

Министерство образования и науки Российской Федерации
Архангельский государственный технический университет

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА

*Методические указания к выполнению контрольного задания № 2
для студентов заочного факультета
инженерно – технических специальностей*

Архангельск
2004

Рассмотрены и рекомендованы к изданию методической
комиссией факультета промышленной энергетики
Архангельского технического университета
26 мая 2004 г.

Составители:

Л.В. Филимонова, доц. канд. техн. наук;
А.Г. Корельская, ассистент.

Рецензент

Ю.Л. Леухин, канд.тех.наук

УДК 530.1

Филимонова Л.В., Корельская А.Г. Молекулярная физика. Термодинамика: Методические указания к выполнению контрольного задания № 2 для студентов – заочников инженерно – технических специальностей. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2004. – 27 с.

Подготовлены кафедрой физики АГТУ.

В указаниях излагаются основные законы и формулы по молекулярной физике и термодинамике, приведены примеры решения задач.

Предназначены для студентов-заочников инженерно-технических специальностей.

Ил. 5. Табл. 3.

© Архангельский государственный
технический университет, 2004

РЕКОМЕНДАЦИИ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

К выполнению контрольной работы следует приступить только после изучения материала, соответствующего данному разделу программы, внимательного ознакомления с примерами решения задач, приведенных в данном пособии по каждому разделу курса.

При выполнении контрольной работы необходимо руководствоваться следующими правилами.

1. Контрольная работа выполняется в обычной школьной тетради (каждая контрольная выполняется в отдельной тетради). Для замечаний рецензента на страницах тетради оставляются поля. Каждая следующая задача должна начинаться с новой страницы. Условия задач переписываются полностью без сокращений.

2. При решении задач следует пользоваться международной системой единиц (СИ). Все величины, входящие в условия задачи, выражаются в единицах этой системы.

3. Решения задач должны сопровождаться краткими, но исчерпывающими пояснениями, раскрывающими физический смысл употребляемых формул. В тех случаях, когда это возможно, дать чертеж, выполненный с помощью чертежных принадлежностей.

Если при решении задачи применяется формула, получаемая для частного случая, не выражающая какой-нибудь физической закон или не являющаяся определением какой-нибудь физической величины, то её следует вывести.

4. Решать задачу надо в общем виде, то есть выразить искомую величину в буквенных обозначениях величин, заданных в условии задачи. При таком способе решения не производятся вычисления промежуточных величин.

Получив решение в общем виде, сделать анализ его размерности. Для этого надо подставить в правую часть полученной рабочей формулы вместо символов величин обозначения единиц, провести с ними необходимые действия и убедиться в том, что полученная при этом единица соответствует искомой величине. Если такого соответствия нет, то это означает, что задача решена неверно.

5. В конце контрольной работы следует указать учебники и учебные пособия, которыми пользовались при решении задач.

6. Получив из университета проверенную работу, следует внимательно ознакомиться с замечаниями и указаниями рецензента. Если при выполнении контрольной работы были допущены ошибки, необходимо выполнить работу над ошибками в той же тетради и направить ее на повторную проверку.

7. После получения положительной рецензии студент обязан пройти собеседование по существу решенных задач. Итогом собеседования является зачет по контрольной работе.

8. Студентам, проживающим вблизи университета или филиалов и учебно-консультационных пунктов, рекомендуется прослушать курс лекции по физике, организуемых для студентов заочников, а также использовать очные консультации преподавателей кафедры физики.

1. МОЛЕКУЛЯРНОЕ СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

1.1. Количество вещества (ν) – физическая величина, определяемая числом структурных элементов, из которых состоит вещество. В молекулярной физике для измерения количества вещества вводится единица – моль. В одном моле различных веществ содержится одинаковое число молекул (число Авогадро):

$$N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

1.2. Молярная масса (масса моля) любого вещества выражается соотношением:

$$\mu = N_A m_1,$$

где m_1 – масса одной молекулы данного вещества.

Масса моля μ численно равна относительной молекулярной массе M_r данного вещества, умноженной на 10^{-3} ($\mu = M_r \cdot 10^{-3}$ кг/моль), например:

$$\mu_{H_2O} = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}.$$

1.3. Число молей ν , содержащихся в данной массе вещества m :

$$\nu = \frac{m}{\mu}.$$

1.4. Число молекул N , содержащееся в данной массе вещества m :

$$N = \nu \cdot N_A = \frac{m}{\mu} \cdot N_A.$$

1.5. Плотность вещества:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_1 N}{V} = m_1 n,$$

где m – масса вещества, заключенного в объеме V ; n – число молекул в единице объема.

1.6. Закон Авогадро: моли любых газов при одинаковых температурах и давлениях занимают одинаковые объемы. При нормальных условиях этот объем $V_\mu = 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$.

1.7. Массовая доля α i -того компонента смеси газов:

$$\alpha = \frac{m_i}{m},$$

где m_i – масса i -того компонента смеси, m – масса смеси.

2. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

2.1. Состояние данной массы идеального газа описывается уравнением Менделеева - Клапейрона:

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

где P, T - давление и температура газа; V - объем, занимаемый данной массой газа (объем сосуда); $\frac{m}{\mu}$ - число молей, содержащихся в данной массе газа; R - универсальная газовая постоянная, $R = 8,31$ Дж/(моль·К).

2.2. Исходя из уравнения состояния, можно определить плотность идеального газа:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P\mu}{RT} .$$

Между температурой t (по шкале Цельсия) и температурой T (по шкале Кельвина) существует следующая связь:

$$T = (t + 273,15) \text{К} \cong (t + 273) \text{К} .$$

2.3. Вводя постоянную Больцмана $k = R / N_A = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К уравнение состояния (2.1) примет вид:

$$p = nkT ,$$

где n – концентрация молекул.

2.4. Закон Дальтона для смеси газа.

Если в сосуде V при температуре T содержится смесь газов, то необходимо считать, что каждый из компонентов этой смеси распространяется по всему объему сосуда. Парциальное давление p_i , создаваемое отдельным i -м компонентом смеси, определяется из уравнения Менделеева - Клапейрона:

$$P_i = \frac{m_i}{\mu_i} \frac{RT}{V} ,$$

где m_i - масса данного компонента в смеси; μ_i - масса одного моля этого компонента.

Давление смеси газов равно сумме парциальных давлений, входящих в нее газов:

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_i$$

или

$$P_{см} = \left(\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} + \dots + \frac{m_i}{\mu_i} \right) \frac{RT}{V} .$$

В равновесном состоянии плотность смеси $\rho_{см}$ равна сумме плотностей компонентов смеси:

$$\rho_{см} = \rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_i .$$

Пример 1. Смесь азота и гелия при температуре 27°C находится под давлением $P = 1,3 \cdot 10^2$ Па. Масса азота составляет 70% от общей массы смеси. Найти концентрацию молекул каждого из газов.

Дано: $P = 1,3 \cdot 10^2$ Па; $m_1 = 0,7m$; $\mu_1 = 28$ г/моль $= 28 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; $\mu_2 = 4$ г/моль $= 4 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; $T = 27 + 273 = 300$ К.

Найти: n_1 и n_2 .

Решение. Давление смеси выразим по закону Дальтона:

$$P_{см} = P_1 + P_2.$$

где P_1 – парциальное давление азота в смеси; P_2 – парциальное давление гелия.

