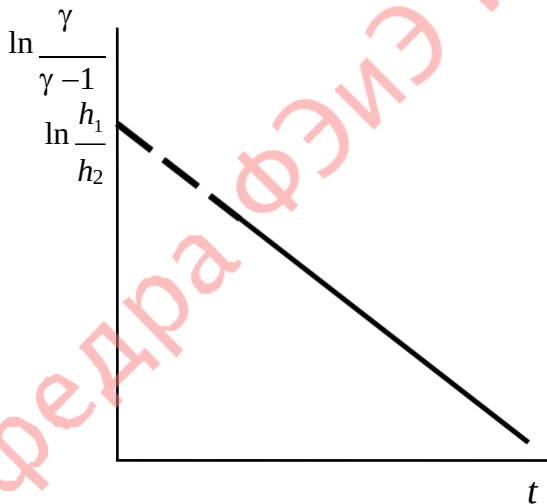


Рисунок 2.7.4

Это уравнение учитывает как теплообмен, так и выход части газа из баллона в процессе нагрева. Если прологарифмировать левую и правую части уравнения (2.7.11) и учесть, что

$$\Delta p_1 = \rho g h_1, \quad \Delta p_2 = \rho g h_2,$$

$$\text{то} \quad \ln \frac{h_1}{h_2} = \ln \frac{\gamma}{\gamma - 1} - \frac{\kappa t}{m_0 C_P}.$$

Если построить график зависимости $\ln \frac{h_1}{h_2} = f(t)$ (рис. 2.7.4), то угловой коэффициент равен $\frac{\kappa t}{m_0 C_P}$, а отрезок,

отсекаемый от оси $\ln \frac{h_1}{h_2}$ при продолжении прямой ($t \rightarrow 0$), равен $\ln \frac{\gamma}{\gamma - 1} = b$.

Определив по графику b , можно рассчитать γ

$$\gamma = \frac{e^b}{e^b - 1}. \quad (2.7.12)$$

АППАРАТУРА И МАТЕРИАЛЫ:

Для определения отношения удельных теплоемкостей воздуха используется установка, принципиальная схема и внешний вид которой приведены на рис. 2.7.5 и рис. 2.7.6.

