

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Кафедра физики

ФИЗИКА

МЕХАНИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

**Методические указания к лабораторным работам
№ 1-51, 1-61, 1-71
для бакалавров всех факультетов**

**Санкт-Петербург
2020**

УДК 53(07)
ББК 22.36 р
Ф 503

Физика. Механика и молекулярная физика: методические указания к лабораторным работам № 1-51, 1-61, 1-71 для бакалавров всех факультетов / сост.: В.О.Кабанов, М.Н.Полянский, Е.А.Яшкевич; ВШТЭ СПбГУПТД.- СПб., 2020. - 30 с.

Пособие содержит теоретический материал по темам и описание пяти лабораторных работ по механике. Предназначается для студентов всех специальностей дневной и заочной форм обучения.

Подготовлено и рекомендовано к печати кафедрой физики ВШТЭ СПбГУПТД (протокол № 2 от 25.09.2019 г.).

Утверждено к изданию методической комиссией института энергетики и автоматизации ВШТЭ СПбГУПТД (протокол № 1 от 04.10.2019 г.).

Подготовлено к изданию Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

и энергетики СПбГУПТД, 2020

ТЕМА 1-5. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Любое вещество состоит из молекул. Размер простых молекул - менее 1нм (1нм= 10^{-9} м). Масса простых молекул - порядка 10^{-25} – 10^{-26} кг. Для сравнения значений массы молекул используется также значение относительной молекулярной массы (о.м.м.) в атомных единицах массы (а.е.м.), 1 а.е.м. равна 1/12 массы атома изотопа углерода C^{12} .

Количество вещества ν пропорционально числу молекул вещества. *Моль* – это единица измерения количества вещества, и моль любого вещества содержит одно и то же число молекул N_A , называемое *числом Авогадро*, $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$. Масса моля μ любого вещества в граммах численно равна относительной молекулярной массе молекулы этого вещества в а.е.м. При расчетах в СИ масса моля должна быть выражена в кг/моль. Например, о.м.м. H_2O равна 18 а.е.м., следовательно, для воды $\mu = 18$ г/моль = $18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. Если вещество содержит молекулы разных типов, например, смесь газов, моль вещества определяется равенством числа молекул числу Авогадро при сохранении относительного содержания молекул разного типа.

Состояние некоторой массы m газа определяется значениями трех макроскопических параметров: давления P , объема V и температуры T . Давление равно отношению модуля силы, действующей перпендикулярно поверхности, к площади поверхности S : $P=F/S$. Давление в СИ измеряется в паскалях, 1Па = 1Н/м 2 . Часто используются внесистемные единицы давления: миллиметр ртутного столба (1мм рт. ст. =133,3 Па) и атмосфера (1атм =760 мм рт. ст.=1,0110 5 Па). T – абсолютная температура (температура T по шкале Кельвина связана с температурой t , по шкале Цельсия $T =t+273$). Эти три параметра связаны друг с другом, так что изменение одного из них влечет за собой изменение других. Соотношение, отражающее связь между

параметрами состояния какого-либо тела, называется уравнением состояния этого тела. Наиболее простым является уравнение состояния идеального газа – уравнение Клапейрона – Менделеева.

Идеальный газ – это модель газа, в рамках которой считается, что молекулы являются материальными точками и потенциальной энергией взаимодействия молекул можно пренебречь. Идеальный газ строго подчиняется эмпирическим газовым законам: законам Бойля-Мариотта, Шарля и Гей-Люссака. Из этих законов следует уравнение Клапейрона - Менделеева:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT, \quad (1)$$

где R - универсальная газовая постоянная, μ – молярная масса, т.е. масса одного моля вещества, $m/\mu = \nu$ – количество вещества или число молей.

Приняв во внимание, что $\nu = m/\mu = N / N_A$, преобразуем уравнение (1) к виду:

$$P = \frac{N}{V} \frac{R}{N_A} T, \quad (2)$$

$n = N/V$ - концентрация, т.е. число молекул в единице объема газа.
 $k = R/N_A$ - постоянная Больцмана. Тогда уравнение (2) примет вид:

$$P = nkT. \quad (3)$$

Молекулярно-кинетическая теория объясняет наблюдаемое макроскопическое поведение вещества исходя из законов поведения отдельных молекул. Газ ведет себя как идеальный, если расстояние между молекулами много больше размеров молекул и если они взаимодействуют только в момент удара. Между столкновениями молекулы движутся равномерно и прямолинейно. Каждая молекула газа испытывает за одну секунду миллиарды столкновений с другими молекулами и поэтому движется хаотически.

Молекулы реальных газов имеют конечные размеры, взаимодействие их друг с другом происходит с силами, убывающими с увеличением расстояния между молекулами. По мере уменьшения плотности газа средние расстояния между

молекулами становятся больше, а силы взаимодействия молекул друг с другом - меньше. Таким образом, всякий реальный газ по мере убывания его плотности все больше приближается по свойствам к идеальному газу.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории (4) объясняет давление газа через средние характеристики движения молекул. Давление обусловлено ударами молекул о стенки. При каждом ударе молекула передает импульс стенке. Чем больше импульс молекулы и чем чаще они ударяются о стенку, тем больше давление. В результате давление идеального газа оказывается пропорциональным концентрации молекул и среднему значению квадрата скорости:

$$P = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2} = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon}_{\text{пост}}, \quad (4)$$

где m_0 - масса молекулы, а $\bar{\varepsilon}_{\text{пост}} = \overline{\frac{m_0 v^2}{2}}$ - средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа.

$v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} v_i^2}$ называется средней квадратичной скоростью.

Сравнивая (4) и (3), видим, что (4) совпадает с уравнением состояния идеального газа, если принять

$$\bar{\varepsilon}_{\text{пост}} = \frac{3}{2} k T \quad (5)$$

Таким образом, абсолютная температура характеризует среднюю кинетическую энергию хаотического теплового движения молекул. При абсолютном нуле тепловое движение прекращается, но другие виды движения остаются. Отсюда также видно, что всегда $T \geq 0$, так как кинетическая энергия не может быть отрицательной.

Из сравнения (4) и (3) также находим средне-квадратичную скорость молекул:

$$v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}, \quad (6)$$

где учтено, что $R=k \cdot N_A$ и $\mu=m_0 \cdot N_A$.

