

# **ФИЗИКА**

## **МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА**

*Методические указания к самостоятельной работе  
для студентов бакалавриата и специалитета  
всех направлений*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2019**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра общей и технической физики

# ФИЗИКА

## МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

*Методические указания к самостоятельной работе  
для студентов бакалавриата и специалитета  
всех направлений*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2019

УДК 536.7 (073)

**ФИЗИКА. Молекулярная физика и термодинамика:** Методические указания к самостоятельной работе / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *В.В. Фицак, Н.Н. Смирнова*. СПб, 2019. 56 с.

Приведено 20 вариантов по 5 заданий в каждом. Варианты заданий разработаны в соответствии с требованиями к уровню подготовки бакалавров и специалистов всех направлений и форм обучения.

Индивидуальные задания также могут быть использованы преподавателями для промежуточного контроля знаний студентов и для самостоятельной работы студентов других инженерно-технических специальностей.

Научный редактор проф. *А.С. Мустафаев*  
Рецензент доц. *Н.И. Егорова* (Санкт-Петербургский университет МЧС России)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Физика» является одной из основных фундаментальных учебных дисциплин и составляет основу теоретической подготовки инженеров и бакалавров.

Изучение курса физики способствует: формированию у студентов подлинно научного физического мировоззрения и развитию научного стиля мышления; развитию способностей ориентироваться в потоке научной и технической информации, анализировать и применять в конкретных областях техники будущей профессиональной деятельности физические принципы и методы.

Контрольные работы и контроль приобретенных навыков (проверка и защита) являются частью фондов оценочных средств и методов контроля, позволяющие оценить знания, умения и уровень приобретаемых студентами компетенций.

Выполнение студентами контрольных работ, сопровождающееся самостоятельным чтением учебной, учебно-методической и справочной литературы это неотъемлемая часть образовательных технологий.

Путём освоения приемов и методов решения конкретных задач из различных областей физики происходит развитие познавательных и творческих способностей студентов формирование умения выделить конкретное физическое содержание в прикладных физических задачах их будущей деятельности.

Студент, выполняя контрольные работы, *должен изучить и уметь использовать:*

основные понятия, законы и модели классической механики, методы расчета и численной оценки величин, характерных для данного раздела естествознания, методы теоретических исследований в физике (физико-математический анализ, синтез, абстрагирование, идеализация, обобщение и ограничение, аналогия и др.).

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ

Для студентов очной формы обучения самостоятельная работа является одной из форм образовательной технологии.

К выполнению контрольных заданий целесообразно приступать только после изучения теоретического и методического материала, соответствующего данному разделу программы.

*При самостоятельной работе над учебным материалом необходимо:*

- изучать курс физики систематически в течение всего учебного процесса, так как в противном случае материал будет усвоен поверхностно.
- внутри определенного раздела курса физики рекомендуется пользоваться каким-то одним учебником или учебным пособием (или ограниченным числом), чтобы не утрачивалась логическая связь между отдельными вопросами.
- проработать лекционный материал и соответствующие разделы учебника, учебного пособия и методических указаний.
- ознакомиться и проработать задачи, представленные в разобранных примерах данных методических указаний и в рекомендуемой учебной литературе.
- составить конспект, в котором записывать законы и формулы, выражающие эти законы; определения основных физических понятий и сущность физических явлений.
- для самоконтроля правильности усвоения теоретического материала рекомендуется ответить на контрольные вопросы, предложенные в рекомендуемой учебно-методической литературе.

### 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

#### *Рекомендации к решению и оформлению контрольных задач*

Выписать отдельно величины данные в условии задачи и величины, которые необходимо определить.

Числовые значения физических величин должны быть переведены в международную систему единиц измерений (СИ).

Выполнить рисунок или начертить схему (если требуется для решения задачи), сопровождая их пояснениями.

Окончательный результат представить в общем виде, т.е. преобразовать выражение для определяемой величины так, чтобы в него входили лишь буквенные обозначения величин, заданных в условии задачи или введенных самостоятельно, а также необходимые физические константы.

Не производить промежуточных вычислений физических величин.

Выполнить проверку размерности, т.е. убедиться в правильности размерности искомой величины, подставив обозначения единиц измерения в окончательную формулу.

Подставить числовые значения, выраженные в единицах СИ, в окончательную формулу и произвести вычисления, используя (где это необходимо) правила приближенных вычислений.

Ответ задачи в общем виде и числовое значение искомой величины с обязательным указанием размерности записать отдельно после решения, предвзяя словом «Ответ:» и указать номер одного из представленных пяти вариантов ответов, в некоторых заданиях может быть больше пяти.

В настоящем разделе даны основные формулы, используемые студентом при изучении вопросов молекулярной физики и термодинамики, примеры решения и оформления контрольных задач, контрольные задания.

*При решении задач раздела «Молекулярная физика и термодинамика»:*

- обратить внимание на то, что в газовых законах используется только абсолютная (термодинамическая) температура

и прежде, чем решать задачу значения температуры по шкале Цельсия следует пересчитать в значения по шкале Кельвина;

- помнить, что молярные массы газов определяют с помощью таблиц, в которых указаны относительные атомные массы элементов, и поэтому, прежде всего, нужно установить, сколько атомов входит в состав его молекулы;

- задачи, в которых рассматриваются два или несколько состояний газа постоянной массы необходимо решать по уравнению объединенного газового закона;

- задачи, в условии которых указана масса газа или речь идет о процессах, в которых масса газа изменяется, необходимо решать, используя уравнения состояния идеального или реального газа;

- если в процессе взаимодействия тел работа не совершается, то есть имеет место только явление теплообмена, то необходимо составить уравнение теплового баланса, учитывая все виды тепла полученного и отданного системой, включая и фазовые превращения;

- если рассматриваемый процесс протекает с совершением механической работы, то для составления расчетного уравнения используют закон сохранения и превращения энергии (первого закона термодинамики);

- обратить внимание на то, что изменение внутренней энергии не зависит от термодинамического процесса, а определяется изменением параметров газа в начальном и конечном состояниях;

- помнить, что если работа имеет отрицательный знак, внешние силы совершают над газом работу, и если количество теплоты имеет отрицательный знак, то газ отдает тепло внешним телам;

- циклические процессы, состоящие из изопроцессов, целесообразно проводить с использованием графического метода. Он позволяет производить геометрическое толкование работы и упрощает вычисление КПД цикла;

- задачи на изменение энтропии решать с помощью соответствующих формул, а для определения параметров состояния

$V$  и  $T$ , входящих в эти формулы, использовать уравнение состояния идеального газа.

