

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ»**

Ф И З И К А

МЕХАНИКА. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

**Учебно-методическое пособие к лабораторным
работам № 1-51, 1-61, 1-71, 1-72**

Для бакалавров всех факультетов

**Санкт-Петербург
2014**

УДК 53 (07)
ББК 22.343
Ф 503

Физика. Механика. Молекулярная физика: учебно-методическое пособие к лабораторным работам № 1 – 51, 1 – 61, 1 – 71, 1 – 72. /сост. В. О. Кабанов, В. М. Максимов, С.А. Поржецкий, М.Н. Полянский, В.И. Лейман, В.К.Козырев; СПб ГТУРП. – СПб., 2014. – 40 с.

Учебно-методическое пособие содержит лабораторные работы по разделам механики и молекулярной физики. Предназначено для бакалавров всех факультетов очной, очно-заочной и заочной форм обучения.

Рецензент: кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры физики
СПб ГТУРП А.А Абрамович.

Подготовлено и рекомендовано к печати кафедрой физики СПб ГТУРП (протокол № 2 от 17 сентября 2014 г.).

Утверждено к изданию методической комиссией факультета АСУ ТП СПб ГТУРП (протокол № 2 от 17 сентября 2014г.).

Редактор и корректор Т.А Смирнова
Техн. редактор Л.Я.Титова

Темплан 2014 г., поз. 94

Подп. к печати 13.10.14. Формат 60x84/16. Бумага тип. №1

Печать офсетная. Объем 2,5 печ. л., 2,5 уч.- изд. л.

Тираж 300 экз. Изд. № 94. Цена «С». Заказ

Ризограф Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров.

198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.

© Санкт-Петербургский государственный
технологический университет
растительных полимеров, 2014

ТЕМА 1-5. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Любое вещество состоит из молекул. Размеры простых молекул менее 1 нм ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$). Массы молекул порядка 10^{-25} - 10^{-26} кг. Для сравнения масс молекул используется также относительная молекулярная масса (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, следовательно, моль любого вещества содержит одно и то же число молекул N_A , называемое числом Авогадро, $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$. Масса моля μ любого вещества в г численно равна относительной молекулярной массе молекул вещества в а.е.м. При расчетах в СИ масса моля должна быть выражена в кг/моль. Например: о.м.м. H_2O 18 а.е.м., следовательно для воды $\mu = 18 \text{ г/моль} = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$. Если вещество содержит молекулы разного типа, например смесь газов, моль вещества по-прежнему 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, $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$. Часто используются внесистемные единицы давления: миллиметр ртутного столба ($1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па}$) и атмосфера ($1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$). T – абсолютная температура (температура T по шкале Кельвина связана с температурой t , по шкале Цельсия $T = t + 273$). Эти параметры связаны друг с другом, так что изменение одного из них влечет за собой изменение других. Соотношение, дающее связь между параметрами состояния какого-либо тела, называется уравнением состояния этого тела. Наиболее простым яв-

ляется уравнение состояния идеального газа – уравнение Клапейрона – Менделеева.

Идеальный газ – это газ, который 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. Уравнение Клапейрона - Менделеева выполняется и для смеси идеальных газов.

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 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

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

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

$v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\overline{v^2}}$ называется средней квадратичной скоростью.

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

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

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

Из сравнения (4) и (3) также находим среднеквадратичную скорость молекул

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

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 давлении 1,2 атм. и температуре 0°C . Сколько молекул газа в сосуде?
6. Состояние газа изображается некоторой точкой на P-V диаграмме. Начертить график изменения состояния газа, если сначала газ 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 каждую секунду ударяется $6 \cdot 10^{24}$ молекул.
8. Определить число молекул в 1 см^3 газа при температуре 0°C и давлении 720 мм рт. ст.
9. Определить 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 3 раза, а среднюю квадратичную скорость молекул уменьшить в 3 раза?
11. В сосуде находится смесь трех газов – гелия (He), кислорода (O_2) и водяного пара (H_2O) при температуре T. Сравните кинетические энергии молекул газов, их средние квадратичные скорости.
12. При какой температуре молекулы гелия имеют такую же среднюю квадратичную скорость, как молекулы водорода при 27°C ?

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 2 моля водорода и 4 моля кислорода.

Лабораторная работа 1-51

Определение молярной масса и плотности воздуха

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

При условиях, близких к нормальным ($T=0^{\circ}\text{C}$, $P=1\text{атм}$), 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 массы m_1 и m_2 газа в том же объеме, при неизменной температуре и разных давлениях.

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

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

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

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

Из уравнений (7) и (8) получим

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

Полученная формула (10) позволяет определить молярную газа массу μ , если известны его объем, температура и 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

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

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

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

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

Для вычисления среднеквадратичной скорости $v_{\text{ср.кв.}}$ молекул воздуха воспользуемся основным уравнением молекулярно кинети-