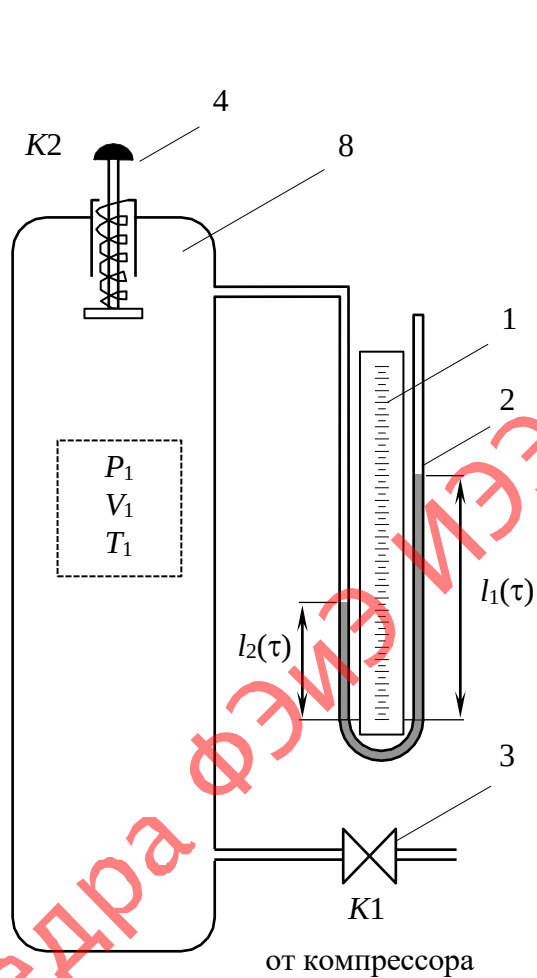


Рисунок 2.7.5

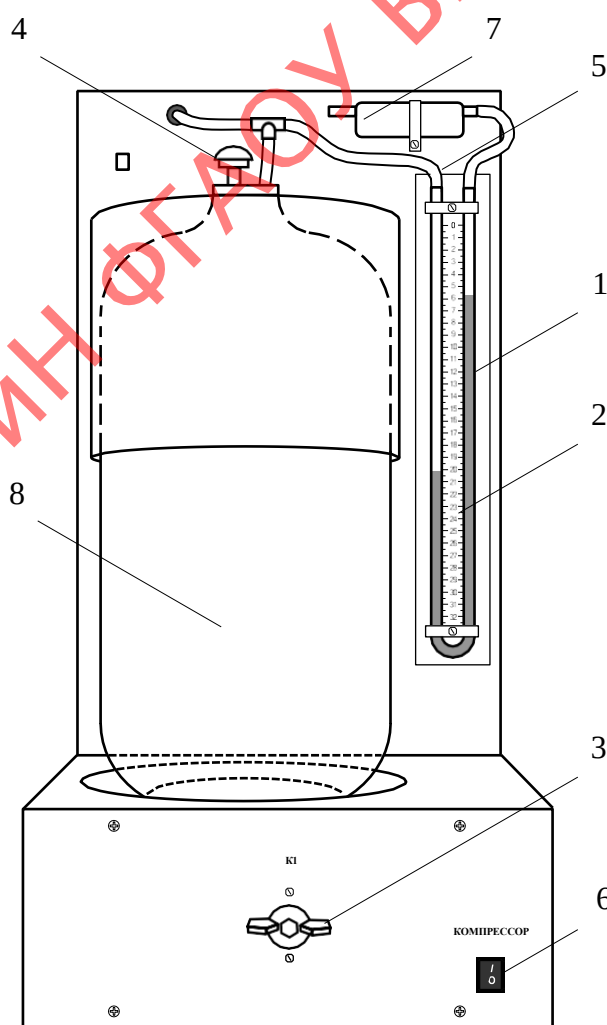


Рисунок 2.7.6

На передней панели расположены: водяной U -манометр (1) с измерительной линейкой (2), кран $K1$ напуска воздуха (3), клапан $K2$ сброса давления (4), расположен пневмопровод (5) и тумблер включения микрокомпрессора «КО-

ПРЕССОР» с индикацией включения (6). *U*-образный манометр имеет переливной бачок (7). Сбоку сзади находится клемма заземления установки. Установка содержит стеклянный баллон (8), наполняемый воздухом. Баллон (8) соединен с водяным *U*-манометром (1) и компрессором с помощью пневмопровода.

С помощью компрессора в баллон накачивают воздух, затем закрывают кран *K*1 (3). Через несколько минут температура воздуха в баллоне станет равной температуре в лаборатории.

При открывании клапана *K*2 (4) быстрое изменение давления в баллоне происходит практически без теплообмена с окружающей средой, поэтому процесс, с достаточной точностью, можно считать адиабатным.

Для получения наиболее точного экспериментального значения необходимо закрыть клапан точно в момент окончания адиабатного процесса (рис. 2.7.3). Так как время протекания адиабатного процесса неизвестно, значение разности уровней *U*-образного манометра определяется косвенным графическим методом (рис. 2.7.4).

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторных работ необходимо выполнять основные правила внутреннего распорядка и техники безопасности при работе в лабораториях [4].

К работе на приборах допускаются студенты только после изучения настоящих методических указаний и получения допуска у преподавателя.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить электропитание компрессора.
2. Открыть кран *K*1 и накачать в баллон воздух так, чтобы разность уровней жидкости в манометре стала около 250 мм ($h_1 = l_1 - l_2$, где l_1 , l_2 – уровни жидкости в коленах манометра).

3. Закрыть кран *K*1, выждать 2-3 минуты, до тех пор, пока температура воздуха в баллоне не станет равной температуре окружающей среды. Произве-

сти дополнительную регулировку разностей уровней (в дальнейших опытах начальную разность уровней нужно поддерживать постоянной). Записать значения уровней жидкости в таблицу.