***Требования к оформлению контрольных работ и порядок их представления на рецензию для студентов заочной формы обучения***

Работа выполняется чернилами в обычной тетради.

На титульном листе указать фамилию и инициалы студента, шифр и домашний адрес, наименование дисциплины, номер контрольной работы.

Условия задач своего варианта переписывать полностью.

Каждую задачу начинать на новой странице.

Исходные данные задачи можно выписать отдельно.

Для замечаний рецензента оставлять поля.

Указать список учебной литературы, используемой при выполнении контрольной работы.

Выполненные контрольные работы должны быть высланы студентом - заочником по почте или лично переданы в деканат заочного отделения в сроки, указанные в учебном плане.

После получения рецензии на контрольную работу студент обязан учесть замечания рецензента и внести исправления в работу.

Если контрольная работа не зачтена, студент должен заново решить те задачи, по которым были получены ошибочные результаты, и представить контрольную работу на повторное рецензирование.

Зачтенные контрольные работы предъявляются преподавателю кафедры физики и до экзамена студент-заочник должен дать пояснения к решению задач.

В контрольные работы включены задачи четырёх разделов:

1. Физические основы механики;
2. Молекулярная физика и термодинамика;
3. Электричество и магнетизм;
4. Элементы физической оптики, квантовой физики атомов, молекул и твёрдых тел.



#### 4. ПРОГРАММА РАЗДЕЛА МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

*Методы исследований.* Статистические и термодинамические методы исследования макроскопических явлений. Термодинамическая система. Параметры состояния. Идеальный газ. Равновесное и неравновесное состояния и процессы.

*Элементы молекулярно-кинетической теории.* Идеальный газ как молекулярно-кинетическая модель реальных газов. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов. Средняя кинетическая энергия поступательного движения одноатомной молекулы и ее связь с температурой. Число степеней свободы и средняя энергия многоатомной молекулы.

*Законы идеального газа.* Закон Дальтона. Уравнение состояния идеального газа.

*Статистические распределения.* Распределение молекул газа по скоростям. Функция распределения. Распределение Максвелла. Вероятностный характер закона распределения. Наиболее вероятная, средняя арифметическая и средняя квадратичная скорости молекул. Распределение молекул по значениям кинетической энергии поступательного движения. Изменения концентрации частиц с высотой. Распределение Больцмана. Распределение Максвелла-Больцмана. Барометрическая формула.

*Законы термодинамики.* Работа, совершаемая газом при изменении объема. Внутренняя энергия. Первый закон термодинамики. Внутренняя энергия и теплоемкость идеального газа. Второе начало термодинамики. Энтропия. Необратимые процессы. Изменение энтропии при необратимых процессах. Статистический смысл второго начала термодинамики. Связь энтропии и вероятности состояния. Термодинамические функции. Третье начало термодинамики. Теорема Нернста.

*Циклы.* Термодинамический цикл. Круговые процессы. Коэффициент полезного действия тепловой машины. Цикл Карно.

*Явления переноса. Элементы неравновесной термодинамики.* Неравновесные состояния и процессы. Столкновения между молекулами. Эффективный диаметр молекулы. Средняя длина свободного пробега. Тепловое движение и связанный с ним перенос массы, импульса и энергии. Диффузия, вязкость и теплопроводность в газах. Экспериментальные законы диффузии, вязкости и теплопроводности; элементы молекулярно-кинетической теории явлений переноса.

*Реальные газы, жидкости и твёрдые тела.* Размеры молекул. Взаимодействие молекул. Реальные газы. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Изотермы Ван-дер-Ваальса. Внутренняя энергия реального газа. Свойства жидкостей. Твёрдые тела.

*Основные закономерности агрегатных состояний и фазовых переходов.* Критическое состояние. Критические параметры. Агрегатные состояния вещества. Понятие фазы. Область однофазных и двухфазных состояний. Условие равновесия фаз. Тройная точка.

## **5. УЧЕБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ЗАДАЧИ ДЛЯ ВАРИАНТОВ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ**

В настоящем разделе даны основные формулы, используемые студентом при изучении молекулярной физики и термодинамики, примеры решения и оформления контрольных задач, задачи для выполнения вариантов контрольных работ.

### **5.1. Элементы молекулярно-кинетической теории**

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов

$$P = \frac{2}{3} n \langle \varepsilon_n \rangle$$

где  $\langle \varepsilon_n \rangle$  – средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы,  $P$ ,  $n$  – давление и концентрация газа.

$$\langle \varepsilon_n \rangle = \frac{3}{2} kT$$

$k$  – постоянная Больцмана.

Средняя полная кинетическая энергия молекулы

$$\langle \varepsilon_k \rangle = \frac{i}{2} kT$$

где  $i$  – число степеней свободы молекулы.

Скорости молекул газа: средняя квадратичная, средняя арифметическая и наиболее вероятная соответственно

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}};$$

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}};$$

$$v_{\text{в}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}$$

где  $m_0$  – масса одной молекулы,  $T$  – термодинамическая температура,

Относительная молекулярная масса вещества

$$M_r = \sum n_i A_{r,i}$$

где  $n_i$  – число атомов  $i$ -го химического элемента, входящих в состав молекулы данного вещества;  $A_{r,i}$  – относительная атомная масса этого элемента.

Молярная масса вещества

$$M = m / \nu$$

где  $m$  – масса однородного тела (системы),  $\nu$  – количество вещества этого тела.

Количество вещества тела (системы)

$$\nu = N / N_A$$

где  $N$  – число структурных элементов (молекул, атомов, ионов и т.п.), составляющих тело (систему);  $N_A$  – постоянная Авогадро,  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>.

Молярная масса  $M$  связана с относительной молекулярной массой вещества соотношением

$$M = M_r \cdot k$$

где  $k = 10^{-3}$  кг/моль.