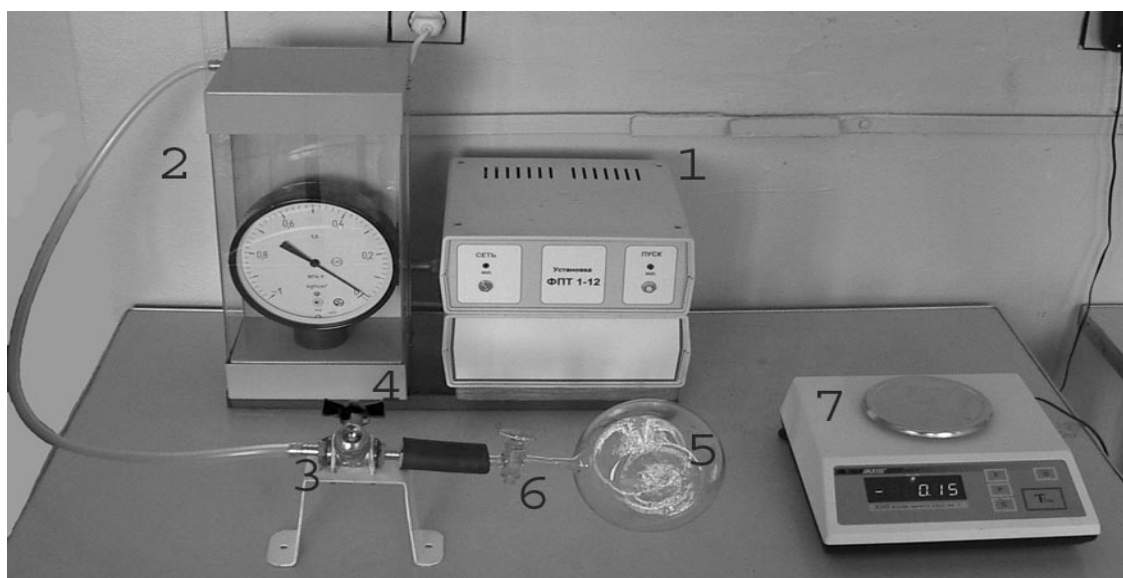
ческой теории $p = \frac{1}{3} m_0 n v_{\text{ср.кв.}}^2$, где m_0 – масса одной молекулы газа, n – концентрация молекул. Учитывая, что $m_0 \cdot n = \rho$, получим

$$p = \frac{1}{3} \rho v_{\text{ср.кв.}}^2 \quad (13)$$

Отсюда

$$v_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}} \quad (14)$$

Описание лабораторной 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 измеряет разность между давлением газа в лаборатории и давлением газа в колбе. Колба имеет стеклянный отро-сток 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, впуская в тройник воздух, отсоединить колбу от резиновой трубки и взвесить колбу. Записать массу m_1 в таблицу 1.

Таблица 1

№ п/п	m_0				T		
	Δp_i атм	Δp_i кПа	m_i г	Δm_i г	μ г/моль	ρ кг/м ³	$v_{\text{ср.кв.}}$ м/с
1							
2							
3							
...							

4. Прodelать измерения еще 4-5 раз, откачивая воздух в колбе до значений около 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. Определить температуру в помещении. Для каждого значения Δm_i вычислить молярную массу по формуле (10), и записать в таблицу 2.

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

Таблица 2

№ п/п	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 кинетических энергий хаотического движения молекул тела и потенциальных энергий взаимодействия всех молекул друг с другом. В общем случае внутренняя энергия тела является функцией термодинамических параметров – температуры и объема. В случае идеального газа, молекулы которого не взаимодействуют друг с другом, внутренняя энергия сводится лишь к сумме кинетических энергий 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 и равна

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

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 прямой, соединяющей образующие молекулу атомы.

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

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

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 характеристикой состояния системы, работа и количество тепла являются характеристиками 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 – значения внутренней энергии в начальном и конечном состоянии 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 равна

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

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

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

Для расчета количества тепла Q используют удельную и молярную теплоемкости c и C :

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

где c – удельная теплоемкость вещества – количество теплоты, которое требуется сообщить единице массы вещества для нагревания его на 1 К. В системе СИ удельная теплоемкость измеряется в Дж/кг·К. Молярная теплоемкость C равна количеству теплоты, необходимого 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 теплоемкости 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 ($P = \text{const}$) 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* ($V = \text{const}$). Так как $\Delta V = 0$, то $A = 0$. Первый закон термодинамики принимает вид:

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

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

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

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

Работа газа при этом процессе $A = P \Delta V = \frac{M}{\mu} R \Delta T = \nu R \Delta T$

, 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:

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

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

$$Q = A,$$

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

Можно показать, что в этом случае

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

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

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

Откуда $\gamma PdV + VdP = 0$,

где величина $\gamma = c_p / c_v$ называется *показателем адиабаты*.

Решение этого дифференциального уравнения имеет вид

$$PV^\gamma = \text{const} \quad (15)$$

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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1 – 61

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ И ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ

Цель работы. Целью данной работы является определение показателя адиабаты $\gamma = c_p / c_v$ методом Клемана и Дезорма, основанном на использовании адиабатного процесса расширения воздуха.

Описание лабораторной установки

Большой баллон (рис.1) закрытый пробкой или краном, соединен с резиновой грушей В или компрессором, при помощи которых накачивают воздух в сосуд до некоторого давления $P_1 = P_0 + h_1$, P_0 – атмосферное давление, h_1 – избыточное давление, измеряемое водяным манометром М. Оно измеряется разностью уровней воды в коленях манометра $h_1 = h'_1 - h''_1$.