Выразим P_1 и P_2 из уравнения Менделеева - Клапейрона:

$$P_1 = \frac{m_1}{\mu_1} \frac{RT}{V}; \quad P_2 = \frac{m_2}{\mu_2} \frac{RT}{V}.$$

Найдем соотношение между P_1 и P_2 :

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{m_1 / \mu_1}{m_2 / \mu_2} = \frac{0,7m \cdot 4}{28 \cdot 0,3m} = \frac{1}{3}, \quad \text{т. е. } P_2 = 3P_1.$$

Так как

$$P_{см} = P_1 + P_2 = P_1 + 3P_1 = 4P_1,$$

следовательно,

$$P_1 = \frac{1}{4} P_{см}, \quad P_2 = \frac{3}{4} P_{см}.$$

С другой стороны, давление любого газа можно легко выразить через концентрацию его молекул (n) и температуру:

$$P_1 = n_1 kT; \quad P_2 = n_2 kT.$$

Отсюда

$$n_1 = \frac{P_1}{kT} = \frac{1}{4} \frac{P_{см}}{kT}; \quad n_2 = \frac{P_2}{kT} = \frac{3}{4} \frac{P_{см}}{kT} = 3n_1.$$

Проверим размерность:

$$[n] = \frac{\text{Па}}{\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1} \text{К}} = \frac{\text{Па}}{\text{Дж}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^{-2}}{\text{Н} \cdot \text{м}} = \text{м}^{-3}.$$

Произведем вычисления:

$$n_1 = \frac{1}{4} \frac{1,3 \cdot 10^2}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} = 0,8 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3};$$

$$n_2 = 3n_1 = 2,4 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}.$$

Ответ: $n_1 = 0,8 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$; $n_2 = 2,4 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$.

3. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

3.1. Основное уравнение кинетической теории газов для давления:

$$P = \frac{1}{3} m_1 n \langle v_{кв} \rangle^2 = \frac{2}{3} n \langle \varepsilon_{пост} \rangle,$$

где m_1 - масса одной молекулы; n - концентрация молекул; $\langle v_{кв} \rangle$ - средняя квадратичная скорость молекул.

3.2. Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы:

$$\langle \varepsilon_{пост} \rangle = \frac{m_1 \langle v_{кв} \rangle^2}{2} = \frac{3}{2} kT.$$

(Эта формула раскрывает молекулярно – кинетическое толкование температуры: она – мера средней кинетической энергии поступательного движения молекул идеального газа).

3.3 Закон о равномерном распределении энергии по степеням свободы молекул: на каждую степень свободы приходится в среднем одинаковая энергия, равная

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{1}{2} kT.$$

3.4. Средняя энергия молекулы:

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

где i - число степеней свободы молекулы данного газа: для одноатомных молекул $i = 3$ (поступательных), для двухатомных $i = 5$ (3 поступательных + 2 вращательных), для всех многоатомных $i = 6$ (3 поступательных + 3 вращательных).

3.5. Внутренняя энергия массы m газа:

$$U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} RT.$$

3.6. Скорости газовых молекул:

- средняя квадратичная

$$\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_1}} \quad \text{или} \quad \langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}},$$

- средняя арифметическая

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_1}} \quad \text{или} \quad \langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}},$$

- вероятная

$$v_g = \sqrt{\frac{2kT}{m_1}} \quad \text{или} \quad v_g = \sqrt{\frac{2kT}{\mu}}.$$

Пример 2. Найти среднюю квадратичную скорость, среднюю кинетическую энергию поступательного движения и среднюю полную кинетическую энергию молекул гелия и азота при температуре $t = 27^\circ\text{C}$. Опреде-

лить полную энергию всех молекул каждого из газов. Массы газов одинаковы ($m_1 = m_2 = 100$ г).

Дано: $t = 27^\circ \text{C}$; $T = 300 \text{ K}$; $m = 100 \text{ г} = 10^{-3} \text{ кг}$; $\mu_1 = 4 \text{ г/моль} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$; $i_1 = 3$; $\mu_2 = 28 \text{ г/моль} = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$; $i_2 = 5$.

Найти: $\langle \varepsilon_{\text{пост}1} \rangle$; $\langle \varepsilon_{\text{пост}2} \rangle$; $\langle \varepsilon_1 \rangle$; $\langle \varepsilon_2 \rangle$; $\langle v_{\text{кв}1} \rangle$; $\langle v_{\text{кв}2} \rangle$; U_1 ; U_2 .

Решение. 1. Средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы при данной температуре T одинакова для любых молекул, т.е.

$$\langle \varepsilon_{\text{пост}1} \rangle = \langle \varepsilon_{\text{пост}2} \rangle = \frac{3}{2} kT.$$

2. Полная кинетическая энергия молекулы газа определяется по формуле:

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

тогда для молекул двух разных газов:

$$\langle \varepsilon_1 \rangle = \frac{i_1}{2} kT, \quad \langle \varepsilon_2 \rangle = \frac{i_2}{2} kT.$$

3. Внутренняя энергия, заключенная в 100 г каждого из газов, определяется по формулам:

$$U_1 = \frac{m_1}{\mu_1} \frac{i_1}{2} RT, \quad U_2 = \frac{m_2}{\mu_2} \frac{i_2}{2} RT.$$

4. Средняя квадратичная скорость молекул этих газов зависит от их молярной массы газа или от их масс, т.е.

$$\langle v_{\text{кв}1} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{\mu_1}}, \quad \langle v_{\text{кв}2} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{\mu_2}}.$$

Проверим размерность:

$$[U] = \frac{\text{кг} \cdot \text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{К}}{\text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}} = \text{Дж};$$

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{К}}{\text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}}} = \sqrt{\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{кг}}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Произведем вычисления:

$$\langle \varepsilon_{\text{пост}1} \rangle = \langle \varepsilon_{\text{пост}2} \rangle = \frac{3}{2} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 = 6,2 \cdot 10^{-21} \text{ Дж};$$

$$\langle \varepsilon_1 \rangle = \frac{3}{2} kT = 6,2 \cdot 10^{-21} \text{ Дж};$$

$$\langle \varepsilon_2 \rangle = \frac{5}{2} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 = 10,4 \cdot 10^{-21} \text{ Дж};$$

$$U_1 = \frac{100 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{3}{2} \cdot 8,31 \cdot 300 = 93,5 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 93,5 \text{ кДж};$$

$$U_2 = \frac{100 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{5}{2} \cdot 8,31 \cdot 300 = 22,3 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 22,3 \text{ кДж};$$

$$\langle v_{кв1} \rangle = \sqrt{\frac{3 \cdot 8,31 \cdot 300}{4 \cdot 10^{-3}}} = 13,7 \cdot 10^2 \text{ м/с};$$

$$\langle v_{кв2} \rangle = \sqrt{\frac{3 \cdot 8,31 \cdot 300}{28 \cdot 10^{-3}}} = 5,17 \cdot 10^2 \text{ м/с}.$$

Ответ: $\langle \varepsilon_{норм1} \rangle = \langle \varepsilon_{норм2} \rangle = 6,2 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}; \langle \varepsilon_1 \rangle = 6,2 \cdot 10^{-21} \text{ Дж};$

$\langle \varepsilon_2 \rangle = 10,4 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}; U_1 = 93,5 \cdot 10^3 \text{ Дж}; U_2 = 22,3 \cdot 10^3 \text{ Дж}; \langle v_{кв1} \rangle = 13,7 \cdot 10^2 \text{ м/с};$

$\langle v_{кв2} \rangle = 5,17 \cdot 10^2 \text{ м/с}.$

4. ТЕПЛОЕМКОСТИ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

4.1. Теплоемкость системы (тела):

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T},$$

где ΔQ – количество теплоты, сообщенное системе (телу); ΔT – изменение температуры системы (тела), вызванное сообщением этого количества теплоты.