Вопросы и задачи

1. При каких условиях реальный газ по своим свойствам приближается к идеальному?
2. Как изменится давление идеального газа в сосуде, если из него выйдет треть массы газа, а температура повысится вдвое?
3. В баллоне емкостью 83 л находится воздух при температуре 17°C и давлении 100 кПа. Какую массу воздуха выпустили из баллона, если давление в нем понизилось на 20 кПа? Температура стала 260°K .
4. Чему равна плотность водорода при температуре 0°C и давлении 380 мм рт. ст.?
5. В сосуде объемом 10 л находится газ при 0°C . Сколько молекул газа в сосуде?
6. Состояние газа изображается некоторой точкой на P-V диаграмме. Начертите график изменения состояния газа, который сначала нагревают при постоянном давлении, а затем охлаждают при постоянном объеме.
7. Масса молекулы газа $3.3 \cdot 10^{-27}$ кг, средняя скорость молекул 1000 м/с. Площадь стенки 5 см^2 . Найдите давление газа, если о стенку ударяется $6 \cdot 10^{24}$ молекул.
8. Определите число молекул в 1 см^3 газа при температуре 0°C и давлении 760 мм рт. ст.
9. Определите среднюю квадратичную скорость молекул газа, плотность которого при давлении 375 мм рт. ст. равна $3,75 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$.
10. Как изменится давление газа, если концентрацию его молекул увеличить в три раза, а среднюю квадратичную скорость молекул уменьшить в три раза?
11. В сосуде находится смесь трех газов – гелия (He), кислорода (O_2) и водяного пара (H_2O) при температуре T. Сравните значения

кинетической энергии молекул газов, их средней квадратичной скорости.

12. При какой температуре молекулы гелия имеют такую же среднюю квадратичную скорость, как молекулы водорода при 27 °С?

13. Сколько молей содержится в смеси 56 г азота и 10 г гелия. Найдите массу одного моля этой смеси.

14. Найдите массу моля смеси газов, содержащей два моля водорода и четыре моля кислорода.

Лабораторная работа № 1-51

Определение молярной массы и плотности воздуха

Цель работы – измерение молярной массы воздуха, расчет плотности воздуха и среднеквадратичной скорости его молекул.

При условиях близких к нормальным ($T=273$ К, $P=1\cdot 10^5$ Па) воздух можно с достаточной точностью считать идеальным газом. Состояние такого газа описывается уравнением Менделеева-Клапейрона (1):

$$PV = \frac{m}{\mu} RT$$

Из уравнения (1) можно рассчитать молярную массу газа:

$$\mu = \frac{mRT}{PV} \quad (7)$$

Измерение давления P , объема V , температуры T , входящих в формулу (2), не вызывает затруднений, но определение массы газа выполнить практически невозможно, так как взвешивание газа возможно только вместе с колбой, в которой он находится.

Поэтому для определения μ необходимо исключить массу сосуда. Это можно сделать, измерив значение массы m_1 и m_2 газа в том же объеме, при неизменной температуре и разном давлении.

Пусть в колбе объемом V находится газ массой m_1 при давлении P_1 и температуре T . Эти параметры связаны уравнением состояния:

$$P_1 V = \frac{m_1}{\mu} RT \quad . \quad (8)$$

Откачаем часть газа из колбы, не меняя его температуры. После откачки масса оставшегося в колбе газа и его давление уменьшились. Обозначим их соответственно m_2 и P_2 и снова запишем уравнение состояния:

$$P_2 V = \frac{m_2}{\mu} RT \quad . \quad (9)$$

Из уравнений (7) и (8) получим:

$$\mu = \frac{(m_1 - m_2) RT}{(P_1 - P_2) V} \quad . \quad (10)$$

Полученная формула (10) позволяет определить молярную массу газа μ , если известны его объем и температура, изменение массы газа при изменении его давления.

Если известна молярная масса газа, то можно легко определить еще одну его характеристику – плотность. Плотность газа – это масса единицы объема газа:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad . \quad (11)$$

Подставив $m = \rho \cdot V$ в уравнение Менделеева -Клапейрона, получим:

$$\rho = \frac{P \mu}{RT} \quad . \quad (12)$$

Плотность воздуха можно вычислить по формуле (12), подразумевая под μ молярную массу воздуха.

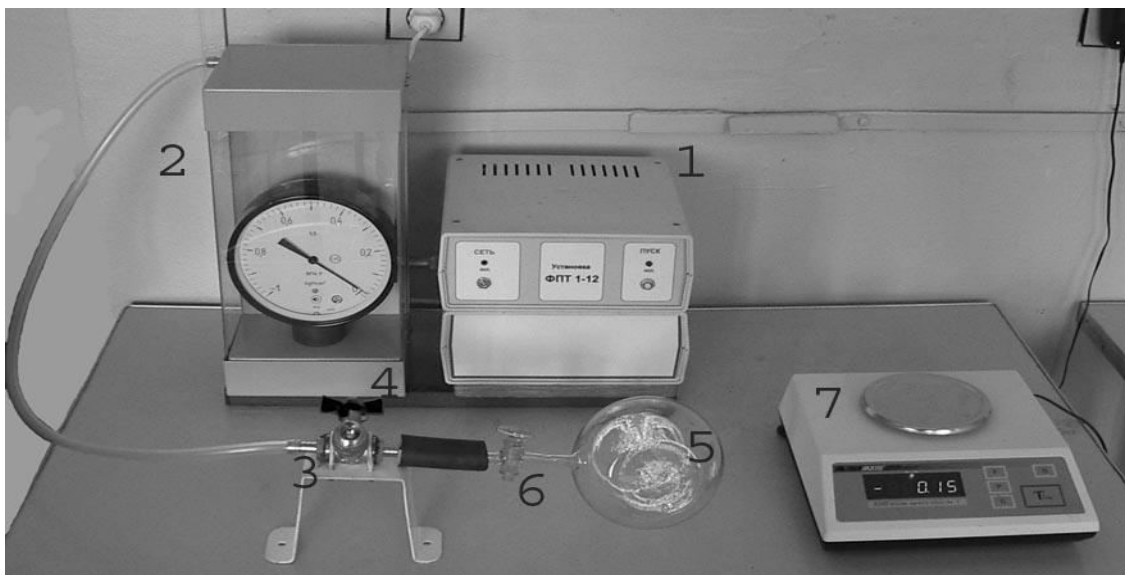
Для вычисления среднеквадратичной скорости \bar{U} молекул воздуха воспользуемся основным уравнением молекулярно кинетической

теории $p = \frac{1}{3} m_0 n \bar{U}^2$, где m_0 – масса одной молекулы газа, n – концентрация молекул. Учитывая, что $m_0 \cdot n = \rho$, получим

$$p = \frac{1}{3} \rho \bar{U}^2 . \quad (13)$$

Отсюда
$$\bar{U} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}} . \quad (14)$$

Описание установки



Установка состоит из компрессора 1, вакуумметра 2, тройника 3 с металлическим краном 4, колбы 5 известного объема со стеклянным краном 6 и весов 7. Компрессор служит для откачки воздуха из колбы. Вакуумметр (манометр) измеряет разность между давлением газа в лаборатории и давлением газа в колбе. Колба имеет стеклянный отросток с краном, который с помощью толстостенной резиновой трубки соединяется через тройник с компрессором и вакуумметром. Металлический кран предназначен для впуска воздуха в тройник перед отсоединением и взвешиванием колбы.