4. Резко нажать на клапан $K2$, соединив баллон с атмосферой. Одновременно включить секундомер. Выдержать клапан $K2$ открытым в течение заданного времени; после этого отпустить клапан. Через 3–4 минуты (после того, как уровни жидкости в манометре стабилизируются) записать значения уровней жидкости в таблицу ($h_2 = l_1' - l_2'$).

5. Повторить опыты (пункты 2 – 4) не менее пяти раз для разных значений времени нажатия на клапан $K2$ – 10, 15, 20, 25, 30, 35 секунд. Следить за тем, чтобы начальная разность уровней H была постоянной.

Примечание: накачивать воздух в баллон нужно медленно (чтобы избежать значительного повышения температуры воздуха в баллоне) и осторожно (чтобы нижний уровень жидкости не достиг колена манометра).

5. Построить график $\ln \frac{h_1}{h_2} = f(t)$. Определить, отсекаемый от оси $\ln \frac{h_1}{h_2}$, отрезок b .

6. Рассчитать γ по формуле (2.7.12).

7. Оценить погрешность γ .

8. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 2.7.1.

Таблица 2.7.1

№ п.п	h_1 , мм.вод.ст.	t_i , с	h_{2i} , мм.вод.ст.	b	γ	Примечание
1						
2						
...						

9. Сравнить экспериментальное значение γ с теоретическим значением (воздух считать двухатомным идеальным газом).

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И ЕГО ФОРМА

Отчет по лабораторной работе оформляется в соответствии с формой,

приведенной в приложении 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Что такое внутренняя энергия идеального газа? Какими параметрами она определяется?

В результате каких процессов может изменяться внутренняя энергия системы?

Что такое теплоемкость газов? Какая из теплоемкостей C_p или C_v больше и почему?

Почему адиабата на графиках круче изотермы?

Как изменяется температура газа при адиабатическом сжатии?

Газ переходит из одного и того же начального состояния в одно и то же конечное состояние в результате следующих процессов: изотермического, изохорного и изобарного. Рассмотрев эти процессы графически, покажите: когда работа расширения максимальна; когда газу сообщается максимальное количество теплоты.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНТРОПИИ ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ОЛОВА

ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ:

Определить изменение энтропии при кристаллизации олова.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ:

Наряду с такими характеристиками состояния макросистем, как температура, объем, давление и т.д., применяется такая однозначная функция состояния системы как энтропия. С точки зрения статистической физики энтропия определяет степень молекулярного беспорядка вещества, вызванного тепловым движением молекул. Если сообщить телу бесконечно малое количество тепла δQ при температуре T , энтропия тела S изменится на величину

$$dS = \frac{\delta Q}{T}.$$

Изменение энтропии при кристаллизации ΔS_k олова:

$$\Delta S_k = \int_{T_{кр}} \frac{\delta Q_{кр}}{T_{кр}} = \frac{Q_{кр}}{T_{кр}} = \frac{\lambda m}{T_{кр}}, \quad (2.8.1)$$

где $Q_k = \lambda m$ – теплота, выделяемая веществом при кристаллизации,

$T_{кр}$ – температура кристаллизации (в процессе кристаллизации $T_{кр}$ не изменяется),

λ – удельная теплота кристаллизации олова,

m – масса олова.

Таким образом, определение изменения энтропии ΔS у заданной массы m олова сводится к экспериментальному измерению температуры кристаллизации $T_{кр}$ и удельной теплоты кристаллизации олова λ по кривой охлаждения, теоретически ожидаемый вид которой представлен на рис. 2.8.1.