Количество вещества смеси газов

$$v = v_1 + v_2 + \dots + v_n = N_1/N_A + N_2/N_A + \dots + N_n/N_A$$

$$\text{или } v = \frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \dots + \frac{m_n}{M_n},$$

где  $v_i$ ,  $N_i$  и  $M_i$  – соответственно количество вещества, число молекул и молярная масса  $i$ -го компонента смеси.

Молярная масса смеси газов

$$M = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{v_1 + v_2 + \dots + v_n}$$

где  $m_i$  – масса  $i$ -го компонента смеси;  $v_i = m_i/M_i$  – количество вещества  $i$ -го компонента смеси;  $i$  – число компонентов смеси.

Массовая доля  $i$ -го компонента смеси газа (в долях единицы или процентах)

$$\omega_i = m_i / m$$

где  $m$  – масса смеси.

Концентрация молекул

$$n = \frac{N}{V} = \frac{N_A \rho}{M}$$

где  $N$  – число молекул, содержащихся в данной системе;  $\rho$  – плотность вещества.

## 5.2. Законы идеального газа

Давление смеси газов (закон Дальтона).

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n,$$

где  $P_i$  – парциальные давления компонентов смеси;  $n$  – число компонентов смеси.

Парциальным давлением называется давление газа, которое производил бы этот газ, если бы только он один находился в сосуде, занятом смесью.

Объединенный газовый закон ( $m = \text{const}$ )

$$\frac{PV}{T} = \text{const или } \frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

где  $P_1, V_1, T_1$  – соответственно давление, объем и температура газа в начальном состоянии;  $P_2, V_2, T_2$  – те же параметры в конечном состоянии.

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

$$PV = \frac{m}{M} RT = \nu RT$$

Уравнения состояния идеального газа в другой математической форме записи

$$P = nkT$$

Здесь  $\nu$  – количество вещества,  $V$  – объём,  $m$  – масса газа,  $R$  – *универсальная газовая постоянная* – физическая величина, характеризующая работу одного моля газа при его изобарном нагревании на один Кельвин.  $R = 8,31$  Дж/(моль·К).

### 5.3. Статистические распределения

Скорости молекул газа имеют различные значения и направления. Число молекул  $dN$ , скорости которых лежат в узких интервалах между  $\nu$  и  $\nu + d\nu$ , пропорционально общему числу молекул  $N$ , ширине интервала  $d\nu$  и зависит от скорости  $\nu$ .

Функция распределения Максвелла по скоростям

$$\begin{aligned} F(\nu) &= f(\nu)4\pi\nu^2 = \\ &= \left(\frac{m_0}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{m_0\nu^2}{2kT}\right)4\pi\nu^2; \\ f(\nu) &= \left(\frac{m_0}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{m_0\nu^2}{2kT}\right), \end{aligned}$$

где  $m_0$  – масса молекулы газа;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – термодинамическая температура;  $v$  – скорость молекул.

Число молекул, величина скоростей которых лежит в интервале от  $v$  до  $v + dv$ ,

$$dN = Nf(v)4\pi v^2 dv,$$

где  $N$  – число молекул газа.

Функция распределения молекул идеального газа по относительным скоростям

$$f(u) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \exp(-u^2) u^2,$$

где  $u = v/v_B$ .

Число молекул, относительные скорости которых заключены в пределах от  $u$  до  $u + du$ ,

$$dN(u) = Nf(u)du = \frac{4N}{\sqrt{\pi}} \exp(-u^2) u^2 du.$$

Распределение Больцмана молекул во внешнем потенциальном поле

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{E_p}{kT}\right),$$

где  $n$  – концентрация молекул, обладающих потенциальной энергией  $E_p$ ;  $n_0$  – концентрация молекул с нулевой потенциальной энергией.

Количество молекул, попадающих в объем  $dV = dx dy dz$  с координатами  $x, y, z$

$$dN = n_0 \exp\left(-\frac{E_p(x, y, z)}{kT}\right) dx dy dz.$$

Распределение Максвелла – Больцмана записывается в виде

$$dN = n_0 \left(\frac{m_0}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_p + \frac{m_0 v^2}{2}}{kT}\right) dv_x dv_y dv_z dx dy dz,$$

где  $dv_x, dv_y, dv_z$  – интервалы изменения компонентов скоростей.

Распределение давления в однородном поле силы тяжести (барометрическая формула) имеет вид

$$P = P_0 \exp[-m_0gz / (kT)]$$

или

$$P = P_0 \exp[-Mgz / (RT)],$$

где  $z$  – координата (высота) точки по отношению к уровню принятому за нулевой;  $P_0$  – давление на этом уровне;  $g$  – ускорение свободного падения;  $R$  – газовая постоянная;  $M$  – молярная масса газа.

#### 5.4. Законы термодинамики и термодинамические процессы

Первое начало термодинамики.

Интегральная форма

$$Q = \Delta U + A$$

где  $Q$  – количество теплоты, подводимое к системе;  $\Delta U$  – изменение внутренней энергии;  $A$  – работа системы против внешних сил.

Дифференциальная форма

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

или

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

где  $dU$  – изменение внутренней энергии,  $\delta A$  – элементарная работа, совершаемая системой,  $\delta A'$  – элементарная работа, совершаемая внешними силами,  $\delta Q$  – элементарное количество теплоты, переданное системе.

Работа системы против внешних сил

$$A = \int_{V_1}^{V_2} P dV,$$

Внутренняя энергия идеального газа

$$U = N \langle \varepsilon \rangle,$$

где  $\langle \varepsilon \rangle$  - средняя кинетическая энергия молекулы,  $N$  – количество молекул газа;  $\nu$  - количество вещества.

Изменение внутренней энергии

$$\Delta U = \frac{miR\Delta T}{2M} = \nu \cdot C_V \Delta T ,$$

где  $V_1$  и  $V_2$  – начальный и конечный объемы газа;  $m$  – масса газа  $M$  – молярная масса;  $i$  – число степеней свободы;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $\Delta T$  – изменение температуры.

Уравнение адиабаты (уравнение Пуассона)

$$pV^\gamma = const .$$

Показатель адиабаты

$$\gamma = \frac{c_p}{c_V} = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i} .$$

Молярная теплоемкость

$$C = \delta Q / dT ,$$

где  $C_p$  и  $C_V$  – изобарная и изохорная молярные теплоемкости.