Порядок выполнения работы

1. Отсоединить колбу от резиновой трубки, открыть стеклянный кран и взвесить колбу на весах. Значение массы m_0 колбы с воздухом определяется один раз.

2. Подсоединить колбу к резиновой трубке (стеклянный кран 6 должен быть открыт), перекрыть металлический кран 4 и откачать из колбы часть воздуха с помощью компрессора, пока показание манометра не достигнет приблизительного значения 0.2.

3. Выждать 1-2 минуты, чтобы температура колбы сравнялась с комнатной, записать показания манометра Δp_i в графу таблицы, перекрыть стеклянный кран 6, открыть металлический кран 4, впустив в тройник воздух, отсоединить колбу от резиновой трубки и взвесить колбу. Записать массу m_i в табл. 1.

Таблица 1

	$m_0 =$ Г				$T =$		
	Δp_i атм	Δp_i кПа	m_i Г	Δm_i Г	μ Г/МОЛЬ	ρ КГ/М ³	\bar{U} М/С
1.							
2.							
3.							
...							

4. Прodelать измерения 4-5 раз, откачивая воздух в колбе до значений 0.4; 0.5; 0.6; 0.7 и 0.8 атм. Вычислить $\Delta m_i = m_0 - m_i$. Построить график зависимости $\Delta m_i = f(\Delta p_i)$ и убедиться в ее линейности.

5. Перевести давление в единицы системы СИ. Измерить температуру в помещении. Для каждого значения Δm_i вычислить молярную массу по формуле $\mu = \frac{\Delta m_i \cdot RT}{\Delta p_i \cdot V}$, и записать в табл. 2.

6. Вычислить среднее значение молярной массы воздуха и ее погрешность.

Таблица 2

№	μ_i г/моль	$\Delta\mu_i$	$(\Delta\mu_i)^2$	Погрешности и окончательный результат
1.				$S_\mu =$
2.				$\Delta\mu =$
...				
среднее		$S_\mu^2 =$		$\mu =$

7. Вычислить плотность по формуле (12) и среднеквадратичную скорость молекул воздуха по формуле (14) при нормальном атмосферном давлении и температуре в лаборатории. Рассчитать их погрешности по формулам для косвенных измерений.

ТЕМА 1-6. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Макроскопические тела обладают *внутренней энергией* U , равной сумме кинетической энергии хаотического движения молекул тела и потенциальной энергии взаимодействия всех молекул друг с другом. В общем случае внутренняя энергия тела является функцией термодинамических параметров – температуры и объема. В случае идеального газа, когда потенциальной энергией взаимодействия молекул друг с другом можно пренебречь, внутренняя энергия сводится лишь к сумме кинетической энергии теплового движения молекул и зависит только от температуры газа.

Из кинетической теории газа известно, что средняя кинетическая энергия молекулы газа зависит от его температуры T :

$$\bar{\varepsilon} = \frac{i}{2} kT, \quad (1)$$

где i – число степеней свободы рассматриваемого газа, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана. Число степеней свободы молекулы – это число независимых движений, которые может совершать молекула. Молекулы одноатомного газа (гелий, неон, аргон, пары металлов и др.), принимаемые за материальные точки, могут двигаться только поступательно, т.е. совершать три независимых движения вдоль трех координатных осей. Следовательно, они имеют три степени свободы ($i = 3$).

Молекулы многоатомных (более двух атомов) газов при комнатной температуре можно рассматривать как жесткие, и они имеют шесть степеней свободы ($i = 6$): три поступательных и три вращательных. Молекулы двухатомных газов, имеют пять степеней свободы ($i = 5$): три поступательных и две вращательных. У них отсутствует вращение вокруг оси, проходящей через образующие молекулу атомы. Вращение молекулы вокруг этой оси можно не учитывать.

Внутренняя энергия идеального газа равна произведению числа молекул газа N на среднюю кинетическую энергию молекулы (1):

$$U = N\bar{\varepsilon} = \frac{M}{\mu} N_A \frac{i}{2} kT = \frac{M}{\mu} \frac{i}{2} RT = \nu \frac{i}{2} RT, \quad (2)$$

где $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – число Авогадро; $\nu = M/\mu$ – число молей вещества; $R = N_A \cdot k = 8,31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная. Используя уравнение состояния идеального газа, можно выразить внутреннюю энергию через давление и объем газа:

$$U = \frac{i}{2} PV. \quad (3)$$

Установлено, что существуют два способа передачи энергии от одного тела другому: совершение работы и передача тепла. Работа совершается при перемещении тел под действием сил. Передача тепла происходит за счет хаотического движения молекул. Переданная этим способом энергия называется

количеством переданного тепла. В отличие от энергии, которая является функцией состояния системы, работа и количество тепла являются функцией процесса.

Первый закон термодинамики: количество тепла Q , сообщенное системе, идет на приращение внутренней энергии системы ΔU и на совершение системой работы A над внешними телами:

$$Q = \Delta U + A . \quad (4)$$

Приращение внутренней энергии $\Delta U = U_2 - U_1$, где U_1 и U_2 – начальное и конечное значения внутренней энергии системы.

Работа газа совершается только при изменении объема газа. Если объем меняется на малую величину ΔV , так что давление P при этом можно считать неизменным, работа

$$A = P\Delta V . \quad (5)$$

При конечных изменениях объема необходимо суммировать все значения работы при элементарных расширениях ΔV_i :

$$A = \sum_i A_i = \sum_i P_i \Delta V_i = \int_{V_1}^{V_2} P dV$$

Для расчета количества тепла Q используют удельные и молярные теплоемкости c и C :

$$Q = c \cdot M \cdot \Delta T = \mu \cdot C \cdot \Delta T \quad (6)$$

где C – удельная теплоемкость вещества – количество теплоты, которое требуется сообщить единице массы этого вещества для нагревания его на 1 К. В системе СИ удельная теплоемкость измеряется в Дж/кг·К. Молярная теплоемкость C равна количеству тепла, необходимому для нагревания одного моля вещества на 1 К:

$$C = \mu \cdot c , \quad (7)$$

где μ – молярная масса вещества. Размерность C Дж/моль К.

Теплоемкости зависят от условий нагревания газа. Обычно используют теплоемкость при постоянном объеме C_V и при постоянном давлении C_p .