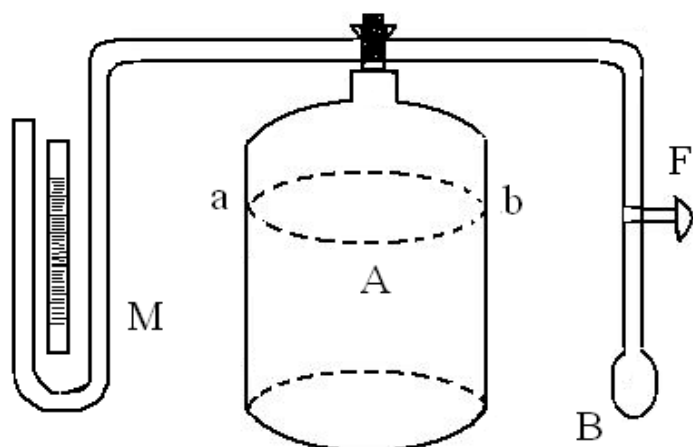


Рис.1

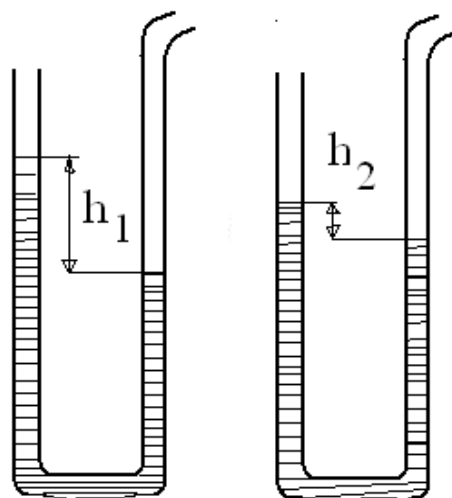


Рис.2

Откроем кран 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 . (Избыточные давления h_1 и h_2 много меньше P_0 и с ними можно обращаться как с дифференциалами.) Так как изменение температуры при адиабатном расширении и последующем изохорном нагреве одинаковы, то и абсолютные величины изменений внутренней энергии для одной и той же массы газа одинаковы, т.е.

$$dA_1 = dU_2, \quad (16)$$

где $dA_1 = -dU_1$ работа при адиабатном расширении, а dU_2 - изменение энергии при изохорном нагревании. Для адиабатического процесса, используя уравнение адиабаты (15), получим.

$$dA_1 = PdV_1 = \frac{i}{i+2} VdP_1 = \frac{i}{i+2} Vh_1 . \quad (17)$$

При изохорном процессе из (3) следует

$$dU_2 = \frac{i}{2} VdP_2 = \frac{i}{2} Vh_2 , \quad (18)$$

и подставляя (17) и (18) в (16), получим

$$\frac{i}{i+2} Vh_1 = \frac{i}{2} Vh_2 , \quad \text{отсюда} \quad h_1 = \frac{i+2}{2} h_2 = \frac{i}{2} h_2 + h_2 \quad \text{и} \quad h_1 - h_2 = \frac{i}{2} h_2 .$$

Таким образом

$$\gamma = \frac{i+2}{i} = \frac{h_1}{h_1 - h_2} = 1 + \frac{h_2}{h_1 - h_2} . \quad (19)$$

Расчетная формула (19) позволяет найти γ по измеренным значениям h_1 и h_2 .

На рис.3 и 4 показано изменение температуры и давления в баллоне в зависимости от времени τ . Участок 1-2 на этих графиках соответствуют адиабатическому расширению газа при вынимании 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 ($\Delta P_1 = h_1$, $\Delta P_2 = h_2$).

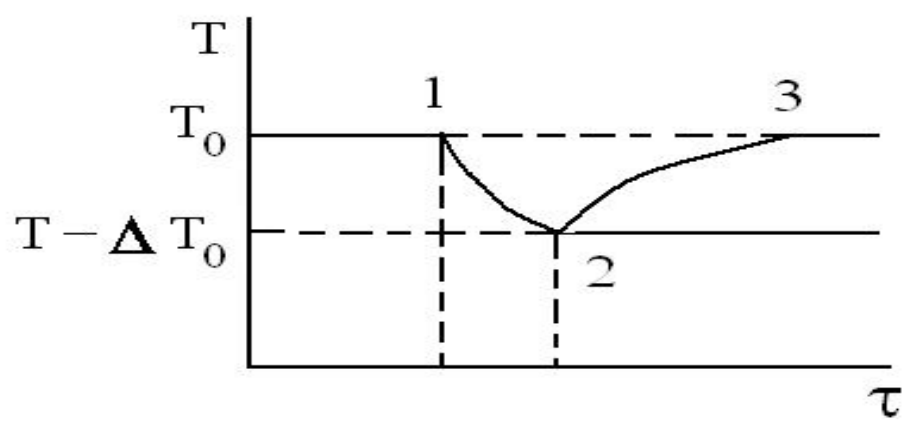


Рис.3

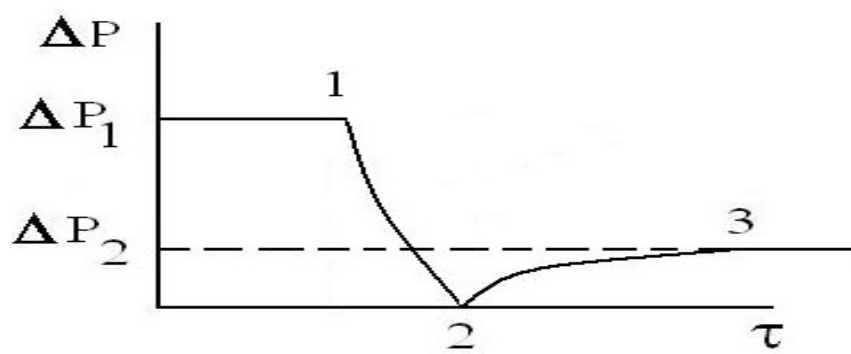


Рис.4



Рис.5

Порядок выполнения работы.