4.2. Молярная и удельная теплоемкости:

$$C_{\mu} = \frac{\Delta Q}{\nu \Delta T}; \quad C_{y\partial} = \frac{\Delta Q}{m \Delta T}.$$

4.3. Молярные теплоемкости идеального газа при постоянном объеме $C_{V\mu}$ и постоянном давлении $C_{P\mu}$:

$$C_{V\mu} = \frac{i}{2} R, \quad C_{P\mu} = C_{V\mu} + R = \frac{i+2}{2} R.$$

4.4. Соотношение между молярной и удельной теплоемкостями:

$$c_{y\partial} = \frac{C_{\mu}}{\mu}.$$

4.5. Удельные теплоемкости идеального газа при постоянном объеме и постоянном давлении:

$$c_{V y\partial} = \frac{i}{2} \frac{R}{\mu}, \quad c_{P y\partial} = \frac{(i+2)}{2} \frac{R}{\mu}.$$

4.6. Отношение теплоемкостей (показатель адиабаты):

$$\gamma = \frac{C_{P\mu}}{C_{V\mu}} \quad \text{или} \quad \gamma = \frac{C_{P y\partial}}{C_{V y\partial}} \quad \text{или} \quad \gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i+2}{i}.$$

4.7. Количество теплоты, израсходованное на нагревание данного вещества:

$$Q = \frac{m}{\mu} C_{\mu} \Delta T = m c_{y\partial} \Delta T.$$

Пример 3. Вычислить удельные теплоемкости газа, зная, что его молярная масса $\mu = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ и отношение теплоемкостей $\gamma = 1,67$.

Дано: $\mu = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}; \gamma = 1,67.$

Найти: $c_{V y\partial}, C_{P y\partial}.$

Решение. Исходя из классической теории теплоемкостей идеального газа, имеем:

$$C_{V_{уд}} = \frac{i}{2} \frac{R}{\mu}, \quad C_{P_{уд}} = \frac{i+2}{2} \frac{R}{\mu}.$$

Определим i из выражения:

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i+2}{i},$$

отсюда

$$i = \frac{2}{\gamma - 1}, \quad i = \frac{2}{1,67 - 1} = \frac{2}{0,67} = 3.$$

Следовательно, газ одноатомный.

Проверим размерность:

$$[C_{уд}] = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К} \cdot \text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}} = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Производим вычисления:

$$C_{V_{уд}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{8,31}{4 \cdot 10^{-3}} = 3,10 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$C_{P_{уд}} = \frac{3+2}{2} \cdot \frac{8,31}{4 \cdot 10^{-3}} = 5,16 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

5. ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ. ПРИМЕНЕНИЕ ЕГО К ГАЗОВЫМ ЗАКОНАМ

5.1. Первое начало термодинамики:

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

где Q - количество теплоты, сообщенное газу в рассматриваемом процессе;
 A - работа, совершенная газом; ΔU – изменение внутренней энергии газа в данном процессе.

5.2. Работа, совершаемая газом:

$$A = \int PdV.$$

5.3. Для любого процесса, происходящего с идеальным газом, изменение внутренней энергии рассчитывается по одной и той же формуле:

$$\Delta U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \Delta T = \frac{m}{\mu} C_{V\mu} \Delta T.$$

5.4. Количество теплоты и работа, совершаемая газом, зависит от вида процесса.

- Изотермический процесс: $T = const$; $\Delta T = 0$; $\Delta U = 0$;

$$Q_T = A_T = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = P_1 V_1 \ln \frac{P_1}{P_2}.$$

- Изохорический процесс: $V = const$; $\Delta V = 0$; $A = 0$;

$$Q_V = \Delta U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \Delta T = \frac{m}{\mu} C_{V\mu} \Delta T = m c_{V_{уд}} \Delta T.$$

- Изобарический процесс: $P = const$;

$$A_p = P(V_2 - V_1) = \frac{m}{\mu} R(T_2 - T_1), \quad Q_p = \frac{m}{\mu} C_{p\mu} \Delta T = m c_{p\gamma} \Delta T.$$

• Адиабатный процесс – процесс, при котором отсутствует теплообмен между системой и окружающей средой:

$$Q_{\text{адиаб}} = 0, \\ A_{\text{адиаб}} = -\Delta U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R(T_1 - T_2)$$

или

$$A_{\text{адиаб}} = \frac{m}{\mu} \frac{RT_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right] = \frac{P_1 V_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right],$$

где γ – показатель адиабаты, $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}$.

5.5. В адиабатном процессе изменяются все параметры идеального газа: P , V и T . Уравнения адиабатного процесса имеют вид уравнений Пуассона:

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma; \\ T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}; \\ T_2 P_1^{(\gamma-1)/\gamma} = T_1 P_2^{(\gamma-1)/\gamma}.$$

Пример 4. Азот, занимавший при давлении $P_1 = 10^5$ Па объем $V_1 = 10$ л, расширяется вдвое. Найти конечное давление и работу, совершенную газом при следующих процессах: а) изобарном; в) изотермическом; с) адиабатном (рис.1).

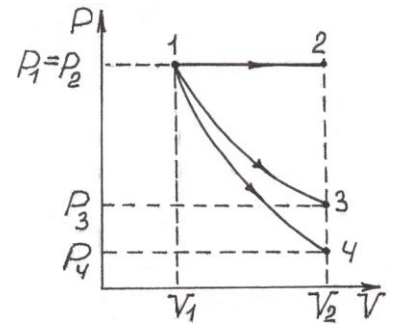


Рис.1

Дано: $P_1 = 10^5$ Па; $V_1 = 10$ л = $10 \cdot 10^{-3}$ м³; $V_2/V_1 = 2$; $i = 5$.

Найти: P_2 ; A_{1-2} ; P_3 ; A_{1-3} ; P_4 ; A_{1-4} .

Решение. 1. Рассмотрим изобарический процесс 1-2: $P = \text{const}$, следовательно, $P_2 = P_1$;

$$A_{1-2} = P_1(V_2 - V_1);$$

$$A_{1-2} = 10^5 (20 - 10) \cdot 10^{-3} = 1000 \text{ Дж.}$$

2. При изотермическом расширении 1-3 давление уменьшается.

По закону Бойля-Мариотта:

$$P_1 V_1 = P_3 V_2;$$

$$P_3 = \frac{P_1 V_1}{V_2}, \quad P_3 = 0,5 \cdot 10^5 \text{ Па;}$$

$$A_{1-3} = \frac{m}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1}, \quad A_{1-3} = 10^5 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \ln 2 = 690 \text{ Дж.}$$

3. В адиабатном процессе 1-4 P_4 найдем из уравнения Пуассона:

$$P_1 V_1^\gamma = P_4 V_2^\gamma;$$

$$P_4 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma; \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{i+2}{i} = 1,4; \quad P_4 = P_1 \cdot 10^5 \left(\frac{1}{2} \right)^{1,4} = 0,38 \cdot 10^5$$

Па.