При  $C = const$ . Процесс называется политропическим.

Уравнение политропы

$$pV^n = const ,$$

где  $n$  – показатель процесса,  $(-\infty) < n < (+\infty)$ .

Для изохорного процесса  $n = \pm\infty$ , изобарного  $n = 0$ , изотермического  $n = 1$ , адиабатного  $n = C_p / C_V = \gamma$ .

Молярная и удельная теплоемкости связаны соотношением

$$C = M c ,$$

где  $c$  – удельная теплоемкость.

Молярные теплоемкости при постоянном объеме и постоянном давлении соответственно равны

$$C_V = iR/2; \quad C_p = (i + 2)R/2.$$

Уравнение Майера

$$C_p - C_V = R.$$

Внутренняя энергия реального газа



$$U = v \left( C_V T - \frac{a}{V_m} \right).$$

Формулировки второго закона термодинамики в виде неравенства (Р. Клаузиус)

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

Здесь знак равенства справедлив для *равновесных (обратимых)* процессов.

Изменение энтропии тела в любом обратимом процессе, переводящем его из состояния 1 в состояние 2

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T},$$

где  $\delta Q$  – элементарное количество теплоты, полученное телом при температуре  $T$ .

## 5.5. Циклы

Термический КПД тепловой машины

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

КПД цикла Карно (обратимый цикл, состоящего из двух изотерм и двух адиабат).

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

где  $A$  – работа, совершаемая рабочим веществом в течение цикла;  $Q_1$  – количество теплоты, полученное за это время от нагревателя рабочим телом;  $Q_2$  – количество теплоты, переданное рабочим телом охладителю (холодильнику).  $T_1$  и  $T_2$  – температура нагревателя и охладителя соответственно.

В реальных тепловых машинах КПД ограничен *неравенством Карно*

$$\eta \leq 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

## 5.6. Явления переноса

К явлениям переноса относятся теплопроводность, внутреннее трение (или вязкость) и диффузия.

Явления переноса с точки зрения молекулярно-кинетической теории характеризуются уравнениями переноса.

**Таблица 1**

*Эмпирические уравнения явлений одномерного переноса.*

Явление	Переносимая физическая величина	Основной закон явления переноса	Формула коэффициента переноса
Диффузия	Масса	Закон Фика $m_y = -D \frac{d\rho}{dx}$	$D = \frac{1}{3} \langle u \rangle \langle \lambda \rangle$
Внутреннее трение	Импульс направленного движения	Закон Ньютона $\tau = \eta \frac{dv}{dx}$	$\eta = \frac{1}{3} \langle u \rangle \langle \lambda \rangle$
Теплопроводность	Внутренняя энергия	Закон Фурье $q = -K \frac{dT}{dx}$	$K = \frac{1}{3} \rho c v \langle u \rangle \langle \lambda \rangle$

где  $m_y$  – удельный поток массы;  $\tau$  – напряжение сдвига;  $q$  – плотность теплового потока;  $\rho$  – плотность газа,  $\rho = m_0 n$ ;  $m_0$  – масса молекулы;  $n$  – концентрация молекул;  $D$  – коэффициент

диффузии;  $\eta$  – динамическая вязкость или коэффициент внутреннего трения;  $K$  – коэффициент теплопроводности.

Напряжение сдвига

$$\tau = \frac{dF_{\parallel}}{dS},$$

где  $dF_{\parallel}$  – сила трения, направленная по касательной к поверхности слоя площадью  $dS$ ;  $d\nu$  – изменение скорости течения газа (жидкости) на расстоянии  $dx$  в направлении по нормали  $\vec{n}$  к поверхности слоя.

Среднее число соударений, испытываемых одной молекулой газа в единицу времени,

$$\langle Z \rangle = \sqrt{2}\pi d^2 n \langle \nu \rangle,$$

где  $d$  – эффективный диаметр молекул;  $\langle \nu \rangle$  – средняя скорость молекул,  $n$  – концентрация молекул.

Средняя длина свободного пробега молекул газа

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

Средняя продолжительность свободного пробега

$$\langle t \rangle = 1 / \langle Z \rangle.$$

Эффективное сечение молекулы  $\sigma = \pi d^2$ .

где  $d$  – эффективный диаметр молекул;  $\langle \nu \rangle$  – средняя скорость молекул;  $c_V$  – удельная теплоемкость.

Коэффициенты вязкости, диффузии и теплопроводности связаны соотношениями  $\eta = \rho D$ ;  $\eta = K / c_V$ .

Эффективный диаметр молекул

$$d = \sqrt{1 / (\sqrt{2}\pi n_0 \langle \lambda \rangle)}.$$

Так как  $n_0 = \rho / m_0 = \rho N_A / M$ , то

$$d = \sqrt{M / (\sqrt{2}\pi N_A \rho \langle \lambda \rangle)}.$$

## 5.7. Реальные газы, жидкости и твёрдые тела

*Уравнение состояния реального газа* (уравнение Ван-дер-Ваальса):

для одного моля газа

$$\left( P + \frac{a}{V_0^2} \right) (V_0 - b) = RT ,$$

для произвольной массы реального газа

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

где  $V_0$  – объем одного моля газа,  $\frac{a}{V_0^2}$  – внутреннее давление,

обусловленное силами взаимного притяжения между молекулами,  $b$  – поправка на собственный объем молекул, учитывающая действие сил отталкивания между молекулами и равная учетверенному объему молекул, содержащихся в одном моле газа.

Величины  $a$  и  $b$  связаны с параметрами критического состояния газа  $P_{\kappa}$ ,  $V_{\text{ок}}$  и  $T_{\kappa}$ :

$$b = \frac{1}{3} V_{\text{ок}}, \quad a = \frac{9}{8} RT_{\kappa} V_{\text{ок}},$$

$$V_{\text{ок}} = 3b, \quad P_{\kappa} = \frac{a}{27b^2}, \quad T_{\kappa} = \frac{8a}{27Rb}.$$

Если молярный объем  $V_M \gg b$  и  $\frac{a^2}{V^2} \ll P$ , то уравнение

Ван-дер-Ваальса переходит в уравнение состояния идеального газа.