1. Открывают кран F (см.рис.1) и грушей В осторожно накачивают воздух в баллон до тех пор, пока разность уровней жидкостей в манометре не будет равна 120-180 мм.
2. После этого закрывают кран F и выжидают некоторое время, в течение которого нагретый при сжатии воздух в сосуде примет комнатную температуру, и уровни жидкостей в манометре перестанут изменяться. Записывают показания h_1' , h_1'' в левом и правом коленах манометра, тогда $h_1 = h_1' - h_1''$ (см. рис. 2).
3. Затем на 0,5-1с открывают кран (вынимают пробку) и снова закрывают баллон (сразу после закрытия баллона 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 жидкостей 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

Измеряемые величины	
---------------------	--

№ измер.	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				$\Delta\gamma =$
...				
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. Удельные теплоемкости этой смеси газов $c_v=600$ Дж/Кг·К и $c_p=900$ 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 1600 Дж и он совершил работу 400 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 1,134 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 100 л. Найдите конечное давление. Какое давление установилось бы при изотермическом сжатии.
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, характе-

ристики 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 комнатных температурах 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 . 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 Дж/м·с·К = Вт/ м ·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. dv/dx называется градиентом скорости. Уравнение (3) называется *законом Ньютона* для вязкости, *сила трения пропорциональна градиенту скорости и площади соприкосновения слоев.* η - (греческая буква 'ита')- коэффициент вязкости, зависящий от среды, температуры и давления. Его размерность Н·с/м² = кг/м·с.

В жидкостях вязкость (внутреннее трение) обусловлено силами взаимодействия между молекулами. При увеличении 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 увеличением 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 давлений*. Поток также зависит от диаметра и длины трубы. Найдем эту зависимость.

Выделим в капилляре воображаемый цилиндрический объем газа радиусом R и длиной l , как показано на рисунке 1. Обозначим давления на его торцах P_1 и P_2 . При установившемся течении скорости слоев не зависят от времени и равнодействующая сил давления на цилиндр $F = (P_1 - P_2) \cdot \pi \cdot r^2$ должна уравновеситься силой внутреннего трения F_T , которая действует на боковую поверхность цилиндра со стороны внешних слоев газа: $F - F_T = 0$.

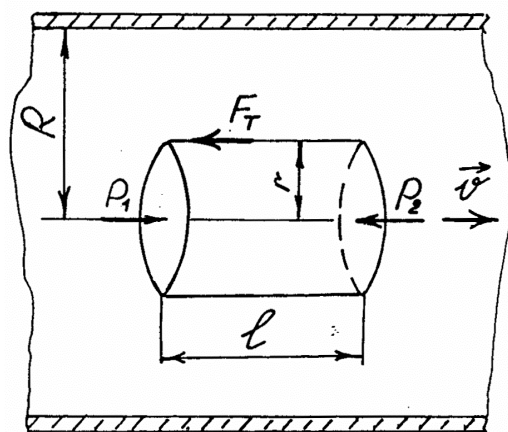


Рис. 1

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

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

В этом случае условие стационарности запишется в виде:

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

Интегрируя это равенство, получим:

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

где C - постоянная интегрирования, которая определяется граничными условиями задачи. При $r = R$ скорость газа равна нулю.

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

Подсчитаем объемный поток газа Φ . Через кольцевую площадку с внутренним радиусом r и внешним $r + dr$ ежесекундно протекает объем газа $d\Phi = v dS = 2\pi r \cdot v(r) \cdot dr$. В результате 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

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

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

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

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:

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

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 меньший 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% от атмосферного.

Лабораторная установка.

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

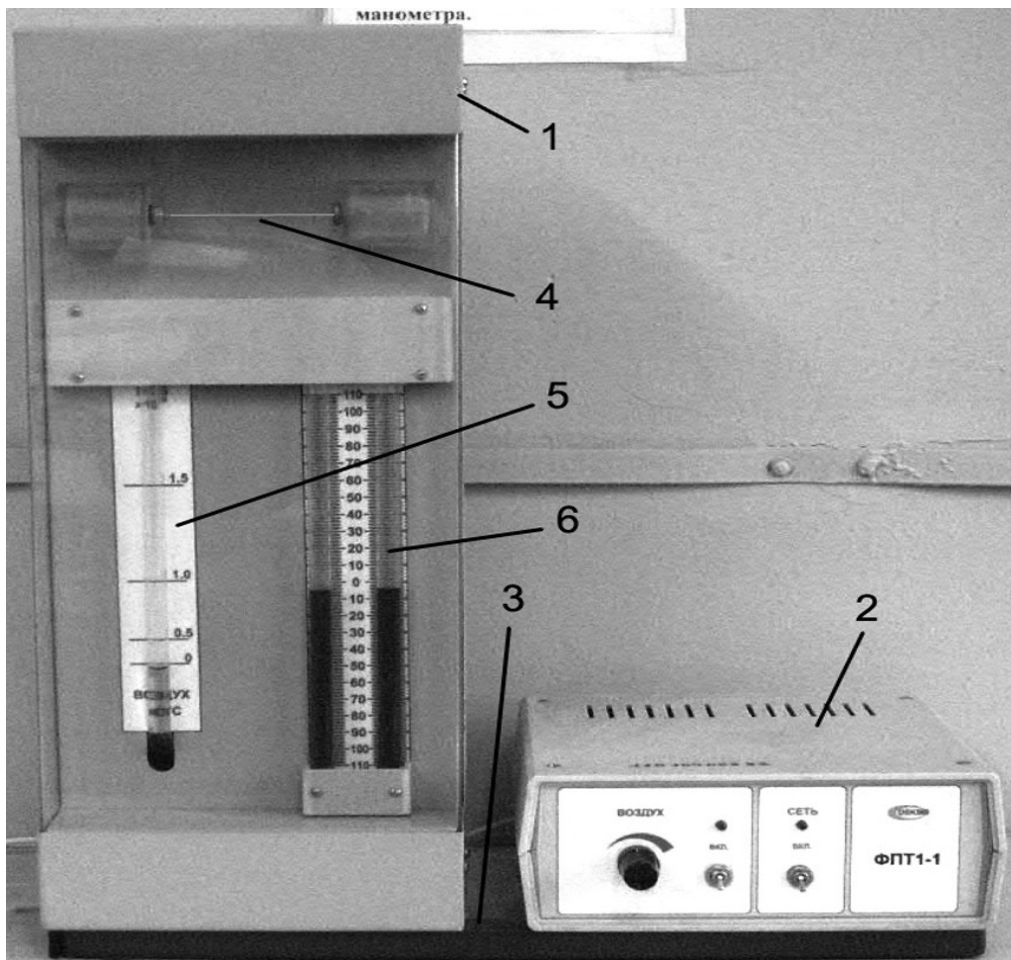


Рис. 2.