Работа, совершаемая газом при адиабатном расширении, равна убыли внутренней энергии газа:

$$A_{1-4} = -\Delta U_{1-4} = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R(T_1 - T_4).$$

По уравнению Менделеева - Клапейрона:

$$\frac{m}{\mu} RT_1 = P_1 V_1 \quad \text{и} \quad \frac{m}{\mu} RT_4 = P_4 V_2,$$

следовательно,

$$A_{1-4} = \frac{i}{2} (P_1 V_1 - P_4 V_2) = \frac{5}{2} (10^5 \cdot 10 \cdot 10^{-3} - 0,38 \cdot 10^5 \cdot 20 \cdot 10^{-3}) = 600 \text{ Дж.}$$

Ответ: $P_2 = 10^5$; $A_{1-2} = 1000$ Дж; $P_3 = 0,5 \cdot 10^5$ Па; $A_{1-3} = 690$ Дж;
 $P_4 = 0,38 \cdot 10^5$ Па; $A_{1-4} = 600$ Дж.

Пример 5. 1 моль идеального газа, имеющий первоначально температуру $T_1 = 290$ К, расширяется изобарически до тех пор, пока его объем не возрастает в 2 раза. Затем газ охлаждается изохорически до первоначальной температуры T_1 . Определить приращение внутренней энергии газа ΔU , работу A , совершаемую газом, количество полученной газом теплоты Q .

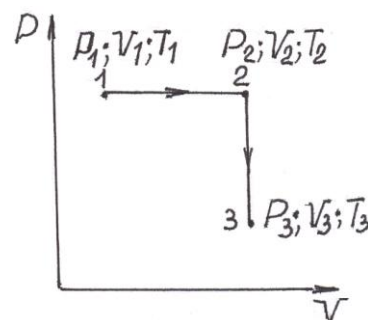


Рис.2

Дано: $\frac{m}{\mu} = 1$ моль; $P_2 = P_1$; $V_2 = 2V_1$; $V_3 = V_2$; $T_3 = T_1$.

Найти: ΔU_{1-2-3} ; A_{1-2-3} ; Q_{1-2-3} .

Решение. Изобразим графики процессов в координатах $P-V$ (рис.2). Внутренняя энергия газа – это функция состояния; ее изменение не зависит от пути перехода системы из начального состояния в конечное.

Поэтому

$$\Delta U_{1-2-3} = U_3 - U_1 = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R(T_3 - T_1),$$

но так как $T_3 = T_1$ (по условию задачи), то $\Delta U_{1-2-3} = 0$.

Работа, совершаемая газом:

$$A_{1-2-3} = A_{1-2} + A_{2-3}.$$

Так как в изохорическом процессе не происходит изменения объема ($\Delta V=0$), то $A_{2-3} = 0$, следовательно,

$$A_{1-2-3} = A_{1-2} = P_1 (V_2 - V_1) = P_1 (2V_1 - V_1) = P_1 V_1 = \frac{m}{\mu} RT_1.$$

Количество теплоты, полученное в сложном процессе 1-2-3, найдем из первого начала термодинамики:

$$Q_{1-2-3} = \Delta U_{1-2-3} + A_{1-2-3}.$$

Учитывая, что $\Delta U_{1-2-3} = 0$, имеем

$$Q_{1-2-3} = A_{1-2-3} = \frac{m}{\mu} RT_1.$$

Произведем вычисления:

$$Q_{1-2-3} = A_{1-2-3} = 8,31 \cdot 290 = 2,41 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

Ответ: $\Delta U = 0$, $Q_{1-2-3} = A_{1-2-3} = 2,41 \cdot 10^3$ Дж.

Пример 6. Углекислый газ (CO_2), начальная температура которого 360 К, адиабатически сжимается до $1/20$ своего первоначального объема. Определить: а) температуру газа в конце сжатия T_2 ; б) изменение внутренней энергии ΔU ; в) работу, совершенную над газом при сжатии, A . (Масса газа 20 г.)

Дано: $m=20$ г = 10^{-3} кг; $\mu=44$ г/моль = $44 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; $T_1 = 360$ К; $i = 6$;
 $V_2 = 1/20 V_1$.

Найти: T_2 ; ΔU ; A .

Решение. 1. Температуру в конце сжатия определим по уравнению адиабатного процесса, записанного для переменных T и V :

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1} \quad \text{или} \quad T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}. \quad (1)$$

Так как CO_2 – трехатомный газ, $i = 6$ и $\gamma = 4/3$.

2. Адиабатный процесс происходит без теплообмена и изменение внутренней энергии происходит за счет работы внешних сил, т. е. $Q = 0$;

$$\Delta U = -A.$$

Тогда работа $A_{ад}$ газа в адиабатном процессе:

$$A_{ад} = -\Delta U.$$

Изменение внутренней энергии определяется по формуле:

$$\Delta U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R(T_2 - T_1). \quad (2)$$

Произведя подстановку (см. формулу (1)), получим:

$$\Delta U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} RT_1 \left[\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} - 1 \right].$$

Проверим размерность:

$$[\Delta U] = \frac{\text{кг}}{\text{кг/моль}} \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \text{К} = \text{Дж.}$$

Произведем вычисления:

$$T_2 = 360 \left(\frac{20}{1} \right)^{1/3} = 985 \text{ К;}$$

$$\Delta U = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{44 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{6}{2} \cdot 8,31 \cdot 360 \left[(20)^{4/3-1} - 1 \right] = 7,05 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 7,05 \text{ кДж.}$$

Ответ: $T_2 = 985 \text{ К}$; $\Delta U = 7,05 \text{ кДж}$; $A = -7,05 \text{ кДж}$.

6. ТЕПЛОВАЯ МАШИНА. ЦИКЛ КАРНО

6.1. Термический КПД тепловой машины:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

где A – работа, совершаемая рабочим телом (газом) за цикл; Q_1 – количество теплоты, полученное рабочим телом за цикл от нагревателя; Q_2 – количество теплоты, отданное за цикл окружающим телам.

6.2. Термический КПД цикла Карно – наиболее экономичного обратимого кругового процесса, состоящего из двух изотерм и двух адиабат (рис. 3):

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где Q_1 – количество теплоты, которое газ получает при изотермическом расширении 1-2 при температуре нагревателя T_1 ; Q_2 – количество теплоты, отданное газом при изотермическом сжатии 3-4 при температуре холодильника T_2 .

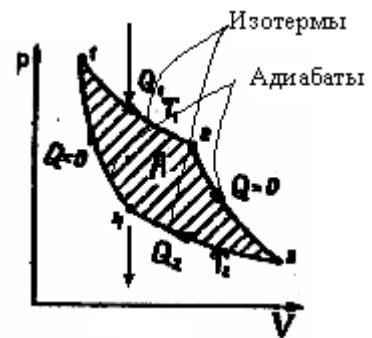


Рис.3

Пример 7. Температура пара, поступающего в паровую машину, $t_1 = 127^\circ\text{C}$; температура в конденсаторе $t_2 = 27^\circ\text{C}$. Определить теоретически максимальную работу при затрате количества теплоты $Q = 4,2 \text{ кДж}$.

Дано: $t_1 = 127^\circ\text{C}$; $T_1 = 127 + 273 = 400\text{К}$; $t_2 = 27^\circ\text{C}$; $T_2 = 300\text{К}$; $Q_1 = Q = 4,2 \text{ кДж}$.

Найти: A .

Решение. Для того чтобы работа, совершаемая тепловым двигателем, была максимальной, необходимо, чтобы цикл, по которому работает двигатель, был обратимым. При наличии только двух термостатов – нагревателя (T_1) и холодильника (T_2) – возможен только один обратный цикл – цикл Карно, состоящий из двух изотерм и двух адиабат (рис.3).