При изохорном нагревании газа все подводимое к газу тепло расходуется на увеличение его внутренней энергии. При изобарическом нагревании ($P = \text{const}$ и $v = \text{const}$) газ расширяется и совершается работа против внешних сил, на что требуется дополнительное количество теплоты. Очевидно, что $c_p > c_v$, причем разность $c_p - c_v$ равна тому количеству теплоты, которое идет на работу расширения при изобарическом нагревании единицы массы газа на 1 К.

Применим первое начало термодинамики к различным процессам в идеальном газе.

1. *Изохорный процесс* ($V = \text{const}$, $v = \text{const}$). Так как $\Delta V = 0$, то $A = 0$. Первый закон термодинамики принимает вид:

$$\Delta Q = \Delta U = \frac{M}{\mu} \frac{i}{2} R \Delta T = \nu \frac{i}{2} R \Delta T \quad (8)$$

Из (6) и (7) следует, что молярная теплоемкость

$$c_v = \frac{\Delta Q}{\nu \Delta T} = \frac{i}{2} R \quad (9)$$

2. *Изобарный процесс* ($P = \text{const}$, $v = \text{const}$).

Работа газа при этом процессе

$$\Delta A = P \Delta V = \frac{M}{\mu} R \Delta T = \nu R \Delta T, \quad \text{где использовано}$$

уравнение состояния идеального газа.

Первый закон термодинамики принимает вид:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A = \nu c_v \Delta T + \nu R \Delta T = \nu (c_v + R) \Delta T \quad (10)$$

Отсюда молярная теплоемкость при постоянном давлении:

$$c_p = \frac{\Delta Q}{\nu \Delta T} = c_v + R \quad (11)$$

Выражение (11) называют уравнением Майера: оно показывает, что c_p всегда больше c_v на величину R . Таким образом, универсальная газовая постоянная равна работе расширения одного моля идеального газа при нагревании его на один градус при постоянном давлении. Из (8) и (11) получим:

$$c_p = \frac{i}{2} R + R = \frac{i+2}{2} R \quad (12)$$

3. *Изотермический процесс* ($T = \text{const}$). Так как $\Delta T = 0$, то согласно (2) внутренняя энергия системы не изменяется, т.е. $\Delta U = 0$, и из первого начала термодинамики следует, что

$$\Delta Q = A,$$

т.е. все количество теплоты, сообщаемое газу, расходуется на совершение работы против внешних сил.

Можно показать, что в этом случае

$$\Delta Q = A = \frac{M}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (13)$$

4. *Адиабатический процесс*. Адиабатическим процессом называется процесс, протекающий в газе без теплового обмена с окружающей средой ($Q=0$). Первое начало термодинамики для адиабатного процесса принимает вид: $A = -\Delta U$. При адиабатном процессе работа совершается за счет уменьшения внутренней энергии. Всякое быстрое сжатие или расширение газа, находящегося внутри некоторой плохо проводящей тепло оболочки, можно считать адиабатическим процессом. При адиабатическом расширении газ совершает работу против внешних сил и охлаждается, теряя свою внутреннюю энергию. При адиабатическом сжатии внешние силы совершают работу, и его внутренняя энергия увеличивается, следовательно, газ нагревается.

Выведем уравнение адиабаты. Запишем первое начало в дифференциальной форме: $dU = -dA$.

Используя (3) и (5), получим $\frac{i}{2} PdV + \frac{i}{2} VdP = -PdV$, или

$$\frac{i+2}{2} PdV + \frac{i}{2} VdP = 0. \quad (14)$$

Отсюда

$$\gamma PdV + VdP = 0,$$

где величина $\gamma = c_p/c_v = (i+2)/i$ называется *показателем адиабаты*.

Разделим обе части уравнения на $p \cdot V$.
Получим

$$\gamma \frac{dV}{V} + \frac{dp}{p} = 0$$

Проинтегрируем обе части уравнения и получим:

$$\begin{aligned} \gamma \cdot \ln V + \ln p &= \text{const} \\ \ln (p \cdot V^\gamma) &= \text{const} \\ PV^\gamma &= \text{const.} \end{aligned} \quad (15)$$

Полученное уравнение называется уравнением Пуассона. Величина γ зависит от структуры молекулы газа, то есть от числа атомов, входящих в молекулу газа.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1 – 61

Определение отношения теплоемкости воздуха при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме

Цель работы. Целью данной работы является определение показателя адиабаты $\gamma = C_p/C_v$ методом Клемана и Дезорма, основанным на использовании адиабатического процесса сжатия и расширения воздуха.

Описание установки

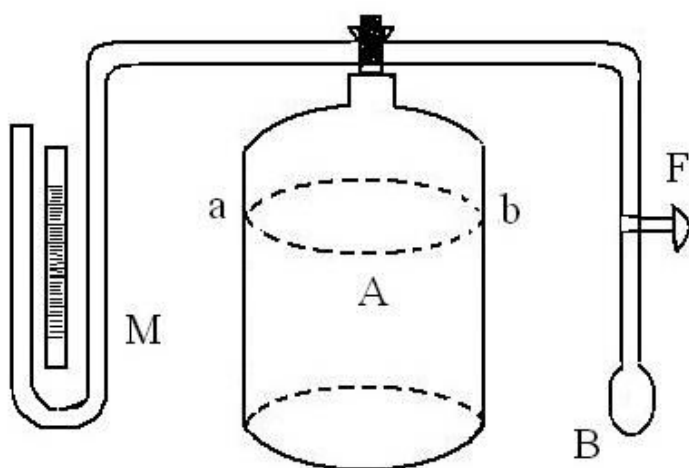


Рис. 1

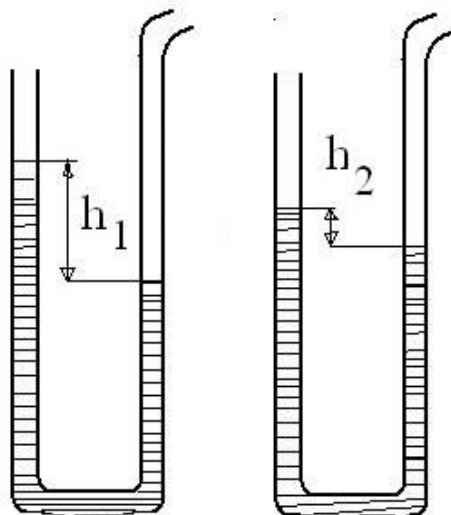


Рис. 2

Обычно установка состоит из большого баллона (рис.1), закрытого пробкой, который соединен с резиновой грушей В. При помощи груши в баллон накачивают воздух до некоторого давления $P=P_0 +h_1$, где P_0 – атмосферное давление, h_1 - избыточное давление, измеряемое водяным манометром М по разности уровней воды в коленях манометра.