**Пример 1.** В закрытом баллоне находится смесь из водорода ( $m_1 = 8$  г) и кислорода ( $m_2 = 0,5$  г) при давлении  $P_1 = 2,35 \cdot 10^5$  Па. Между газами происходит реакция с образованием водяного пара.

Какое давление  $P$  установится в баллоне после охлаждения до первоначальной температуры? Конденсации пара не происходит.

**Решение.** Определим количество вещества водорода и кислорода, которые находились в смеси:

$$v_1 = \frac{m_1}{M_{\text{H}_2}}; \quad v_2 = \frac{m_2}{M_{\text{O}_2}}.$$

В соответствии с уравнением реакции  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ , в реакцию вступает весь водород и половина кислорода. В результате реакции образуется количество вещества водяного пара

$$v_3 = v_1 = \frac{m_1}{M_{\text{H}_2}}$$

и останется количество вещества кислорода

$$v_4 = 0,5v_2 = \frac{0,5m_2}{M_{\text{O}_2}}.$$

В соответствии с уравнением Менделеева - Клапейрона:

в состоянии до реакции  $P_1V = (v_1 + v_2)RT$ ,

в состоянии после реакции  $PV = (v_3 + v_4)RT$ .

Отсюда давление газа после охлаждения

$$P = P_1 \frac{v_3 + v_4}{v_1 + v_2} = P_1 \frac{m_1 M_{\text{O}_2} + 0,5m_2 M_{\text{H}_2}}{m_1 M_{\text{O}_2} + m_2 M_{\text{H}_2}}.$$

Проверка размерности:

$$[P] = \text{Па} \cdot \frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{кг}}}{\text{кг} \cdot \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{кг}}} = \text{Па}.$$

Подставив числовые значения, получим

$$P = 2,35 \cdot 10^5 \cdot \left( \frac{0,5 \cdot 32 + 0,5 \cdot 8 \cdot 2}{0,5 \cdot 32 + 8 \cdot 2} \right) \frac{10^{-6}}{10^{-6}} = 176 \cdot 10^3 \text{ Па}.$$

**Ответ:** после охлаждения в баллоне установится давление, равное  $176 \cdot 10^3$  Па.

**Пример 2.** Используя функцию распределения молекул идеального газа по относительным скоростям, определить число молекул, скорости которых меньше  $0,002 v_{\text{a}}$ , если в объеме газа содержится  $1,67 \cdot 10^{24}$  молекул.

**Решение.** Число молекул, относительные скорости которых заключены в пределах от  $u$  до  $u + du$ ,

$$dN(u) = Nf(u)du = \frac{4N}{\sqrt{\pi}} \exp(-u^2)u^2 du .$$

По условию задачи  $v = 0,002v_{\text{a}}$ , соответственно  $u = v/v_{\text{a}} = 0,002$ . Так как  $u \ll 1$ , то  $\exp(-u^2) \approx 1 - u^2$ . Пренебрегая  $u^2 \ll 1$ , можно записать

$$dN(u) = \frac{4N}{\sqrt{\pi}} u^2 du.$$

Проинтегрировав это выражение по  $u$  в пределах от 0 до  $u$ , найдем

$$\begin{aligned} \Delta N &= \frac{4N}{\sqrt{\pi}} \int_0^u u^2 du = \frac{4N}{3\sqrt{\pi}} u^3 = \\ &= \frac{4 \cdot 1,67 \cdot 10^{24} 0,002^3}{3\sqrt{3,14}} = 10^{16} \text{ молекул.} \end{aligned}$$

**Ответ:** искомое число молекул  $10^{16}$ .

**Пример 3.** Определить изменение энтропии 1 моль идеального газа в изобарном, изохорном и изотермическом процессах.

**Решение.** Так как эти процессы – квазистатические и обратимые, изменение энтропии можно получить непосредственно по формуле

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q_i}{T} ,$$

где  $dQ_M$  - элементарное количество теплоты, подведенное к 1 моль газа.

Для изобарного, изохорного и изотермического процессов соответственно

$$\Delta S_P = \int_{T_1}^{T_2} \frac{\delta Q_i}{T} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_P dT}{T} = C_P \ln \frac{T_2}{T_1} = C_P \ln \frac{V_2}{V_1};$$

$$\Delta S_V = \int_{T_1}^{T_2} \frac{\delta Q_i}{T} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_V dT}{T} = C_V \ln \frac{T_2}{T_1} = C_V \ln \frac{P_2}{P_1};$$

$$\Delta S_T = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 \frac{dA}{T} = \int_1^2 \frac{PdV}{T} = \int_{V_1}^{V_2} \frac{RTdV}{TV} = R \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Проверка размерности:

$$[\Delta S_P] = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \ln \frac{\text{М}^3}{\text{М}^3} = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}};$$

$$[\Delta S_V] = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \ln \frac{\text{Па}}{\text{Па}} = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}};$$

$$[\Delta S_T] = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \ln \frac{\text{М}^3}{\text{М}^3} = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

**Ответ:** изменение энтропии одного моля газа при изобарном, изохорном и изотермическом процессах соответственно

$$C_P \ln \frac{V_2}{V_1}, C_V \ln \frac{P_2}{P_1} \text{ и } R \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

## 6. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

### Вариант 1

#### Задание 1

В сосуде неизменного объема находится идеальный газ в количестве 2 моль. Как надо изменить абсолютную температуру сосуда с газом при выпуске из сосуда 1 моля газа, чтобы давление газа на стенки сосуда увеличилось в 2 раза?

1. Уменьшить в 2 раза..
2. Увеличить в 4 раза.
3. Уменьшить в 4 раза.
4. Увеличить в 2 раза.
5. Не изменять.

#### Задание 2

В трех сосудах находятся газы: водород, гелий, азот. Во всех сосудах газы адиабатически сжимаются до половины первоначального объема. У какого газа в результате сжатия будет наиболее высокая температура и у какого – наиболее низкая?

1. Наиболее высокая у  $H_2$ , наиболее низкая у He.
2. Наиболее высокая у  $H_2$ , наиболее низкая у  $N_2$ .
3. Наиболее высокая у He, наиболее низкая у  $H_2$ .
4. Наиболее высокая у He, наиболее низкая у  $N_2$ .
5. Наиболее высокая у  $N_2$ , наиболее низкая у  $H_2$ .
6. Наиболее высокая у  $N_2$ , наиболее низкая у He.
7. Наиболее высокая у  $H_2$ , одинаковая у He и  $N_2$ .
8. Наиболее низкая у  $H_2$ , одинаковая у He и  $N_2$ .
9. Наиболее высокая у He, одинаковая у  $H_2$  и  $N_2$ .
10. Среди ответов нет правильного.