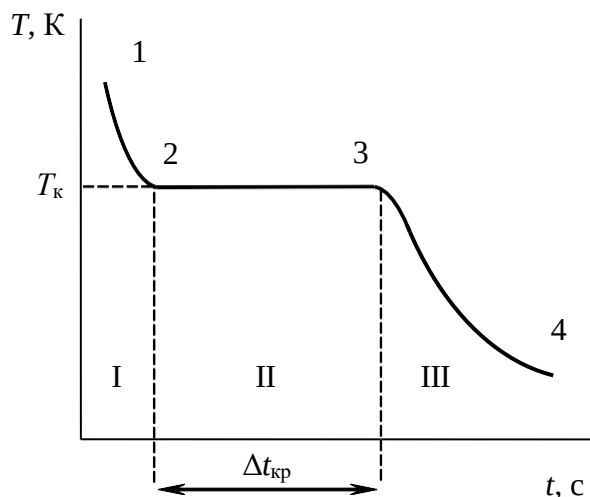


Рисунок 2.8.1

Температура кристаллизации T_k соответствует горизонтальному участку 2 – 3 графика.

Количество теплоты, которое необходимо отвести от расплавленного олова, находящегося при температуре кристаллизации для перехода расплава в твердое состояние (участок 2 – 3 графика) должно в соответствии с законом сохранения энергии соответствовать

количеству теплоты, отданному окружающей среде через поверхность ампулы за время кристаллизации $dt_{кр}$

$$\lambda m + \kappa S(T_{кр} - T_{ср}) dt_{кр} = 0, \quad (2.8.2)$$

где κ – коэффициент теплоотдачи с поверхности ампулы в окружающую среду (во время проведения опыта можно считать постоянной величиной);

S – площадь поверхности ампулы с оловом;

$T_{ср}$ – температура окружающей среды.

При этом $\lambda m < 0$, так как это количество теплоты отдано окружающей среде, а $\kappa S(T_{кр} - T_{ср})dt_{кр} > 0$, так как это количество теплоты получено окружающей средой.

Количество теплоты, которое необходимо отвести от нагретой ампулы с оловом, для их охлаждения (участок 3 – 4 графика) должно в соответствии с законом сохранения энергии соответствовать количеству теплоты, отданному окружающей среде через поверхность ампулы за время охлаждения $dt_{охл}$

$$(c_o m_o dT + c_a m_a dT) + \kappa S(T - T_{ср})dt_{охл} = 0, \quad (2.8.3)$$

где c_o, c_a – теплоемкости олова и материала ампулы соответственно;

m_o, m_a – массы олова и ампулы соответственно,

T – температура ампулы с оловом в момент времени t .

При этом $(c_o m_o + c_a m_a)dT < 0$, так как это количество теплоты отдано ок-

ружающей среде, а к $S(T_{\text{кр}} - T_{\text{ср}}) dt_{\text{охл}} > 0$, так как это количество теплоты получено окружающей средой.

Решая совместно уравнения (2.8.2), (2.8.3), получим

$$\lambda = (c_o m_o + c_a m_a) \frac{1}{m_o} dt_{\text{кр}} \frac{T_{\text{кр}} - T_{\text{ср}}}{T - T_{\text{ср}}} \frac{dT}{dt}. \quad (2.8.4)$$

Задача сводится к определению скорости изменения температуры $\frac{dT}{dt}$ на участке 3 – 4 вблизи точки 3.

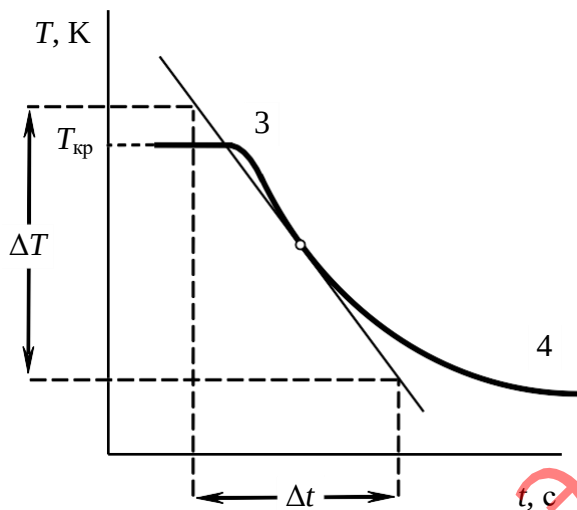


Рисунок 2.8.2

Для нахождения этих величин необходимо графически продифференцировать участок охлаждения вблизи области кристаллизации.