где 1- блок рабочего элемента; 2- блок приборов; 3- стойка; 4- капилляр; 5 – реометр; 6 – манометр.

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 6.

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 минимальный поток воздуха Q .
5. Снимите уровни жидкости h_1 и h_2 в левом и правом колене водяного манометра и вычислите $h = h_1 - h_2$.
6. Занесите значения Φ и h в таблицу.

№ п/п	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.	-----	-----	-----	-----	-----		$S_\eta^2 =$	

$$\Delta\eta = S_\eta =$$

$$\eta =$$

7. Повторите измерения по п.п. 4, 5 еще для четырех-пяти значений объемного расхода воздуха (**ВНИМАНИЕ!** Увеличивая расход воздуха, следите за тем, чтобы вода оставалась в обоих коленах манометра).
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 значения ΔP по разности высот водяного столба и занесите результаты в таблицу. Давление водяного столба $\Delta P = \rho g h$, 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 .

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1-72

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА МЕТОДОМ НАГРЕТОЙ НИТИ

Цель работы - изучение теплопроводности воздуха и измерение его коэффициента теплопроводности. Коэффициент теплопроводности определяется по измерению потока тепла, передаваемого от нагретой нити через цилиндрический слой воздуха.

Распространение теплоты в газах осуществляется тремя способами: тепловым излучением (перенос энергии электромагнитными волнами), конвекцией (перенос энергии за счет перемещения слоев газа в пространстве из областей с более высокой температурой в области с низкой температурой) и теплопроводностью.

Теплопроводность - это процесс передачи энергии от более нагретого слоя газа к менее нагретому за счет хаотичного теплового движения молекул. При теплопроводности осуществляется

непосредственная передача энергии от молекул с большей энергией к молекулам с меньшей энергией

Принцип работы установки.

Рассмотрим два коаксиальных цилиндра, пространство между которыми заполнено газом. Если внутренний цилиндр нагревать, а температуру наружного цилиндра поддерживать постоянной, ниже температуры нагревателя, то в кольцевом слое газа возникает радиальный поток тепла, направленный от внутреннего цилиндра к наружному. При этом температура слоев газа, прилегающих к стенкам цилиндров, равна температуре стенок.

Рассчитаем поток тепла между ними в стационарном режиме, т.е. тогда, когда температура слоев воздуха не зависит от времени. Будем также считать, что температура воздуха зависит только от радиальной координаты и не меняется в направлении оси цилиндра. В этом случае поток тепла через любую цилиндрическую поверхность одинаков. Иначе слои воздуха нагревались бы или охлаждались.

Выделим в газе цилиндрическую поверхность радиусом r и длиной L (рис. 1). По закону Фурье (2) тепловой поток $q = dQ/dt$, т.е. количество тепла, переносимого через цилиндрическую поверхность за одну секунду, можно записать в виде

$$q = -\chi \frac{dT}{dr} S = -\chi \frac{dT}{dr} 2\pi r L. \quad (5)$$

Разделяя переменные, получим

$$\frac{dr}{r} = -\frac{2\pi\chi L}{q} dT.$$

Тогда

$$\int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r} = -\frac{2\pi\chi L}{q} \int_{T_1}^{T_2} dT$$

или

$$\ln \frac{R_2}{R_1} = \frac{2\pi\chi L}{q} (T_1 - T_2), \quad (6)$$

здесь T_1 , R_1 и T_2 , R_2 - соответственно температуры и радиусы внутреннего и наружного цилиндров.

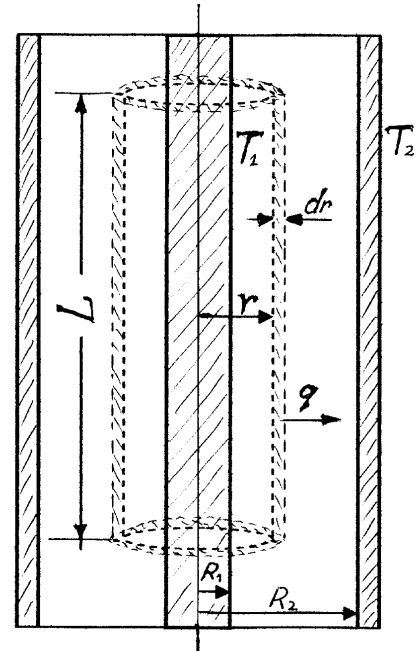


Рис. 1.

Из (6) следует, что поток через весь цилиндрический слой пропорционален разности температур:

$$q = \frac{2\pi\chi L}{\ln \frac{R_2}{R_1}} (T_1 - T_2). \quad (7)$$

Из уравнения (6) видно, что для определения коэффициента теплопроводности газа нужно измерить поток тепла и разность температур цилиндров:

$$\chi = \frac{q \ln \frac{R_2}{R_1}}{2\pi L (T_1 - T_2)} = \frac{q \ln \frac{D_2}{D_1}}{2\pi L (T_1 - T_2)}, \quad (8)$$

где D_1 и D_2 диаметры цилиндров.