#### Задание 3

Число степеней свободы у двухатомного газа с жёсткой связью равно ...

1. 1.
2. 3
3. 5.
4. 6.
5. 7.

#### Задание 4

К термодинамическим параметрам системы относятся ...



1. число степеней свободы, средняя скорость молекул и температура системы.
2. число степеней свободы, средняя скорость молекул и температура системы и давление.
3. число степеней свободы, средняя скорость молекул и температура системы, давление и объём.
4. число степеней свободы, средняя скорость молекул и давление.
5. температура, давление и объём.

### Задание 5

Используя закон для распределения молекул идеального газа по скоростям, найдите закон, выражающий распределение молекул

по относительным скоростям ( $u = \frac{v}{v_a}$ ).

$$1. f(u) = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi \cdot kT} \right)^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{mu^2}{2kT}\right);$$

$$2. f(u) = 4 \cdot \pi \cdot e^{-u^2} \cdot u^2;$$

$$3. f(u) = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi \cdot kT} \right)^{3/2} u^2 \cdot \exp\left(-\frac{mu^2}{2kT}\right);$$

$$4. f(u) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-u^2} \cdot u^2;$$

$$5. f(u) = \frac{4}{\sqrt{2\pi \cdot kT}} \cdot e^{-u^2} \cdot u^2.$$

## Вариант 2

### Задание 1

Алюминиевый цилиндр подвесили на крючок динамометра. Динамометр показал 2,7 Н. Какое количество вещества алюминия содержится в цилиндре? Молярная масса алюминия равна 0,027 кг/моль.

1. 10 моль.    2. 100 моль.    3.  $6 \cdot 10^{24}$  моль.  
 4. 0,00729 моль. 5. 0,1 моль.

### Задание 2

Из закона Больцмана о равномерном распределении энергии по степеням свободы молекул средняя энергия молекулы равна ...

1  $\frac{i}{2} \cdot k \cdot T$  . 2  $\frac{i}{2} \cdot p \cdot T$  . 3  $n \cdot k \cdot T$  . 4  $\frac{i}{2} \cdot R \cdot T$  . 5  $\nu \cdot k \cdot T$  .

( $i$  – число степеней свободы,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – термодинамическая температура).

### Задание 3

Воспользовавшись законом распределения идеального газа по относительным скоростям, определите, какая доля молекул кислорода, находящегося при температуре  $0^\circ\text{C}$ , имеет скорости от 100 до 110 м/с.

1. 0,2    2. 0,25    3. 0,4.    4. 0,5.    5. 0,75.

### Задание 4

По какой из приведённых формул можно рассчитать внутреннюю энергию  $U$  одноатомного газа ...

( $P$ ,  $V$ ,  $T$  – давление, объём и термодинамическая температура)

1  $\frac{2}{3} \cdot R \cdot T$  . 2  $\frac{3}{2} \cdot P \cdot T$  . 3  $\frac{3}{2} \cdot P \cdot V$  . 4  $\frac{1}{2} \cdot P \cdot V$  . 5  $\frac{3}{2} \cdot V \cdot T$  .

### Задание 5

Найти для газообразного азота при температуре 300 К отношение числа молекул с компонентами скорости вдоль оси  $x$  в интервале  $300 \pm 0,31$  м/с к числу молекул с компонентами скорости вдоль той же оси в интервале  $500 \pm 0,51$  м/с.

1. 0,5.    2. 1,5.    3. 2.    4. 2.    5. 1. 3.

### Вариант 3

#### Задание 1

Барометрическая формула имеет вид:

$$1. f(\vec{r})dV = \frac{n_0}{N} e^{-\frac{E_p(\vec{r})}{kT}} dV. \quad 2. dW(\vec{r}) = e^{-\frac{E_p(\vec{r})}{kT}} dV$$

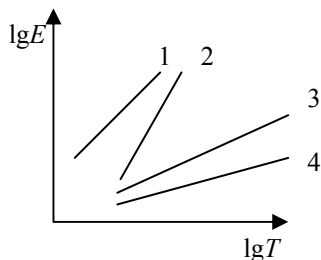
$$3. P(h) = P_0 e^{-\frac{mgh}{kT}} \quad 4. f(v) = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi \cdot kT} \right)^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right)$$

$$5. f(v) = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi \cdot kT} \right)^{3/2} v^2 \cdot \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right).$$

#### Задание 2

Какая из предоставленных на рис.1 прямых правильно представляет зависимость логарифма средней кинетической энергии молекул газа  $E$  от логарифма температуры газа  $T$ ?

1. На рис. нет правильной зависимости.
2. 2
3. 3.
4. 4.
5. 5.



#### Задание 3

Уравнение Майера имеет вид:

- 1  $C_V = C_P + R$ .
- 2  $R = C_P + C_V$ .
- 3  $C_P = C_V + k$ .
- 4  $C_P = C_V + R$ .
- 5  $C_V = C_P + k \cdot R$ .

( $C_V$  – теплоёмкость при постоянном объёме.  $C_P$  – теплоёмкость при постоянном давлении.  $R$  – универсальная газовая постоянная.  $k$  – постоянная Больцмана).

#### Задание 4

Определите давление, оказываемое газом на стенки сосуда, если его плотность равна  $0,01 \text{ кг/м}^3$ , а средняя квадратичная скорость молекул газа составляет  $480 \text{ м/с}$ .

1.  $0,768 \text{ Па}$ .
2.  $7,68 \text{ Па}$ .
3.  $768 \text{ МПа}$ .
4.  $768 \text{ кПа}$ .
5.  $768 \text{ Па}$ .

### Задание 5

Найти вероятность того, что при температуре 300 К молекулы азота имеют компоненты скорости вдоль осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  соответственно в интервале  $300 \pm 0,30$  м/с;  $400 \pm 0,40$  м/с;  $500 \pm 0,50$  м/с.