Рассмотрим участок 3 – 4 вблизи точки 3 (рис. 2.8.2). Проведя касательную к кривой в исследуемой точке, и взяв произвольный отрезок Δt , найдем соответствующий ему интервал ΔT .

Отношение $\frac{dT}{dt}$ определяет про-

изводную $\frac{dT}{dt}$, то есть $\frac{dT}{dt} = \frac{\Delta T}{\Delta t}$.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для определения изменения энтропии при кристаллизации олова используется установка, принципиальная схема и внешний вид которой приведены на рис. 2.8.3 и рис. 2.8.4.

На передней панели расположены: цифровой индикатор термометра (1), датчик термометра (2), устройство подъема (3) ампулы с оловом (5) (рис.6) из электрической печи (6), тумблер включения электропитания печи «НАГРЕВ» (7), тумблер включения электропитания термометра (8). Сзади справа находится клемма заземления установки.

Ампула (5) с оловом (рис.6) нагревается в электрической печи (6), питающейся переменным током. Внутри ампулы находится металлическая трубка-чехол (9) для термодатчика (2). Датчик температуры соединен с цифровым индикатором температуры (1).

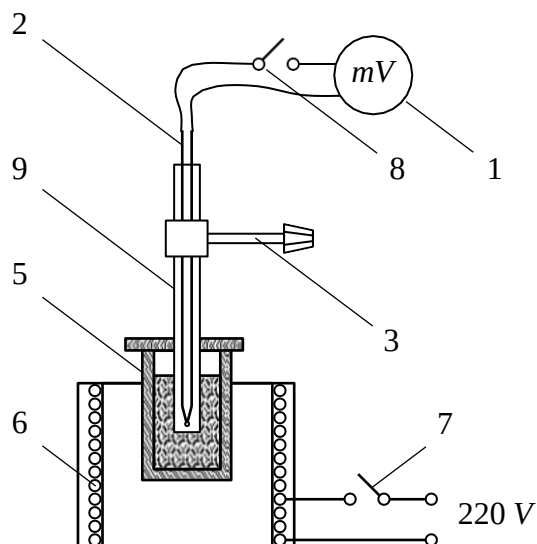


Рисунок 2.8.3

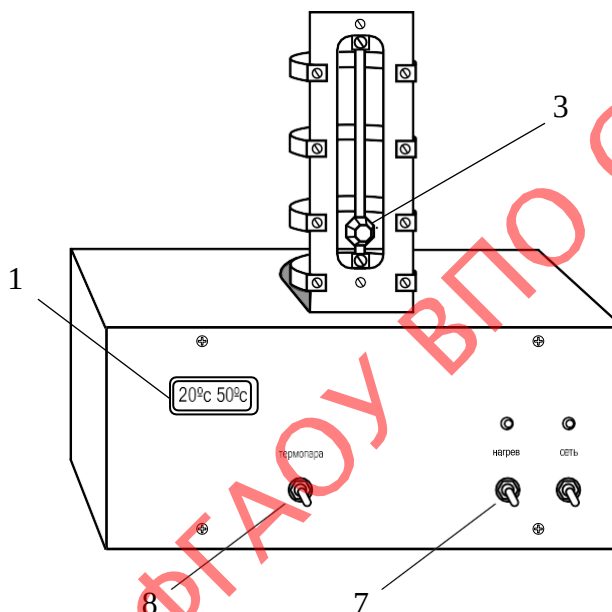


Рисунок 2.8.4

В работе измеряется зависимость температуры олова от времени его охлаждения $T = f(t)$.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторных работ необходимо выполнять основные правила внутреннего распорядка и техники безопасности при работе в лабораториях [4].