Коэффициент полезного действия этого цикла:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (1)$$

но КПД любого теплового двигателя:

$$\eta = \frac{A}{Q_1}, \quad (2)$$

где A – полезная работа, совершаемая двигателем за цикл; Q_1 – количество теплоты, полученное рабочим телом от нагревателя (в цикле Карно – это теплота, полученная в процессе изотермического расширения газа 1-2).

Приравнивая выражения (1) и (2), находим работу A :

$$\frac{A}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Откуда

$$A = \frac{Q_1(T_1 - T_2)}{T_1} = \frac{4,2(400 - 300)}{400} = 1,05 \text{ кДж.}$$

Ответ: $A = 1,05 \text{ кДж.}$

7. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА

7.1. Средняя длина свободного пробега молекулы газа:

$$\langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d_{\text{эф}}^2 n},$$

где $d_{\text{эф}}$ – эффективный диаметр молекул газа; n – концентрация молекул газа.

7.2. Закон Фика для диффузии:

$$\Delta M = -D \frac{d\rho}{dx} S \Delta t,$$

где ΔM – масса вещества, перенесенная в результате диффузии через площадь S , перпендикулярную оси X , за время Δt ; $\frac{d\rho}{dx}$ – градиент плотности данного вещества; D – коэффициент диффузии этого вещества.

7.3. Коэффициент диффузии для газов:

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle l \rangle,$$

где $\langle v \rangle$ – средняя скорость теплового движения газовых молекул; $\langle l \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекул.

7.4. Импульс (количество движения), передаваемый молекулами от слоя к слою через элемент поверхности площади S за время Δt :

$$\Delta P_{\text{умн}} = -\eta \frac{du}{dz} S \Delta t,$$

где $\frac{du}{dz}$ – градиент скорости течения слоев; η – динамическая вязкость (коэффициент внутреннего трения).

7.5. Динамическая вязкость газа:

$$\eta = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle l \rangle \rho,$$

где ρ – плотность газа.

7.6. Закон Ньютона для силы внутреннего трения:

$$F = \frac{\Delta P_{\text{умн}}}{\Delta t} = \eta \left| \frac{du}{dz} \right| S,$$

где F – сила внутреннего трения между движущимися слоями газа или жидкости, рис. 4.

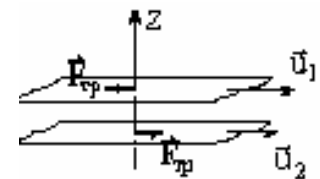


Рис.4

7.7. Закон Фурье для теплопроводности:

$$\Delta Q = -\lambda \frac{dT}{dx} S \Delta t,$$

где ΔQ – количество теплоты, переносимой посредством теплопроводности через площадь S , перпендикулярную оси X , за время Δt ; λ - коэффициент теплопроводности; $\frac{dT}{dx}$ - градиент температуры.

7.8. Коэффициент теплопроводности газа:

$$\lambda = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle l \rangle \rho C_{V,yd},$$

где $C_{V,yd}$ – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме.

Пример 8. На высоте $h = 20$ см над горизонтальной трансмиссионной лентой, движущейся со скоростью $u_1 = 70$ м/с, подвешена параллельно ей пластинка площадью $S = 4$ см² (рис.5). Какую силу надо приложить к этой пластинке, чтобы она оставалась неподвижной? Вязкость воздуха при нормальных условиях $\eta_0 = 1,7 \cdot 10^{-5}$ Па·с. В условиях опыта температура $t = 27^\circ\text{C}$.

Дано: $h = 20$ см, $u_1 = 70$ м/с, $S = 4$ см², $\eta_0 = 1,7 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $t = 27^\circ\text{C}$, $T = 300$ К.

Найти: F .

Решение. Слои воздуха, непосредственно находящиеся над движущейся лентой, увлекаются ею, и в воздухе создается некоторый градиент скоростей $\frac{du}{dz}$. Между слоями движущегося воздуха создается сила трения F_{mp} . Эта сила действует и на пластинку со стороны движущихся слоев. Пластинка будет неподвижна, если приложенная внешняя сила F и сила трения F_{mp} скомпенсируются, т. е.

$$\vec{F} = -\vec{F}_{mp}; \quad F = F_{mp}.$$

Сила трения может быть найдена по уравнению Ньютона:

$$F_{mp} = \eta \left| \frac{du}{dz} \right| S, \quad (1)$$

где $\frac{du}{dz}$ - производная скорости u движения слоя по координате z , причем ось oz перпендикулярна плоскостям трансмиссии и пластинки, направлена от трансмиссии к пластинке.

Вязкость газа η может быть рассчитана по формуле:

$$\langle \eta \rangle = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle l \rangle \rho = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} \frac{1}{\sqrt{2}\pi d_{эф}^2 n} \frac{\mu}{N_A} n.$$

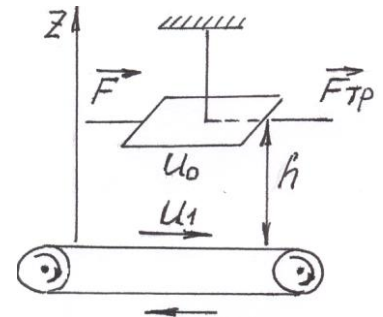


Рис.5

Как видно, вязкость зависит только от природы газа (эффективного диаметра молекул d и молярной массы μ) и температуры T . Сравним вязкость при температуре T с вязкостью при нормальных условиях ($T_0 = 273\text{K}$):

$$\eta_0 = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle l \rangle \rho = \sqrt{\frac{8RT_0}{\pi\mu}} \frac{1}{\sqrt{2}\pi d_{\text{эф}}^2 n} \frac{\mu}{N_A} n.$$

Вязкость η при температуре T связана с вязкостью η_0 при нормальных условиях соотношением:

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \sqrt{\frac{T}{T_0}}; \quad \eta = \eta_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}}. \quad (2)$$

Градиент скорости направленного движения слоев газа считают постоянным. Производная $\frac{du}{dz} = \text{const}$, ее можно заменить отношением изменения скорости Δu к приращению координаты Δz , $\Delta u = (0 - u_1)$, $\Delta z = h$ (рис.5):

$$\left| \frac{du}{dz} \right| = \left| \frac{\Delta u}{\Delta z} \right| = \frac{u_1}{h}. \quad (3)$$

Подставляя выражения (2) и (3) в уравнение (1), получим:

$$F = F_{\text{тр}} = \eta \left| \frac{du}{dz} \right| S = \eta_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}} \frac{u_1}{h} S.$$

Проверим размерность:

$$[F] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{с} \cdot \text{м}} \text{м}^2 = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} = \text{Н}$$

Произведем вычисления:

$$F = 1,7 \cdot 10^{-5} \frac{300}{273} \frac{70}{0,2} 4 \cdot 10^{-4} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ Н}.$$

Ответ: $F = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ Н}$.

8. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

8.1. Уравнение Ван-дер-Ваальса для реального газа:

- для одного моля газа $\left(\frac{m}{\mu} = 1 \text{ моль} \right)$

$$\left(P + \frac{a}{V_{\mu}^2} \right) (V_{\mu} - \epsilon) = RT;$$

- для произвольной массы газа m

$$\left(P + \frac{m^2 a}{\mu^2 V^2} \right) \left(V - \frac{m}{\mu} \epsilon \right) = \frac{m}{\mu} RT,$$

где P – давление газа на стенки сосуда; a , ϵ – постоянные Ван-дер-Ваальса, рассчитанные для одного моля газа (см. Приложение); V_{μ} – объем, занимаемый одним молем газа; V – объем, занимаемый газом.