1. 0,7;
2. 1,7;
3.  $0,7 \cdot 10^{-11}$ ;
4.  $1,7 \cdot 10^{11}$ ;
5.  $1,7 \cdot 10^{-11}$ ;

### Вариант 4

#### Задание 1

Газ из начального состояния с давлением  $p_1$  и объемом  $V_1$  расширяется до объема  $V_2$ . Расширение происходит в одном случае изобарически, в другом изотермически, в третьем адиабатически. В каком случае газом произведена наибольшая работа и температура газа после расширения выше?

1. Работа и температура наибольшие при изобарическом процессе.
2. Работа и температура наибольшие при изобарическом и изотермическом процессах соответственно.
3. Работа и температура наибольшие при изобарическом и адиабатическом процессах соответственно.
4. Работа и температура наибольшие при изотермическом и изобарическом процессах соответственно.
5. Работа и температура наибольшие при изотермическом процессе.
6. Работа и температура наибольшие при изотермическом и адиабатическом процессах соответственно.
7. Работа и температура наибольшие при адиабатическом и изобарическом процессах соответственно.
8. Работа и температура наибольшие при адиабатическом и изотермическом процессах соответственно.
9. Работа и температура наибольшие при адиабатическом процессе.

#### Задание 2

При некоторых значениях температуры и давления 1 моль кислорода занимает объем 10 л. Какой объем при таких же условиях займет 1 моль гелия?

1. 80 л.
2. 10 л.
3. 1,25 л.
4. 5 л.
5. 20 л.

### Задание 3

Уравнение адиабатического процесса имеет вид:

1.  $T \cdot V^{\gamma-1} = const$  . 2.  $p \cdot V = const$  . 3.  $p \cdot V^{\gamma} = 0$  .
4.  $p \cdot V^{\gamma-1} = const$  . 5.  $T \cdot V^{\gamma} = const$  .

### Задание 4

Закон Фурье имеет вид:

1.  $j_Q = -\kappa \frac{dT}{dx}$  . 2.  $j_m = -D \frac{d\rho}{dx}$  . 3.  $\langle W_{кин} \rangle = \frac{3kT}{2}$  .
4.  $P(h) = P_0 e^{-\frac{mgh}{kT}}$  . 5.  $j_\rho = -\eta \frac{dU}{dx}$  .

### Задание 5

Распределение Больцмана имеет вид:

1.  $f(\vec{r})dV = \frac{n_0}{N} e^{-\frac{E_p(\vec{r})}{kT}} dV$  . 2.  $P(h) = P_0 e^{-\frac{mgh}{kT}}$  .
3.  $dW(\vec{r}) = \frac{n_0}{N} e^{-\frac{E_p(\vec{r})}{kT}} dV$  . 4.  $f(v) = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi \cdot kT} \right)^{1/2} \cdot \exp\left( -\frac{mv^2}{2kT} \right)$  .
5.  $f(v) = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi \cdot kT} \right)^{3/2} v^2 \cdot \exp\left( -\frac{mv^2}{2kT} \right)$  .

## Вариант 5

### Задание 1

В сосуде неизменного объема находится идеальный газ в количестве 2 моль. Как надо изменить абсолютную температуру сосуда с газом при добавлении в сосуд еще одного моля газа, чтобы давление газа на стенки сосуда увеличилось в 3 раза?

1. Уменьшить в 3 раза..
2. Увеличить в 3 раза.
3. Уменьшить в 2 раза.
4. Увеличить в 2 раза.
5. Не изменять.

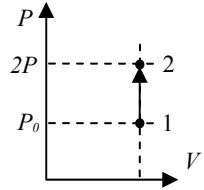
## Задание 2

Закон Фика имеет вид:

$$1. j_Q = -\kappa \frac{dT}{dx} \quad 2. j_m = -D \frac{d\rho}{dx} \quad 3. \langle W_{\text{кин}} \rangle = \frac{3kT}{2}$$
$$4. P(h) = P_0 e^{-\frac{mgh}{kT}} \quad 5. j_\rho = -\eta \frac{dU}{dx}$$

## Задание 3

На  $pV$ -диаграмме показан процесс изменения состояния постоянной массы идеального одноатомного газа. Внутренняя энергия газа увеличилась на 20 кДж. Количество теплоты, полученное газом, равно...



1. 0 кДж.    2. 20 кДж.    3. 10 кДж.    4. 40 кДж.    5. 30 кДж.

## Задание 4

Чему равна архимедова сила, если тело объемом  $0,01 \text{ м}^3$  полностью находится в воде? Плотность воды  $1000 \text{ кг/м}^3$ .

1. 20 Н;    2. 1 Н;    3. 100 Н;    4. 1 кН;    5. 10 Н.

## Задание 5

Вычислить наиболее вероятную, среднюю и среднюю квадратичную скорости молекул газа, у которого при нормальном атмосферном давлении плотность  $1 \text{ г/л}$ .

1. 0,45 км/с, 0,51 км/с, 0,55 км/с;    2. 0,44 км/с, 0,66 км/с, 0,75 км/с;  
3. 0,15 км/с, 0,23 км/с, 0,35 км/с;    4. 0,65 км/с, 0,21 км/с, 0,85 км/с;  
5. 0,35 км/с, 0,41 км/с, 0,15 км/с;

## Вариант 6

### Задание 1

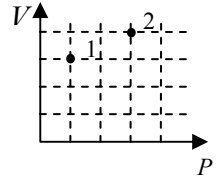
Водород, гелий и азот занимают одинаковый объем  $V_1$  при одинаковых температуре и давлении. Газы нагреваются изобарно, расширяясь до одинакового объема  $V_2$ . На нагревание какого газа

требуется при этом наибольшее, а для какого газа – наименьшее количество теплоты?

1. Наибольшее для  $H_2$ , наименьшее – для He.
2. Наибольшее для  $N_2$ , наименьшее – для He.
3. Наибольшее для  $N_2$ , одинаковое для  $H_2$  и He.
4. Наименьшее для  $H_2$ , одинаковое для He и  $N_2$ .
5. Наименьшее для He, одинаковое для  $H_2$  и  $N_2$ .

### Задание 2

В сосуде находится некоторое количество идеального газа. Как изменится температура газа, если он перейдет из состояния 1 в состояние 2 (см. рис.)?