К работе на приборах допускаются студенты только после изучения настоящих методических указаний и получения допуска у преподавателя.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить установку в сеть.
2. Включить электропитание термометра тумблером «ТЕРМОМЕТР».
3. Опустить ампулу с оловом в нагреватель и включить тумблер «НА-

ГРЕВ» Проследить в течение 7 – 8 минут за тем, чтобы олово, находящееся в ампуле, расплавилось. Процесс плавления олова происходит при постоянной температуре плавления $T_{кр}$. При этом показания термометра практически не изменяются. Окончание процесса плавления можно определить как момент времени, после которого показания термометра начинают возрастать (при температуре более 180°C).

4. Через 1 – 2 минуты после окончания процесса плавления отключить электрическую печь, отвернуть винт (4) ползунка (3), поднять ампулу с оловом (5) из печи (6). Зафиксировать положение ампулы тем же винтом.

5. Включить секундомер и через каждые 15 – 20 секунд снимать показания термометра. Измерения продолжать до тех пор, пока не будут пройдены три области процесса охлаждения: область полного расплава; область кристаллизации; область охлаждения твердого олова. Время опыта – около 10 минут.

6. Получив 30 – 40 экспериментальных точек, выключить установку.

7. Экспериментальные данные занести в таблицу 2.8.1.

Таблица 2.8.1.

t, c										...
T, K										...

8. Определить по лабораторному термометру температуру окружающей среды – воздуха.

9. По данным измерения построить график зависимости температуры олова T от времени. На графике зависимости $T = f(t)$ найти горизонтальный участок, определить соответствующую ему температуру T_k и время кристаллизации олова.

10. На графике $T = f(t)$ в области охлаждения твердого олова III выбрать произвольную точку и провести касательную к ней. В выбранной точке определить $\frac{dT}{dt}$ и по формулам (2.8.4) и (2.8.1) рассчитать удельную теплоту кристаллизации олова и изменение энтропии при фазовом переходе первого рода

11. Результаты расчетов занести в таблицу 2.8.2.

Таблица 2.8.2

$T_{кр}, K$	$t_{кр}, c$	$\frac{dT}{dt}, \frac{K}{c}$	$\lambda, \frac{Дж}{кг}$	$\Delta S_{кр}, \frac{Дж}{кг K}$	Примечание
					$m_0 = \dots кг;$ $m_a = \dots кг;$ $T_{ср} = \dots K$

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И ЕГО ФОРМА

Отчет по лабораторной работе оформляется в соответствии с формой, приведенной в приложении 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

Сформулируйте законы термодинамики.

Какие существуют функции состояния термодинамической системы?

Что такое энтропия?

Почему во время кристаллизации (плавления) температура вещества практически не изменяется?

При кристаллизации олова величина ΔS положительная или отрицательная?

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев, И. В. Курс общей физики: учебное пособие: в 4 т. / И. В. Савельев; под ред. В. И. Савельева, Т.1, Механика. Молекулярная физика и термодинамика. - М.: КНОРУС, 2009. - 528 с.

2. Фриш, С. Э. Курс общей физики: учебник: в 3 т. / С. Э. Фриш, А. В. Тиморева, Т. 1, Физические основы механики. Молекулярная физика. Колебания и волны. - Изд. 12-е, стер. - СПб. [и др.]: Лань, 2007. - 470 с. :

3. Бондарев, Б. В. Курс общей физики: учеб. пособие для вузов: в 3 кн. / Б. В. Бондарев, Н. П. Калашников, Г. Г. Спирин, Кн.3, Термодинамика. статистическая физика. Строение вещества. - М.: Высш. шк., 2003. - 366 с.

4. Введение в лабораторный практикум по физике: Методические указания / сост. М. А. Голубин, И. М. Хабибулин, В. И. Шестошалова. - Ставрополь: СевКавГТУ, 2000. - 21 с.

ОТЧЕТ
о лабораторной работе по физике № _____

(название работы)

студента группы _____

(Ф.И.О.)