8.2. Внутреннее давление в газе, обусловленное силами взаимодействия молекул:

$$P_i = \frac{a}{V_\mu^2} \quad \text{или} \quad P_i = \frac{m^2}{\mu^2} \frac{a}{V^2}.$$

Пример 9. 2 моля азота охлаждены до температуры -100°C . Определить давление P , оказываемое газом на стенки сосуда, если объем, занимаемый газом, равен 0,1 л. Сравнить полученное давление P с давлением $P_{ид}$, которое имел бы азот, если бы сохранил при рассматриваемых условиях свойства идеального газа.

Дано: $\frac{m}{\mu} = 2$ моля; $t = -100^\circ\text{C}$; $T = 173$ К; $V = 10^{-3} \text{ м}^3 = 10^{-4} \text{ м}^3$.

Найти: $P/P_{ид}$.

Решение. Из уравнения состояния реального газа выразим давление P :

$$P = \frac{\frac{m}{\mu} RT}{V - \frac{m}{\mu} b} - \frac{m^2}{\mu^2} \frac{a}{V^2}.$$

Значения постоянных a и b находим по Приложению: для азота $a = 0,135 \text{ Н} \cdot \text{м}^4/\text{моль}^2$; $b = 3,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}$.

Произведем вычисления:

$$P = \frac{2 \cdot 8,31 \cdot 173}{0,1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 3,9 \cdot 10^{-5}} - (2)^2 \frac{0,135}{(10^{-4})^2} = 0,76 \cdot 10^8 \text{ Па} = 760 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Для сравнения найдем давление $P_{ид}$ из уравнения состояния идеального газа

за $P_{ид} V = \frac{m}{\mu} RT$:

$$P_{ид} = 2 \cdot 8,31 \cdot 173 / 10^{-4} = 2880 \cdot 10^4 = 0,28 \cdot 10^8 \text{ Па} = 280 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Тогда $\frac{P}{P_{ид}} = \frac{760 \cdot 10^5}{280 \cdot 10^5} = 2,65$.

Следовательно, в этом случае уравнение Менделеева-Клапейрона непригодно для описания состояния охлажденного и сжатого азота.

Ответ: $\frac{P}{P_{ид}} = 2,65$.

ЗАДАЧИ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ

Контрольная работа включает решение восьми задач. Вариант контрольной работы выбирается по последней цифре шифра, номера задач – по таблице. Справочные данные приведены в Приложении.

Таблица 1

Вариант	Номера задач							
0	1	11	21	31	41	51	61	71
1	2	12	22	32	42	52	62	72
2	3	13	23	33	43	53	63	73
3	4	14	24	34	44	54	64	74
4	5	15	25	35	45	55	65	75
5	6	16	26	36	46	56	66	76
6	7	17	27	37	47	57	67	77
7	8	18	28	38	48	58	68	78
8	9	19	29	39	49	59	69	79
9	10	20	30	40	50	60	70	80

1. В колбе вместимостью 240 см^3 находится газ при температуре 290 К и давлении 50 кПа . Определить количество вещества газа ν и число молекул N .
2. В баллоне вместимостью 3 л находится кислород массой 4 г . Определить количество вещества газа ν и концентрацию его молекул n .
3. В колбе вместимостью 100 см^3 содержится некоторый газ при температуре 300 К . На сколько понизится давление газа в колбе, если вследствие утечки из колбы выйдет 10^{20} молекул?
4. Одна треть молекул азота массой 10 г распалась на атомы. Определить полное число частиц, находящихся в таком газе.
5. Определить количество вещества ν и концентрацию молекул газа, содержащегося в баллоне вместимостью 20 л при температуре 300 К и давлении 600 кПа .
6. При нормальных условиях 1 л газа имеет массу $1,429 \text{ г}$. Определить: 1) плотность газа; 2) его молярную массу; 3) число молекул в данной массе газа.
7. Азот находится под давлением $0,16 \text{ МПа}$ и занимает объем $2,8 \text{ л}$. Масса азота 56 г . На сколько изменится температура газа, если его объем уменьшится в два раза, а давление увеличится до $0,4 \text{ МПа}$?
8. В баллоне вместимостью 25 л находится водород при температуре 290 К . Вследствие утечки давление в баллоне понизилось на $0,4 \text{ Мпа}$. Сколько молекул вышло из баллона?

9. В запаянном сосуде находится вода, занимающая объем, равный половине объема сосуда. Найти давление и плотность водяных паров при температуре 400°C , зная, что при этой температуре вся вода обращается в пар.
10. Оболочка аэростата вместимостью $V = 1600 \text{ м}^3$, находящегося на поверхности Земли, на $7/8$ наполнена водородом при давлении 100 кПа и температуре 290 К . Аэростат подняли на некоторую высоту, где давление 80 кПа и температуре 280 К . Определить массу водорода, вышедшего из оболочки аэростата при его подъеме.
11. Плотность некоторого многоатомного газа при давлении 4 кПа составляет $5 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$. Определить среднюю квадратичную скорость молекул газа и среднюю кинетическую энергию молекул в единице объема этого газа.
12. Плотность газа при давлении $P = 735 \text{ мм рт.ст.}$ и температуре $t = 17^{\circ}\text{C}$ равна $\rho = 8,2 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$. Определить: а) молярную массу газа; б) концентрацию молекул газа; в) среднюю квадратичную скорость молекул газа.
13. Определить среднюю кинетическую энергию вращательного движения одной молекулы двухатомного газа, если суммарная кинетическая энергия молекул 1 кмоль этого газа равна $3,01 \text{ МДж}$.
14. Какую долю составляет кинетическая энергия вращательного движения молекул от полной кинетической энергии молекул одноатомного и многоатомного газов.
15. Газ занимает объем 1 л под давлением $0,2 \text{ МПа}$. Определить кинетическую энергию поступательного движения всех молекул, находящихся в данном объеме.
16. Определить среднюю кинетическую энергию поступательного движения одной молекулы, а также суммарную кинетическую энергию всех молекул, заключенных в одном моле и в одном килограмме гелия при температуре 200°C .
17. В азоте взвешены мельчайшие пылинки, которые движутся так, как если бы они были крупными молекулами. Масса каждой пылинки 10^{-10} г . Температура газа 27°C . Определить средние квадратичные скорости, а также средние кинетические энергии поступательного движения молекул азота и пылинок.
18. Определить среднюю кинетическую энергию поступательного движения и среднее значение полной кинетической энергии молекулы водяного пара при температуре 600 К . Найти также кинетическую энергию поступательного движения всех молекул пара, содержащихся в 1 кмоль .
19. Определить кинетическую энергию, приходящуюся в среднем на одну степень свободы молекулы азота при температуре 1 кК , а также среднюю кинетическую энергию поступательного движения, вращательного движения и среднее значение полной кинетической энергии молекулы.
20. В сосуде содержится азот, молекулы которого движутся со средней квадратичной скоростью 400 м/с . Вычислить среднюю кинетическую энергию поступательного движения одной молекулы.