Пусть воздух в баллоне находится под давлением $P_1=P_0+h_1$. Откроем пробку на короткое время и снова закроем. При этом воздух адиабатически расширяется и охлаждается ниже комнатной температуры. Постепенно воздух в закрытом баллоне нагревается, и давление в баллоне растет. Когда воздух прогреется до комнатной температуры, давление перестанет изменяться. Обозначим это давление $P_2=P_0+h_2$.

Вывод расчетной формулы. Найдем связь между h_1 и h_2 . Работа газа при адиабатическом расширении $dA_1=- dU_1$, где dU_1 - изменение внутренней энергии газа. Для адиабатического процесса, используя уравнение (14) и формулу для давления $dP_1=\rho gh_1$, получим:

$$dA_1 = PdV_1 = \frac{i}{i+2} VdP_1 = \frac{i}{i+2} V\rho gh_1 \quad . \quad (17)$$

Из уравнения (3) следует, что изменение внутренней энергии при изохорном процессе

$$dU_2 = \frac{i}{2} VdP_2 = \frac{i}{2} V\rho gh_2 \quad . \quad (18)$$

Так как изменение температуры при адиабатном расширении и последующем изохорном нагреве одинаково, то и абсолютные величины изменений внутренней энергии одинаковы, т.е.

$$dU_2 = -dU_1 = dA_1 \quad . \quad (19)$$

Подставляя (17) и (18) в (19), получим

$$\frac{i}{i+2} V\rho gh_1 = \frac{i}{2} V\rho gh_2 ,$$

Отсюда получаем $i+2 = 2 h_1/h_2$ и $i = 2(h_1-h_2)/h_2$. После подстановки в выражение для γ получаем:

$$\gamma = \frac{i + 2}{i} = \frac{h_1}{h_1 - h_2} = 1 + \frac{h_2}{h_1 - h_2} \quad (20)$$

Расчетная формула (20) позволяет найти γ по измеренным значениям h_1 и h_2 .

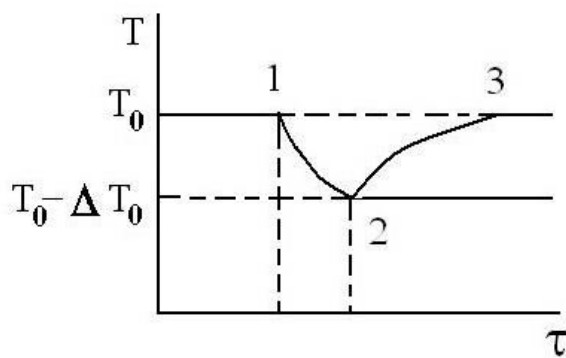


Рис. 3

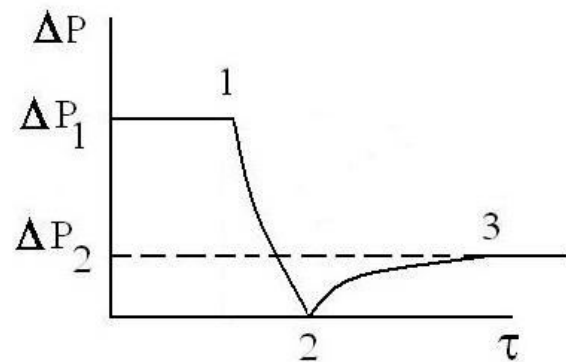


Рис. 4

На рис.3 и 4 показано изменение температуры и давления в

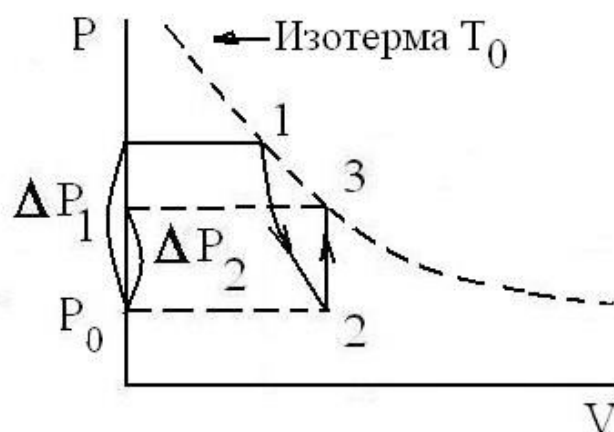


Рис. 5

баллоне в зависимости от времени τ . Участок 1-2 на этих графиках соответствуют адиабатическому расширению газа при открывании пробки, а участок 2-3 - изохорическому нагреванию.

На рис.5 представлена P-V диаграмма процессов в баллоне, где 1-2 соответствует адиабатическому расширению, а 2-3 - изохорическому нагреванию газа.

Порядок выполнения работы

В лабораторной установке баллон находится внутри корпуса,



Рис. 6

вместо пробки установлен клапан, вместо груши – компрессор (рис.6).

1. При закрытом клапане осторожно накачивают компрессором воздух в баллон до тех пор, пока разность уровней жидкости в манометре не будет равна 120-180 мм.

2. После этого выжидают некоторое время (приблизительно 3 минуты), в течение которого нагретый при сжатии воздух в сосуде примет комнатную температуру и уровни жидкости в манометре перестанут изменяться.

Записывают показания h_1' , h_1'' в левом и правом коленах манометра, тогда

$$h_1 = h_1' - h_1'' \quad (\text{см. рис. 2}).$$

3. Затем на 0,5-1с открывают

клапан и снова закрывают его (сразу после закрытия клапана разность уровней в манометре должна быть близка к нулю и быстро возрастет). Расширяясь, воздух в сосуде А охладился. Снова нужно выждать некоторое время (3-5 мин.), в течение которого воздух в сосуде прогреется и примет комнатную температуру. После этого вторично отсчитывают и записывают уровни жидкости в коленах манометра h_2' и h_2'' , тогда $h_2 = h_2' - h_2''$. Опыт производится 5-7 раз, и каждый раз вычисляется γ . Результаты измерений заносят в табл.1.

Таблица 1

№ измер.	Измеряемые величины						
	h_1' мм	h_1'' мм	$h_1 = h_1' - h_1''$ мм	h_2' мм	h_2'' мм	$h_2 = h_2' - h_2''$ мм	γ
1							
2							
3							
...							

Погрешность γ определяется как при многократных косвенных измерениях, для чего заполняется табл. 2. Величину систематической ошибки считают равной нулю.