Цель работы: _____

Приборы и их характеристики

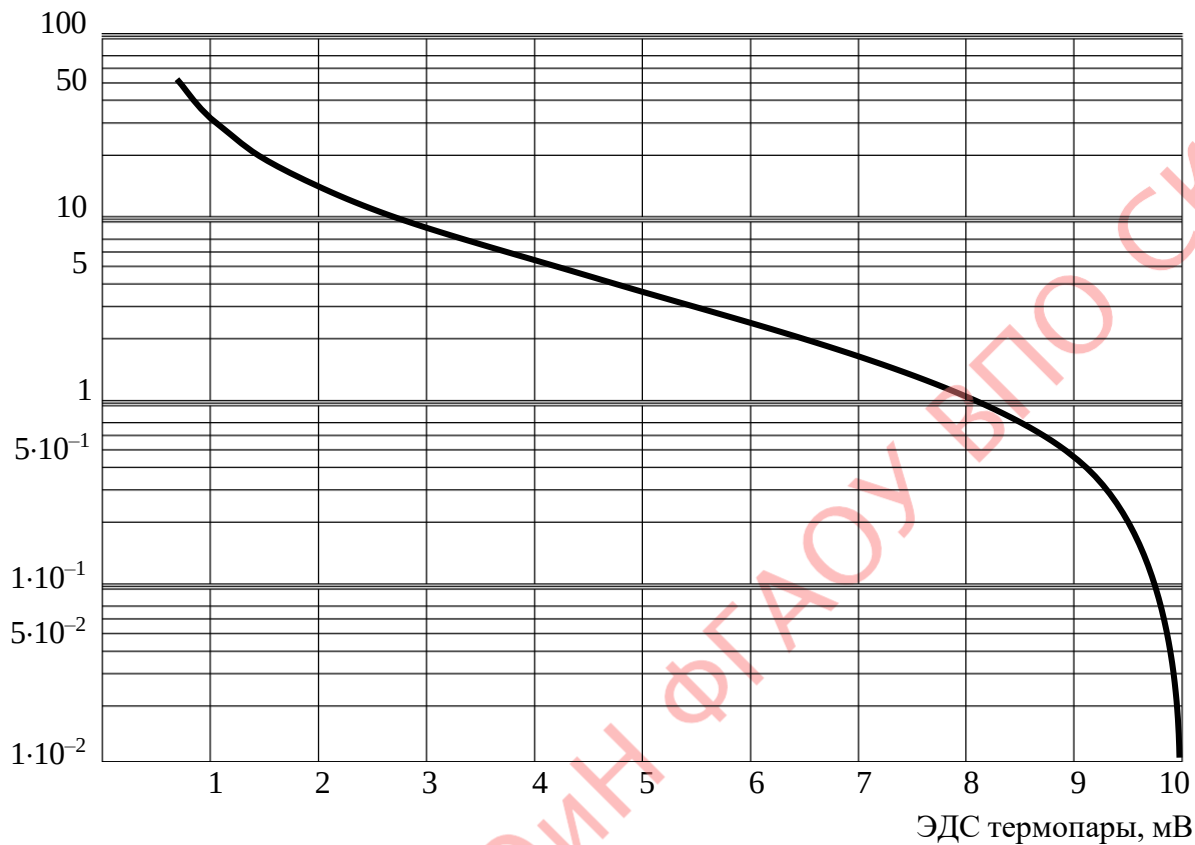
№	Наименование прибора	Пределы измерений	Погрешность