21. Разность удельных теплоемкостей ($c_{P_{уд}} - c_{V_{уд}}$) некоторого двухатомного газа равна 296 Дж/(кг·К). Найти молярную массу газа и его удельные теплоемкости.
22. Найти удельные теплоемкости $c_{P_{уд}}$ и $c_{V_{уд}}$, а также молярные теплоемкости аргона.
23. Вычислить удельные теплоемкости газа, зная, что его молярная масса $28 \cdot 10^{-3}$ кг/моль и отношение теплоемкостей $\gamma = 1,4$.
24. Определить показатель адиабаты идеального газа, который при нормальных условиях занимает объем 6 л и имеет теплоемкость $C_V = 5,5$ Дж/К.
25. Определить молярные теплоемкости газа, если его удельные теплоемкости $c_{V_{уд}} = 3,12$ кДж/(кг·К) и $c_{P_{уд}} = 5,2$ кДж/(кг·К).
26. Найти удельные ($c_{P_{уд}}$ и $c_{V_{уд}}$) и молярные ($c_{P_{м}}$) и ($c_{V_{м}}$) теплоемкости водяного пара.
27. Двухатомный газ под давлением 400 кПа и температуре 350 К занимает объем 300 л. Определить теплоемкость C_P этого газа при постоянном давлении.
28. Разность удельных теплоемкостей ($c_{P_{уд}} - c_{V_{уд}}$) некоторого трехатомного газа равна 189 Дж/(кг·К). Определить молярную массу газа и его удельные теплоемкости.
29. Трехатомный газ под давлением 150 кПа и температуре 300 К занимает объем 5 л. Определить теплоемкость C_V этого газа при постоянном объеме.
30. Определить удельные теплоемкости $c_{V_{уд}}$ и $c_{P_{уд}}$ некоторого двухатомного газа, если плотность этого газа при нормальных условиях равна $1,43$ кг/м³.
31. Какая доля количества теплоты, подводимого к идеальному газу при изобарическом процессе, расходуется на увеличение внутренней энергии газа и какая доля на работу расширения? Рассмотреть три случая, если газ: 1) одноатомный; 2) двухатомный; 3) многоатомный.
32. Баллон вместимостью 20 л содержит водород при температуре 300 К под давлением 0,4 МПа. Каковы будут температура и давление, если газу сообщить количество теплоты 6 кДж?
33. При изобарическом расширении одного моля некоторого газа, занимавшего объем 12 л при давлении 0,2 МПа, было подведено к газу 2,75 кДж теплоты, при этом газ совершил работу 1,1 кДж. Определить: а) параметры газа в конечном состоянии; б) из какого числа атомов состоят молекулы газа.
34. Идеальный газ, занимающий объем 5 л и находящийся под давлением 0,2 МПа при температуре 290 К, был нагрет при постоянном объеме и затем расширился изобарически. Работа расширения при этом оказалась равной 200 Дж. На сколько нагрелся газ в изобарическом процессе?
35. При изобарическом расширении к одному киломолю одноатомного идеального газа подведено 2,5 МДж теплоты. Во сколько раз увеличился объем газа, если его начальная температура была 300 К?

36. Двухатомный газ первоначально имеет объем 50 л и его давление равно 0,3 МПа. Газ нагревают изохорически до тех пор, пока давление не удвоится. После этого газ изотермически расширяют до начального давления и, наконец, его изобарически охлаждают до первоначального объема. Определить в каждом процессе: а) работу, производимую газом; б) изменение его внутренней энергии; в) количество теплоты, получаемое газом.
37. Углекислый газ находится в баллоне вместимостью 20,5 л при температуре 0°C и давлении 0,5 МПа. Определить температуру и давление, если газ получит 12,5 кДж теплоты.
38. На нагревание кислорода массой $m = 160$ г на $\Delta T = 12$ К было затрачено количество теплоты $Q = 1,76$ кДж. Как протекал процесс: при постоянном объеме или постоянном давлении?
39. Водород массой $m = 10$ г нагрели на $\Delta T = 200$ К, причем газу было передано количество теплоты $Q = 40$ кДж. Найти изменение внутренней энергии водорода и совершенную им работу.
40. 1 кг водорода при температуре 27°C изотермически расширили до двойного объема, а затем изохорически охладили, уменьшив давление в 5 раз. Дать схему кривых в системе координат P, V . Подсчитать изменение внутренней энергии и совершенную газом работу.
41. В цилиндре под поршнем находится водород массой 0,02 кг при температуре 27°C. Водород сначала расширился адиабатически, увеличив свой объем в пять раз, а затем был сжат изотермически, причем объем газа уменьшился в пять раз. Найти температуру в конце адиабатического расширения и полную работу, совершенную газом. Изобразить процесс графически.
42. При адиабатическом увеличении объема кислорода в 10 раз его внутренняя энергия уменьшилась на 42 кДж. Начальная температура кислорода 280 К. Найти массу кислорода.
43. Углекислый газ CO_2 , начальная температура которого 360 К, адиабатически сжимается до $1/20$ своего первоначального объема. Определить изменение внутренней энергии и совершенную при этом работу, если масса газа 20 г.
44. Некоторая масса азота при давлении 0,1 МПа имеет объем 5 л, а при давлении 0,3 МПа – объем 2 л. Переход от первого состояния ко второму был произведен в два этапа: а) сначала по адиабате, затем по изохоре; б) сначала по изохоре, затем по адиабате. Определить изменение внутренней энергии, количество полученной или отданной теплоты и произведенную работу.
45. Автомобильная шина накачана до давления 220 кПа при температуре 290 К. Во время движения она нагрелась до температуры 330 К и лопнула. Считая процесс, происходящий после повреждения шины, адиабатическим, определить изменение температуры вышедшего из нее воздуха. Внешнее давление воздуха равно 100 кПа.

46. Азот массой 2 г, имевший температуру 300 К, был адиабатически сжат так, что его объем уменьшился в 10 раз. Определить конечную температуру газа и работу сжатия.
47. При адиабатическом сжатии кислорода массой 20 г его внутренняя энергия увеличилась на 8 кДж и температура повысилась до 900 К. Найти: 1) повышение температуры; 2) конечное давление газа, если начальное давление 200 кПа.
48. Два идеальных газа, занимающих один и тот же начальный объем при одинаковом начальном давлении, внезапно подвергаются адиабатному сжатию, каждый до половины его первоначального объема. Найти отношение работ, необходимых для сжатия, если первый газ одноатомный, второй двухатомный.
49. Воздух, находившийся под давлением 100 кПа, был адиабатически сжат до давления 1 МПа. Найти давление, которое установится, когда сжатый воздух, сохраняя объем неизменным, охладится до первоначальной температуры. Начертить график процесса. Воздух считать двухатомным газом.
50. Из баллона, содержащего водород под давлением 1 МПа при температуре 300 К, выпустили половину находившегося в нем газа. Определить конечную температуру и давление, считая процесс адиабатическим.
51. Коэффициент полезного действия цикла Карно $\eta = 0,3$. При изотермическом расширении газ получил от нагревателя 200 Дж энергии. Определить работу, совершаемую при изотермическом сжатии.
52. Температура нагревателя в 3 раза выше температуры холодильника. Какую часть энергии, полученной в цикле Карно от нагревателя, газ отдает холодильнику?
53. Идеальный многоатомный газ совершает цикл, состоящий из двух изохор и двух изобар, причем наибольший объем в четыре раза больше наименьшего, а наибольшее давление газа в два раза больше наименьшего. Определить термический КПД цикла.
54. При совершении цикла Карно газ получил от нагревателя количество теплоты 16,77 кДж и совершил 5,59 кДж работы. Во сколько раз температура нагревателя выше температуры холодильника?
55. Газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя 200 °С, охладителя 10 °С. При изотермическом расширении газ совершает работу, равную 100 Дж. Определить термический КПД цикла, а также количество теплоты, которое газ отдал охладителю при изотермическом сжатии.
56. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя равна 470 К, температура холодильника равна 280 К. При изотермическом расширении газ совершает работу 100 Дж. Определить термический КПД цикла, а также количество теплоты, которое газ отдает холодильнику при изотермическом сжатии.
57. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя в три раза выше температуры охладителя. Нагреватель передал газу количество теплоты 42 кДж. Какую работу совершил газ?