Таблица 2

№ измер.	γ_i	$\Delta\gamma_i$	$(\Delta\gamma_i)^2$	Погрешность и результат
1				$S_{\gamma} =$
2				
...				
Среднее		$S_{\gamma}^2 =$		$\gamma =$

Вопросы и задачи

1. Внутренняя энергия кислорода в сосуде - 2000 Дж. Чему равна энергия вращательного движения всех молекул в сосуде?

Чему будет равна внутренняя энергия той же массы углекислого газа при той же температуре?

2. Найдите внутреннюю энергию смеси газов в сосуде, содержащей $2 \cdot 10^{23}$ молекул азота и 2 г гелия. Средняя кинетическая энергия одной молекулы гелия $6,0 \cdot 10^{-21}$ Дж.

3. В сосуде содержатся 3 моля озона O_3 с внутренней энергией 6000 Дж. Через некоторое время весь озон превратился в кислород при той же температуре. Найдите его внутреннюю энергию.

4. Двум молям азота сообщили 3000 Дж тепла, и газ, расширяясь совершил работу 1500 Дж. Насколько при этом нагрелся газ?

5. 0,6 кг смеси газов изобарно нагрели на 20 К. Удельная теплоемкость этой смеси газов $c_v=600$ Дж/Кг·К и $c_p=600$ Дж/Кг·К. Найдите работу, совершенную газом.

6. Два моля азота изобарно нагрели на 60 К. Найдите количество тепла, сообщенное газу, и работу газа. Какое количество тепла надо сообщить газу при изохорном нагреве до той же температуры.

7. Найдите молярную теплоемкость 2 молей смеси газов, если при его нагреве на 40 К его внутренняя энергия увеличилась на 1700 Дж и он совершил работу 500 Дж.

8. Укажите, для каких процессов выполняются равенства:

1) $Q=\Delta U$, 2) $A=p\Delta V$, 3) $\Delta U+A=0$, 4) $Q=A$.

9. Газ, находящийся при давлении 2 атм. в объеме 20 л, адиабатно расширяется до объема 30 л, и его давление падает при этом до 1,13 атм. Найдите работу, совершенную газом.

10. На сколько градусов нагреются 2 моля CO_2 при адиабатном сжатии, если работа сжатия - 1000 Дж.

11. Воздух, занимающий объем 200 л под давлением 1 атм, адиабатно сжали до объема 197 л. Найдите конечное давление.

12. При изотермическом расширении вдвое воздух совершил работу 600 Дж. Какую работу он совершит при адиабатном расширении вдвое?

13. 160 г кислорода нагрели на 20 °С. При этом газ совершил работу 1000 Дж. Найдите удельную и молярную теплоемкость газа при этих условиях.

14. При адиабатном сжатии двух молей газа совершена работа 831 Дж, и газ нагрелся на 20 °С. Найдите показатель адиабаты, и молярные теплоемкости при постоянном объеме и давлении.

ТЕМА 1-7. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА

Явления переноса - это процессы установления равновесия в системе путем переноса вещества (диффузия), энергии (теплопроводность) и импульса молекул (внутреннее трение, или вязкость). Все эти явления обусловлены тепловым движением молекул. Явления переноса возникают в неоднородных средах, характеристики которых (концентрация, температура, скорость движения среды) различны в разных точках пространства.

Примем, что характеристики среды изменяются только в одном направлении, совпадающем с осью X , а в направлении осей Y и Z они не изменяются.

Диффузия – это перенос вещества в средах с неоднородной концентрацией. Например: если концентрация паров воды около поверхности озера больше чем вверху, то возникает перенос молекул воды снизу вверх. Наиболее быстро диффузия происходит в газах, более медленно - в жидкостях. В большинстве твердых тел при комнатной температуре диффузия едва заметна, но при нагревании ее скорость резко возрастает. При нагревании скорость диффузии растет также в газах и жидкостях, но не так быстро.

Пусть концентрация некоторого вещества $c(x)$ в смеси зависит от x . Тогда возникает поток данного вещества в направлении убывания его концентрации:

$$dm = -D \frac{dc}{dx} S dt, \quad (1)$$

где dm - масса данного вещества переносимого через площадку площадью S , перпендикулярную оси X , за время dt . Производная dc/dx называется градиентом концентрации. Знак “минус”

означает, что масса переносится в направлении убывания концентрации. Масса, переносимая за единицу времени называется *потоком массы*. D – коэффициент диффузии – зависит от рода вещества, температуры и давления. Концентрация вещества здесь измеряется в $\text{кг}/\text{м}^3$. Размерность D равна $\text{м}^2/\text{с}$.

Уравнение (1) называется *законом Фика: поток массы пропорционален площади и градиенту концентрации*.

Диффузия обусловлена переходом молекул из одного слоя в другой за счет теплового хаотического движения.

Теплопроводность – это перенос тепла в средах с неоднородной температурой. Пусть $T(x)$ зависит от x . Тогда возникает поток тепла в направлении оси X .

$$dQ = -\chi \frac{dT}{dx} S dt, \quad (2)$$

где dQ – количество тепла, переносимого в направлении оси X через площадку S за время dt ; dQ/dt называется потоком тепла.

χ (греческая буква ‘кси’) – коэффициент теплопроводности среды, зависящий от материала, температуры и давления. Его размерность $\text{Дж}/\text{м}\cdot\text{с}\cdot\text{К} = \text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$. Уравнение (2) называется *законом Фурье, поток тепла пропорционален градиенту температуры и площади*.

В газах теплопроводность обусловлена переходом молекул из горячего слоя в более холодный слой. В жидкостях и твердых телах передача тепла происходит за счет передачи энергии хаотического движения при столкновении молекул горячего слоя с молекулами соседнего более холодного слоя.

Вязкость – это явление возникновения сил трения между слоями жидкости или газа, текущими с разными скоростями. Силы трения стремятся замедлить более быстрый слой и ускорить более медленный.

$$F = -\eta \frac{dV}{dx} S, \quad (3)$$

Здесь F – сила трения, V – скорость слоев, S – площадь соприкосновения слоев. Ось X направлена перпендикулярно скорости движения слоев. Производная dV/dx называется

градиентом скорости. Уравнение (3) называется *законом Ньютона* для вязкости, *сила трения пропорциональна градиенту скорости и площади соприкосновения слоев*. η (греческая буква ‘эта’) - коэффициент вязкости, зависящий от среды, температуры и давления. Его размерность $\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2 = \text{кг}/\text{м}\cdot\text{с}$.

В жидкостях вязкость (внутреннее трение) обусловлено силами взаимодействия между молекулами. При повышении температуры влияние сил взаимодействия уменьшается, и вязкость жидкости также очень быстро уменьшается. В твердых телах также существует внутреннее трение, но оно маскируется упругими силами. При деформации реальных твердых тел возникают упругие силы, зависящие от величины деформации, и силы внутреннего трения, зависящие от скорости деформации.