Формула (8) получена в предположении, что теплота переносится от внутреннего к наружному цилиндру только благодаря теплопроводности. Это предположение достаточно обосновано, поскольку поток лучистой энергии при невысоких температурах и малом диаметре нагревателя составляет незначительную часть отдаваемого тепла, а конвекция устраняется подбором диаметра наружного цилиндра и его вертикальным расположением в экспериментальной установке.

Внутренним цилиндром служит тонкая проволока (нить), обычно вольфрамовая, которая нагревается электрическим током.

Тогда после установления стационарного режима тепловой поток можно принять равным мощности электрического тока, протекающего через проволоку

$$q = I U ,$$

где I - ток через проволоку; U - падение напряжения на проволоке. Для измерения тока последовательно с проволокой включен эталонный резистор сопротивлением $R_э$. Тогда

$$I = \frac{U_э}{R_э}, \quad \text{и} \quad q = \frac{U_э U}{R_э}, \quad (9)$$

где $U_э$ - падение напряжения на эталонном резисторе.

Подставляя (9) в (8), получим

$$\chi = \frac{U_э U \ln \frac{D}{d}}{2 \pi L R_э \Delta T}, \quad (10)$$

здесь D и d - диаметры цилиндра и проволоки; $\Delta T = T_1 - T_2$ - разность температур проволоки и наружного цилиндра (стеклянной трубки).

Температуру трубки T_2 можно принять равной температуре окружающего воздуха. Разность температур можно определить по изменению сопротивления проволоки при нагревании, используя зависимость сопротивления от температуры. Пусть R_2 и R_1 - сопротивления проволоки при комнатной температуре T_2 и при T_1 , t_1 и t_2 соответствующие температуры по шкале Цельсия, тогда

$$R_1 = R_0 (1 + \alpha t_1), \quad R_2 = R_0 (1 + \alpha t_2),$$

где R_0 - сопротивление проволоки при 0°C ; α - температурный коэффициент сопротивления материала проволоки.

Отсюда

$$\Delta T = t_1 - t_2 = \frac{R_1 - R_2}{\alpha R_0}. \quad (11)$$

Сопротивление проволоки можно определить из закона Ома по измеренным напряжениям на проволоке и эталонном сопротивлении

$$R = \frac{U}{I}, \quad I = \frac{U_э}{R_э},$$

$$R = R_э \frac{U}{U_э}. \quad (12)$$

Определение R_0 , R_1 и R_2 .

Из (10) и (11) видно, что для расчета коэффициента теплопроводности воздуха надо знать сопротивление проволоки R_2 при комнатной температуре и R_1 в нагретом состоянии. Для этого снимем зависимость сопротивления проволоки R от U_3 . Значение R при достаточно малых токах даст нам R_2 . Но такой метод не точен, так как измерения следует проводить при очень малых токах. Из (7) следует, что ΔT пропорционально потоку тепла q , и следовательно сопротивление проволоки линейно зависит от потока тепла. Поэтому для определения R_2 по данным измерений U_3 и U строится график зависимости R от потока тепла q и продолжается до пересечения с осью R . Точка пересечения дает R_2 . Затем рассчитывается R_0 по формуле.

$$R_0 = \frac{R_2}{1 + \alpha t_2} \quad (13)$$

Лабораторная установка

Схема установки показана на рис. 1, а ее общий вид на рис. 2.

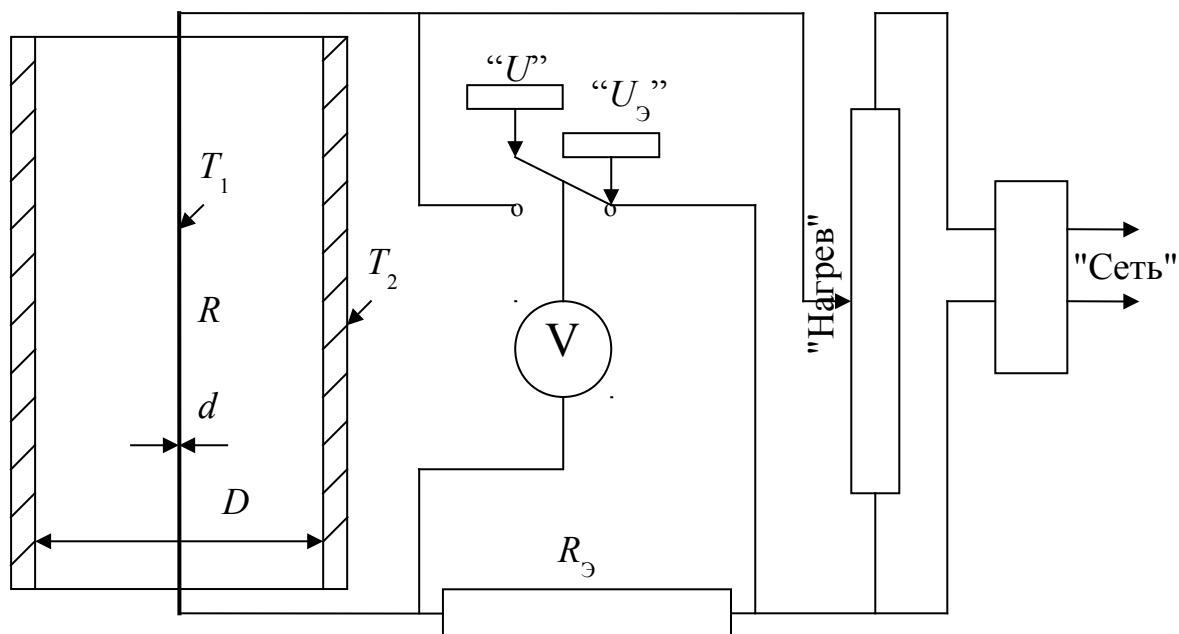


Рис. 2.