58. Наименьший объем V_1 газа, совершающего цикл Карно, равен 153 л. Определить наибольший объем V_3 , если объем V_2 в конце изотермического расширения и объем V_4 в конце изотермического сжатия равны соответственно 600 л и 189 л.

59. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя в четыре раза выше температуры холодильника. Какую долю количества теплоты, получаемого за один цикл от нагревателя, газ отдает холодильнику?

60. Идеальный двухатомный газ совершает цикл Карно. Объем газа в конце изотермического расширения V_2 и объем газа в конце адиабатического расширения V_3 соответственно равны 12 л и 16 л. Найти термический КПД цикла.

61. Как изменится коэффициент внутреннего трения (динамическая вязкость) двухатомного газа, состояние которого далеко от вакуума, при уменьшении объема в 2 раза, если процесс перехода был: 1) изотермическим; 2) изобарическим; 3) адиабатическим?

62. Определить минимальное давление, при котором теплопроводность воздуха, заключенного между двойными стенками сосуда, еще не зависит от давления. Расстояние между стенками 5 мм, температура 15°C .

63. Коэффициенты диффузии и внутреннего трения водорода при некоторых условиях равны соответственно $D = 1,4 \text{ см}^2/\text{с}$ и η с. Определить: а) число молекул водорода в одном м^3 при этих условиях; в) коэффициент теплопроводности.

64. Диск подвешен на упругой нити над другим вращающимся диском на расстоянии 1 см. Частота вращения нижнего диска 8 об/с, радиусы дисков 10 см, модуль кручения нити 10^{-5} м/рад, коэффициент внутреннего трения воздуха η с. Определить угол поворота верхнего диска. Краевыми эффектами пренебречь. Движение воздуха между дисками считать ламинарным.

65. Определить зависимость коэффициента внутреннего трения от давления при следующих процессах: 1) изотермическом; 2) изохорическом. Изобразить эти зависимости на графиках.

66. Два горизонтальных диска радиусами 20 см расположены друг над другом так, что оси их совпадают. Расстояние между плоскостями дисков равно 0,5 см. Верхний диск неподвижен, нижний вращается относительно геометрической оси с частотой 10 с^{-1} . Найти вращающий момент, действующий на верхний диск. Коэффициент внутреннего трения воздуха η с.

67. Найти зависимость коэффициента теплопроводности от температуры T при следующих процессах: 1) изобарическом; 2) изохорическом. Изобразить эти зависимости на графиках.

68. Кислород и азот имеют одинаковые температуру и давление. Определить для этих газов: 1) отношение их коэффициентов внутреннего трения; 2) отношение коэффициентов теплопроводности.

69. Найти зависимость коэффициента теплопроводности от температуры при следующих процессах: 1) изобарическом; 2) изохорическом. Изобразить эти зависимости на графиках.
70. Коэффициент внутреннего трения кислорода при нормальных условиях равен η с. Определить: 1) длину свободного пробега молекул; 2) эффективный диаметр молекул.
71. В сосуде вместимостью 10 л находится азот массой 0,25 кг. Определить: 1) внутреннее давление газа; 2) собственный объем молекул.
72. В сосуде объемом 8 л находятся 0,3 кг кислорода при температуре 27 °С. Какую часть давления газа составляет давление, обусловленное силами притяжения молекул? Какую часть объема сосуда составляет собственный объем молекул?
73. 1 моль кислорода занимает объем 0.5 л при температуре 300 К. Определить давление газа, пользуясь уравнением Ван-дер-Ваальса. Сравнить полученный результат с давлением, вычисленным по уравнению Менделеева - Клапейрона.
74. Давление кислорода, имеющего плотность 100 кг/м³, составляет 7 МПа. Определить внутреннее давление и температуру газа, пользуясь уравнениями Ван-дер-Ваальса и Менделеева - Клапейрона.
75. В сосуде объемом 0,3 л находится углекислый газ, содержащий количество вещества $\nu = 1$ моль при температуре 300 К. Определить давление газа: 1) по уравнению Ван-дер-Ваальса. 2) по уравнению Менделеева-Клапейрона.
76. Вычислить температуру, при которой давление кислорода, имеющего плотность 100 кг/м³, равно 7 МПа. Сравнить с идеальным газом.
77. Какую температуру имеют 2 г азота, занимающего объем 820 см³ при давлении в 0,2 МПа? Газ рассматривать как: 1) идеальный; 2) реальный.
78. В закрытом сосуде вместимостью 0,5 м³ находится 0,6 кмоль углекислого газа при давлении 3 МПа. Во сколько раз надо увеличить температуру газа, чтобы давление увеличилось вдвое? Использовать уравнение Ван-дер-Ваальса.
79. 10 г гелия занимают объем 100 см³ при давлении 100 МПа. Определить внутреннее давление и температуру газа, пользуясь уравнениями Ван-дер-Ваальса и Менделеева-Клапейрона.
80. 1 кмоль углекислого газа находится при температуре 100 °С. Найти давление газа, пользуясь уравнениями Ван-дер-Ваальса и Менделеева-Клапейрона. Задачу решить для объемов:
1) $V_1 = 1 \text{ м}^3$; 2) $V_2 = 0,05 \text{ м}^3$.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица №2

Поправки Ван-дер-Ваальса

Газ	$a, \text{Н}\cdot\text{м}^4/\text{моль}^2$	$b, 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}$
Азот	0,135	3,86
Гелий	0,0033	2,34
Кислород	0,136	3,17
Углекислый газ	0,361	4,28

Таблица № 3

Эффективный диаметр молекулы

Газ	Диаметр, нм
Азот	30
Водород	23
Кислород	27

Литература

1. А.А Детлаф., Б.М Яворский., Курс физики (учебное пособие для вузов).- М.: Высшая школа, 2000.
2. Р.Г Геворкян. Курс физики (учеб. пособие для вузов). - М.: Высш. шк.,1979.
3. Г.А Зисман., О.М. Годес. Курс общей физики.(учеб. пособие в 3-х т.). – М.: Наука, 1974.
4. И.В. Савельев. Курс общей физики (учеб. пособие для вузов в 5-ти книгах, 4-ое издание, переработанное) – М.:Наука, 1998.
5. Т.И. Трофимова. Курс физики (учеб. пособие для студентов вузов). - М.: Высш. шк.,2002.
6. А.Г. Чертов, А.А. Воробьев. Задачник по физике (учеб. пособие для вузов). - М.: Физматлит, 2002.

Оглавление

Рекомендации к выполнению контрольной работы	3
1. Молекулярное строение вещества	4
2. Уравнение состояния идеального газа	5
3. Молекулярно – кинетическая теория идеальных газов	7
4. Теплємкости идеального газа	9
5. Первое начало термодинамики. Применение его к газовым законам	10
6. Тепловая машина. Цикл Карно	14
7. Явления переноса	15
8. Реальные газы	17
Задачи к контрольной работе	19
Приложение	26
Рекомендуемая литература	27

Филимоненкова Людмила Васильевна
Корельская Анна Геннадьевна

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА
Методические указания
к выполнению контрольного задания №2
для студентов-заочников
инженерно-технических специальностей

Компьютерная верстка Филина Т.М.