Принадлежности и материалы: _____

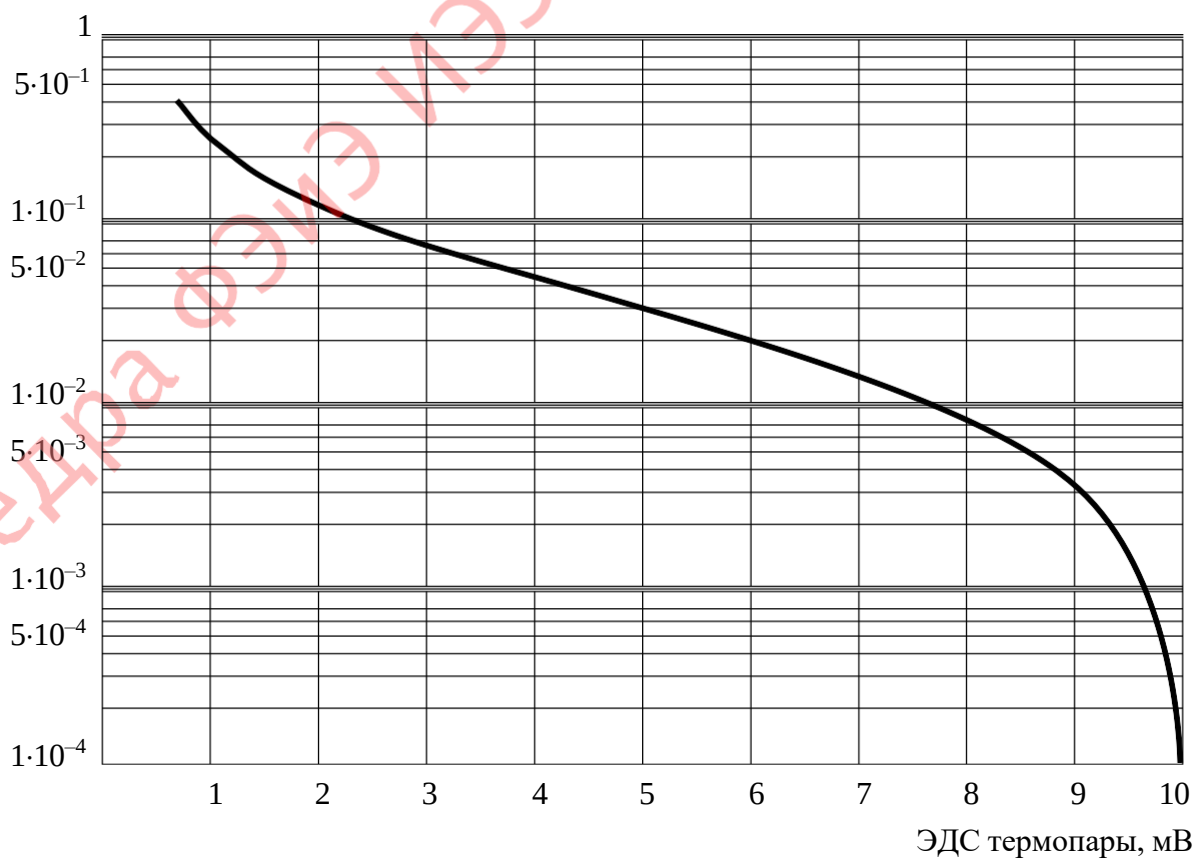
- Краткое теоретическое введение.
- Таблицы измерений.
- Расчет измеряемых величин.
- Оценка погрешностей.
- Результаты измерений, графики.
- Выводы.

Градуировочный график термопарного преобразователя ПМТ

Давление, Па



Давление, мм рт.ст.



СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА	4
СРЕДНЯЯ ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ	4
ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ	5
ДИФФУЗИЯ ГАЗОВ	7
ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГАЗОВ	8
ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ (ВЯЗКОСТЬ) ГАЗОВ	9
ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА В ЖИДКОСТЯХ	10
Лабораторная работа № 2.1	
Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса	12
Лабораторная работа № 2.2	
Определение коэффициента внутреннего трения и средней длины свободного пробега молекул воздуха	17
Лабораторная работа № 2.3	
Определение эффективного диаметра молекулы азота методом нагретой нити	24
Лабораторная работа № 2.4	
Физические основы вакуума	31
2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ ТЕРМОДИНАМИКИ	45
ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ	45
ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ. ЭНТРОПИЯ	52
Лабораторная работа № 2.5	
Исследование работы калориметра и определение теплоемкости воздуха при постоянном объеме	56
Лабораторная работа № 2.6	
Измерение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении	64
Лабораторная работа № 2.7	
Определение отношения теплоемкостей газов	71
Лабораторная работа № 2.8	

Определение изменения энтропии при кристаллизации олова	80
ЛИТЕРАТУРА	86
Приложение 1	87
Приложение 2	88

Кафедра ФЭиЭ ИЭЭиН ФГАОУ ВПО СКФУ