Рабочий элемент установки представляет собой стеклянную трубку, заполненную воздухом, вдоль оси которой натянута вольфрамовая проволока 4. Температура трубки в ходе эксперимента поддерживается постоянной, благодаря принудительной циркуляции воздуха между трубкой и кожухом блока рабочего элемента 3, которая осуществляется с помощью вентилятора, находящегося в блоке рабочего элемента. Температура воздуха в трубке измеряется цифровым термометром 2. Значения падения напряжения на эталонном резисторе U_3 и на проволоке U измеряются цифровым вольтметром. Значение напряжения на проволоке устанавливается регулятором "Нагрев", который находится на передней панели блока приборов 1. Геометрические размеры рабочего элемента - диаметр трубки D , диаметр проволоки d , длина трубки L , температурный коэффициент сопротивления α материала проволоки указаны на рабочем месте.

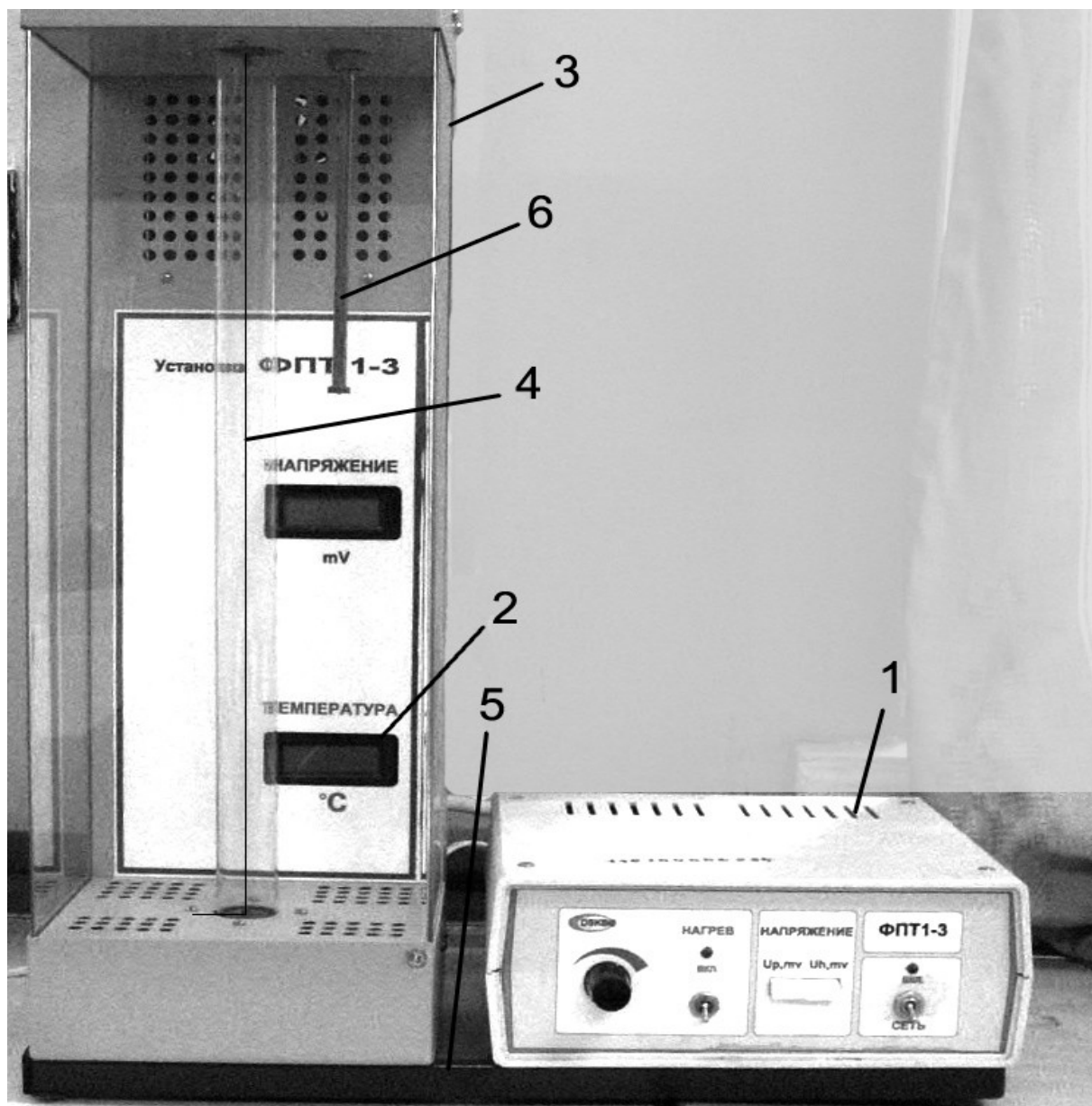


Рис. 3.

На рис 3: 1 - блок приборов; 2 - цифровой термометр, 3 - блок рабочего элемента; 4 - вольфрамовая проволока; 5 - стойка, 6 - датчик температуры (термопара).

Порядок выполнения работы

1. Включить установку тумблером "Сеть". Включить тумблер "Нагрев".
2. Нажать кнопку " U_3 " (режим измерения падения напряжения на эталонном резисторе) и с помощью регулятора "Нагрев" установить падение напряжения в диапазоне 2,2 ... 2,5 В. Нажать кнопку " U " (режим измерения падения напряжения на проволоке) и зарегистрировать значение напряжения.
3. Повторить измерения по п. 2 для значений напряжения U_3 в диапазоне до 8 В, примерно через 0,5 В. Увеличивать эталонное напряжение следует медленным поворотом регулятора "Нагрев", избегая уменьшения напряжения, так как проволока остывает медленнее чем нагревается. После поворота регулятора "Нагрев" следует подождать, пока показания вольтметра перестанут изменяться. Все результаты занести в таблицу 1.