В газах механизм вязкости другой, и их вязкость при нагревании увеличивается. Вязкость газов обусловлена переходом молекул газа из одного слоя в другой. При этом происходит перенос импульса направленного движения молекул от более быстрого слоя к более медленному.

$$dk = -\eta \frac{dV}{dx} S dt, \quad (4)$$

где dk - импульс, переносимый за время dt . Перенос импульса приводит по второму закону Ньютона к появлению силы $F = dk/dt$, которая удовлетворяет уравнению (3). С повышением температуры газа растет скорость хаотического движения молекул, и молекулы чаще перелетают из одного слоя в другой. Это приводит к увеличению вязкости газов. Но рост вязкости газов при нагревании сравнительно медленный, она растет пропорционально корню из абсолютной температуры.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1-71

Определение коэффициента вязкости воздуха капиллярным методом

Цель работы - изучение внутреннего трения воздуха и измерение коэффициента вязкости воздуха.

Явление вязкости в жидкостях и газах приводит к появлению сил сопротивления при движении тел и при протекании жидкостей и газов в трубах. Например, в случае протекания жидкости или газа в цилиндрической трубе (капилляре) при малых скоростях потока течение является ламинарным, т.е. поток газа движется отдельными цилиндрическими слоями, которые не смешиваются между собой. Скорость слоя зависит от радиальной координаты. Слой, примыкающий к поверхности трубы, имеет нулевую скорость, а на оси трубы скорость максимальна. Между слоями возникают силы внутреннего трения, равнодействующая которых дает силу сопротивления. Поэтому при протекании жидкостей и газов давление в трубе постепенно уменьшается в направлении движения, и между концами трубы возникает перепад давления. При ламинарном движении *объемный поток, т.е. объем жидкости или газа, переносимый за единицу времени, пропорционален перепаду давления*. Поток также зависит от диаметра и длины трубы. Найдем эту зависимость.

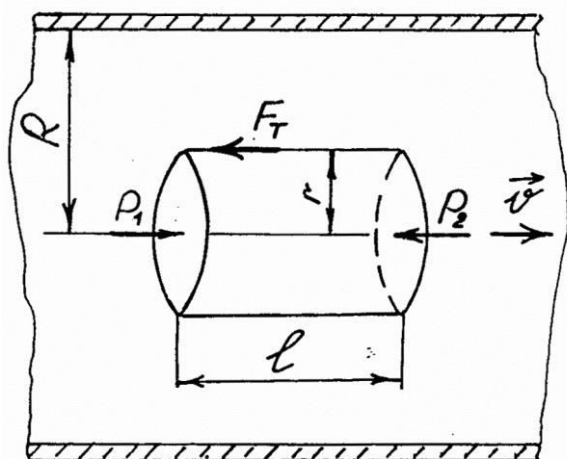


Рис. 1. Поток газа через
-капилляр

Выделим в капилляре воображаемый цилиндрический объем газа радиусом r и длиной l , как показано на рис. 1. Обозначим давление на его торцах - P_1 и P_2 . При установившемся течении скорости слоев не зависят от времени, и равнодействующая

сил давления на цилиндр $F = (P_1 - P_2) \cdot \pi r^2$ должна уравновеситься силой внутреннего трения F_T , которая действует на боковую поверхность цилиндра со стороны внешних слоев газа: $F - F_T = 0$.

Сила внутреннего трения определяется по формуле (3). Учитывая, что площадь поверхности цилиндра $S = 2\pi r \cdot l$, а скорость $V(r)$ уменьшается при удалении от оси трубы, т.е. $dv/dr < 0$, можно записать:

$$F_T = -\eta \frac{dv}{dr} 2\pi r l \quad .$$

В этом случае условие стационарности запишется в виде:

$$(P_1 - P_2)\pi r^2 + \eta \frac{dv}{dr} 2\pi r l = 0 \quad .$$

Интегрируя это равенство, получим:

$$v(r) = -\frac{P_1 - P_2}{4\eta l} r^2 + C \quad ,$$

где C - постоянная интегрирования, которая определяется граничными условиями задачи. Полагая, что при $r = R$ скорость газа равна нулю, получим окончательное выражение:

$$v(r) = -\frac{P_1 - P_2}{4\eta l} (R^2 - r^2) \quad .$$

Подсчитаем объемный поток газа Φ . Через кольцевую площадку с внутренним радиусом r и внешним $r + dr$ ежесекундно протекает объем газа $d\Phi = v dS = 2\pi r dr v(r)$. Тогда полный поток равен сумме (интегралу) элементарных потоков через все такие слои

$$\Phi = \int_0^R 2\pi r v(r) dr = \pi \frac{P_1 - P_2}{2\eta L} \int_0^R (R^2 - r^2) r dr$$

или
$$\Phi = \pi \frac{P_1 - P_2}{8\eta l} R^4 \quad .$$

Эту формулу Пуазейля можно использовать для экспериментального определения коэффициента вязкости газа:

$$\eta = \frac{\pi(P_1 - P_2)}{8\Phi L} R^4 .$$

Формула Пуазейля получена в предположении ламинарного течения газа или жидкости. С увеличением скорости потока движение становится турбулентным. При турбулентном движении скорость в каждой точке меняет свое значение и направление хаотически, сохраняется только среднее значение скорости. Характер движения жидкости или газа в трубе определяется числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{\langle V \rangle}{\eta} R\rho ,$$

где $\langle V \rangle$ - средняя скорость; ρ - плотность жидкости или газа.

В гладких цилиндрических каналах переход от ламинарного течения к турбулентному происходит при $Re \cong 1000$. Кроме этого, эксперимент необходимо проводить таким образом, чтобы сжимаемостью газа можно было пренебречь. Это возможно тогда, когда перепад давлений вдоль капилляра значительно меньше самого давления. В данной установке давление газа несколько больше атмосферного (10^3 см вод. ст.), а перепад давлений не более 10 см вод. ст., т.е. около 1% атмосферного.

Экспериментальная установка

Для определения коэффициента вязкости воздуха предназначена экспериментальная установка, общий вид которой изображен на рис. 2.

Воздух в капилляр 4 нагнетается микрокомпрессором, размещенным в блоке приборов 2. Объемный расход воздуха измеряется реометром 5, а нужное его значение устанавливается регулятором "воздух", который находится на передней панели блока приборов. Для измерения разности давлений воздуха на

концах капилляра предназначен U-образный водяной манометр
б.

Порядок выполнения работы

1. Убедитесь, что ручка регулятора «воздух» находится в крайнем левом положении, а тумблер «воздух» выключен.
2. Включите тумблер «сеть».
3. Включите тумблер «воздух».
4. Поворачивая регулятор «воздух», установите поток воздуха Q равный 2 – 3 делениям шкалы.

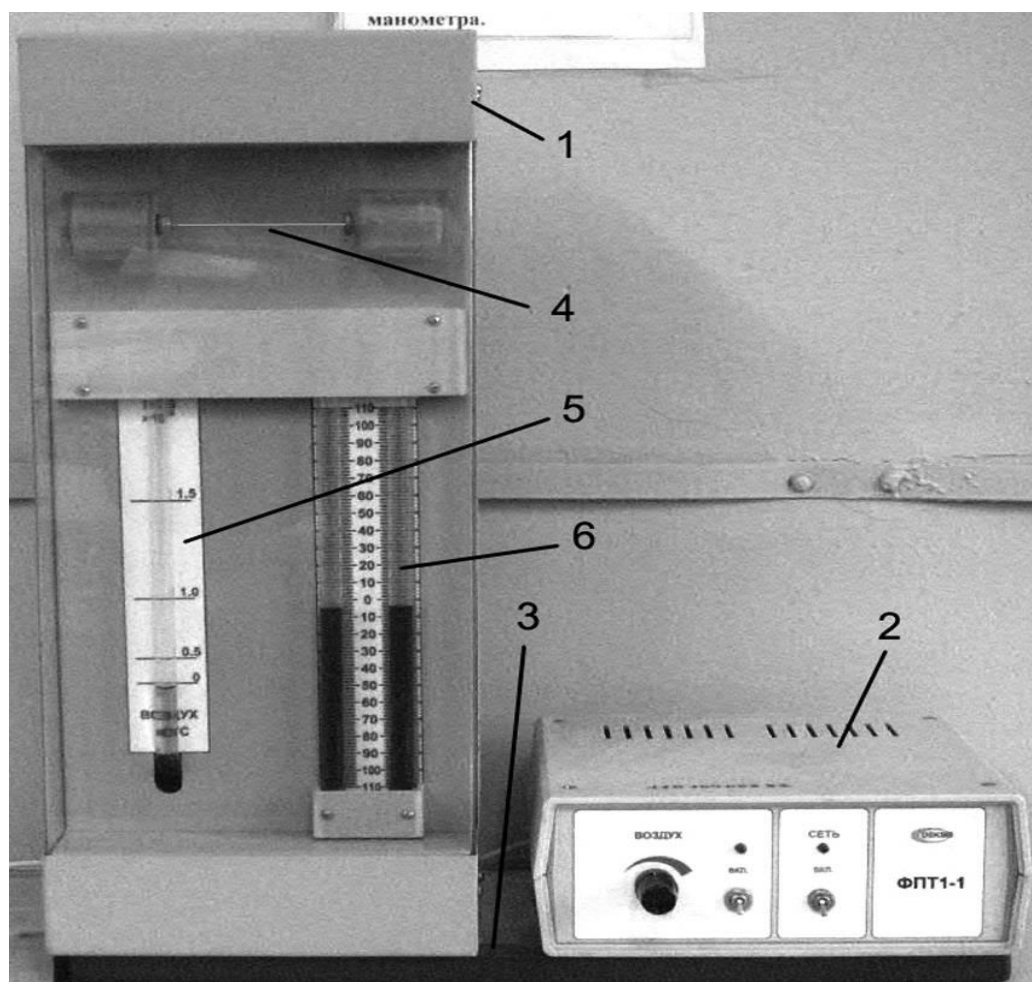


Рис. 2. - Общий вид установки: 1 - блок рабочего элемента; 2 - блок приборов; 3 - стойка; 4 - капилляр; 5 - реометр; 6 - манометр.

5. Снимите показания уровней жидкости h_1 и h_2 в левом и правом коленах водяного манометра и вычислите $h = h_1 - h_2$.
6. Занесите значения Φ и h в таблицу.
7. Повторите измерения по п.п. 4, 5 еще для четырех-пяти значений объемного расхода воздуха, увеличивая его на 2 – 3 деления шкалы. (ВНИМАНИЕ ! Увеличивая расход воздуха, следите за тем, чтобы вода оставалась в обоих коленах манометра).

№	Φ , $10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$	h_1 мм.	h_2 мм.	h мм.	ΔP Па	η Па·с	$\Delta \eta$	$\Delta \eta^2$
1								
2								
...								
ср.	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx		$S_{\eta}^2 =$	

$$S_{\eta}^2 =$$

$$S_{\eta} =$$

$$\eta =$$

8. Установите регулятор расхода воздуха в крайнее левое положение.
9. Выключите тумблер «воздух».
10. Выключите тумблер «сеть».

Обработка результатов измерений

Длина капилляра $L = 0,1$ метра. Диаметр капилляра $D = 0,85$ мм (более точные данные указаны на установке)

1. Рассчитайте ΔP по разности значений высоты водяного столба и занесите результаты в таблицу. Давление водяного столба $\Delta P = \rho gh$, где ρ - плотность воды, g - ускорение свободного падения для данной местности. Для Санкт-Петербурга $g = 9,82 \text{ м/с}^2$.

2. Для каждого измерения вычислите значение коэффициента вязкости воздуха:

$$\eta = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 \Phi L} = A \frac{\Delta P}{\Phi},$$

где величина $A = \frac{\pi R^4}{8L}$ одинакова для всех измерений, и ее можно вычислить один раз.

3. Вычислите среднее значение коэффициента вязкости и его погрешность.

4. Постройте график зависимости потока воздуха Φ от ΔP .

Библиографический список

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 т. Т.1. Механика.- М.: Лань, 2011.- 352 с.

2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Т. I. Механика.— М.: Физматлит, 2014.- 560 с.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

Тема 1-5. Основы молекулярно-кинетической теории	3
Лабораторная работа № 1-51. Определение молярной массы и плотности воздуха	7
Тема 1-6. Основы термодинамики	11
Лабораторная работа 1– 61. Определение отношения теплоемкости воздуха при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме	16
Тема 1 – 7. Явления переноса.	22
Лабораторная работа 1-71. Определение коэффициента вязкости воздуха капиллярным методом.	24
Библиографический список	30

Редактор и корректор В.А.Басова
Техн. редактор Л.Я.Титова

Темплан 2020 г.,поз.6

Подп. к печати 17.12.2019. Формат 60x84/16. Бумага тип.№ 1.
Печать офсетная. Объем 2,0 печ.л.; 2,0 уч.-изд.л.
Тираж 300 экз. Изд. № 6. Цена «С». Заказ

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД. 198095,
Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.