Таблица 1

№ п/п	U_3 В	U В	R_2 Ом	q Вт	ΔT К
1					
2					
...					

4. Установить ручку регулятора "Нагрев" на минимум. Отключить тумблер "Нагрев", после чего отключить установку тумблером "Сеть".

Обработка результатов измерения

Параметры установки: $\alpha = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $D = 26 \text{ мм}$,
 $d = 0,64 \text{ мм}$, $L = 0,402 \text{ м}$, $R_3 = 55 \text{ Ом}$.

1. Для каждого измерения по формуле (12) рассчитать сопротивление проволоки и занести в таблицу 1.
2. По формуле (9) рассчитать поток тепла q и занести в таблицу 1.
3. Построить график зависимости R_1 от q , определить R_2 и по

формуле (12) определить R_0 .

4. По формуле (11) рассчитать ΔT и занести в таблицу 1.
5. Построить график зависимости q от ΔT .
6. Для значений эталонного напряжения в диапазоне 5,0 – 8,0 В рассчитать коэффициент теплопроводности и результаты занести в таблицу 2. Расчетную формулу (10) целесообразно переписать в виде

$$\chi = \frac{q \ln \frac{D}{d}}{2 \pi L \Delta T} = B \frac{q}{\Delta T}, \quad (14)$$

где величина $B = \frac{\ln \frac{D}{d}}{2 \pi L}$ одинакова для всех измерений, и ее можно вычислить

один раз. Найти среднее значение коэффициента теплопроводности воздуха χ и его погрешность как при косвенных многократных измерениях.

Таблица 2

№ п/п	χ_i Вт/(м·К)	$\Delta \chi_i$	$(\Delta \chi_i)^2$	Результат и погрешности
1				$S_\chi =$
2				$\Delta \chi =$
...				
ср.		$S_\chi^2 =$		$\chi =$

Контрольные задания

1. Определите минимальную мощность устройства обогрева загородного дома для поддержания температуры $+20^\circ\text{C}$ в помещении при наружной температуре -10°C . Размер помещения в доме $5 \times 5 \text{ м}^2$ и высота стен 2 м. (Учитывать только тепловые потери через стены). Варианты использованного строительного материала приведены ниже:

а - стены сделаны из деревянного бруса толщиной 20 см.

Теплопроводность дерева $0,174 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$;

б - стены сделаны из щитов толщиной 10 см на основе современного стекловолоконного материала «Изовер» с теплопроводностью $0,05 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$;

с - стены толщиной 35 см сделаны из кирпича.

Теплопроводность кирпича $0,5 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$.

2. Насколько потери тепла через деревянную стенку толщиной 20 см больше чем через стенку из «Изовера» толщиной 10 см. Данные по теплопроводности дерева и «Изовера» взять из предыдущей задачи.
3. Надо ли дополнительно теплоизолировать стены дома из кирпича толщиной 35 см чтобы потери тепла в нем были такие же, как и деревянного дома с толщиной стен 20 см. Данные по теплопроводности кирпича и дерева взять из задачи 1.
4. Какая часть потока жидкости протекает по внутренней части трубы радиусом 0,333 , 0,5 и 0,666 полного радиуса трубы.
5. Найдите силу трения, действующую на нижнюю поверхность пластины, которая скользит со скоростью 12 м/с параллельно дну на расстоянии 2 см от него. Длина пластины 2,0 м, ширина 0,6 м. Коэффициент вязкости воды $0,001 \text{ кг/м}\cdot\text{с}$.
6. Диаметр нити 0,5 мм, ее длина 200 мм, диаметр цилиндра 40 мм. До какой температуры нагреется нить при пропускании через нее тока 0,5 А. Сопротивление нити 20 Ом и не зависит от температуры. Температура внешнего цилиндра $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Коэффициент теплопроводности воздуха $0,025 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.
7. Укажите неправильные ответы:
 - а - если в направлении оси X концентрация паров воды убывает, то в результате диффузии будет происходить перенос пара в направлении оси X;
 - б - при убывании температуры в направлении оси X возникает перенос энергии в этом направлении;
 - в - явление диффузии всегда связано с переходом молекул из одного слоя в другой;
 - г - коэффициент диффузии всегда увеличивается при нагревании;
 - д - любой перенос энергии от горячего тела к холодному называется теплопроводностью;
 - е - коэффициент вязкости всегда увеличивается при повышении температуры;
 - ж - сопротивление протеканию жидкости в трубе обусловлено явлением вязкости;

з - явление вязкости во всех средах обусловлено переходом молекул из одного слоя в другой.

Библиографический список

- Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 т. Т.1. Механика. - М.: Астрель, 2004.
- Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 т. Т. 2 . Молекулярная физика. – М.: Астрель, 2004.
- Зисман Г.А., Годес О.М. Курс общей физики. В 3 т. Т.1. Механика. Молекулярная физика. Колебания и волны.- СПб.: Лань, 2007.

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 теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме ..	16
Тема 1 – 7. Явления переноса.	21
Лабораторная работа 1-71. Определение коэффициента вязкости воздуха капиллярным методом.	24
Лабораторная работа 1-72. Определение коэффициента теплопроводности воздуха методом нагретой нити	30
Библиографический список.....	40

Учебное издание

Владимир Олегович Кабанов
Владимир Михайлович Максимов
Сергей Александрович Поржецкий
Михаил Николаевич Полянский
Валерий Иванович Лейман
Владимир Константинович Козырев

Физика
Механика. Молекулярная физика
Учебно-методическое пособие к лабораторным работам
№ 1-51, 1-61, 1-71, 1-72

Для бакалавров всех факультетов.