1.  $T_2 = 4T_1$ . 2.  $T_2 = \frac{1}{4} T_1$ . 3.  $T_2 = \frac{4}{3} T_1$ .
4.  $T_2 = \frac{3}{4} T_1$ . 5.  $T_2 = 3 T_1$ .

### Задание 3

Закон Ньютона для плотности потока импульса

1.  $j_Q = -\kappa \frac{dT}{dx}$ . 2.  $j_m = -D \frac{d\rho}{dx}$ . 3.  $\langle W_{\text{éèì}} \rangle = \frac{3kT}{2}$ .
4.  $P(h) = P_0 e^{-\frac{mgh}{kT}}$ . 5.  $j_\rho = -\eta \frac{dU}{dx}$

### Задание 4

Число Рейнольдса определяется по формуле...

1.  $R_e = \frac{\langle v \rangle \cdot d}{\nu}$ . 2.  $R_e = \frac{d}{\nu}$ . 3.  $R_e = \frac{\nu}{\langle v \rangle \cdot d}$ .
4.  $R_e = \nu \cdot \langle v \rangle \cdot d$ . 5.  $R_e = \frac{\nu \cdot \langle v \rangle}{d}$ .

( $\nu$ —кинематическая вязкость;  $\rho$ —плотность жидкости;  $\langle v \rangle$ —средняя по сечению трубы скорость жидкости;  $d$ —диаметр трубы)

### Задание 5

Распределение Максвелла имеет вид:

$$1. f(\vec{r})dV = \frac{n_0}{N} e^{-\frac{E_p(\vec{r})}{kT}} dV \quad 2. P(h) = P_0 e^{-\frac{mgh}{kT}}$$

$$3. dW(\vec{r}) = \frac{n_0}{N} e^{-\frac{E_p(\vec{r})}{kT}} dV \quad 4. f(v) = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi \cdot kT} \right)^{3/2} \cdot \exp\left( -\frac{mv^2}{2kT} \right)$$

$$5. f(v) = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi \cdot kT} \right)^{3/2} v^2 \cdot \exp\left( -\frac{mv^2}{2kT} \right)$$

### Вариант 7

#### Задание 1

При изобарном процессе концентрация идеального газа увеличилась в 9 раз. Средняя кинетическая энергия молекул данной массы газа

1. не изменилась.
2. увеличилась в 9 раз.
3. уменьшилась в 9 раз.
4. увеличилась в 3 раза.
5. уменьшилась в 3 раза.

#### Задание 2

Число степеней свободы у двухатомного газа с жёсткой связью равно ...

- 1) 1; 2) 3; 3) 5; 4) 6; 5) 7.

#### Задание 3

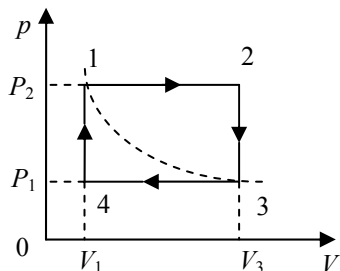
Энтропией системы называется функция состояния, дифференциалом которой является...

$$1. S = \frac{\delta V}{\delta T} \quad 2. S = \frac{\delta A}{T} \quad 3. S = \frac{\delta U}{\delta T} \quad 4. S = \frac{\delta Q}{T} \quad 5. S = \frac{\delta Q}{\delta v}$$



#### Задание 4

Два моля идеального газа совершают замкнутый цикл, состоящий из двух изобарических процессов и двух изохорических (см. рис.). В состояниях 1 и 3 температуры одинаковы. В состоянии 2 температура газа  $T_2 = 529 \text{ K}$ , в состоянии 4 температура газа  $T_4 = 169 \text{ K}$ .



Найти работу, совершенную

газом за цикл.

1. 415 Дж.
2. 831 Дж.
3. 1662 Дж.
4. 525 Дж.
5. 1050 Дж.

#### Задание 5

Найти температуру газообразного азота, при которой скоростям  $v_1=300 \text{ м/с}$  и  $v_2=600 \text{ м/с}$  соответствуют одинаковые функции распределения Максвелла  $F(v)$ .

1. 330 К.
2. 220 К.
3. 440 К.
4. 110 К.
5. 550 К.

### Вариант 8

#### Задание 1

Уравнение адиабатического процесса имеет вид:

1.  $T \cdot V^{\gamma-1} = const$ .
2.  $p \cdot V = const$ .
3.  $p \cdot V^\gamma = 0$ .
4.  $p \cdot V^{\gamma-1} = const$ .
5.  $T \cdot V^\gamma = const$ .

( $T$  – термодинамическая температура.  $V$  – объём газа.  $\gamma$  – коэффициент Пуассона).

#### Задание 2

Идеальный газ в количестве 5 моль находится в сосуде неизменного объема. Как надо изменить абсолютную температуру сосуда с газом при выпуске из сосуда 4 молей газа, чтобы давление газа на стенки сосуда увеличилось в 3 раза?

1. Уменьшить в 5 раза.
2. Увеличить в 15 раза.
3. Уменьшить в 15 раза.
4. Увеличить в 12 раза.
5. Не изменять.

### Задание 3

Энтальпией системы называется функция состояния ...

- 1  $H = U - p \cdot V$ . 2  $H = p \cdot V$ . 3  $\delta Q = \delta U - A$ .  
4  $H = U + p \cdot V$ . 5  $\delta Q = \delta U + A$ .

### Задание 4

Полным смачиванием называется явление, при котором краевой угол ...

- 1  $\theta = \text{const}$ . 2  $\theta = \pi$ . 3  $\theta = \infty$ . 4  $\theta = 0$ . 5  $\theta < \pi$ .

### Задание 5

При какой температуре газа, состоящего из смеси азота и кислорода, наиболее вероятные скорости молекул азота и кислорода будут отличаться друг от друга на 30 м/с?

1. 300 К. 2. 330 К. 3. 550 К. 4. 420 К. 5. 370 К.

## Вариант 9

### Задание 1

В баллоне вместимостью 15 л находится азот под давлением 100 кПа при температуре  $t_1 = 27^\circ\text{C}$ . После того как из баллона выпустили азот массой 14 г, температура газа стала равной  $t_2 = 17^\circ\text{C}$ . Определите давление азота, оставшегося в баллоне.

1. 16,3 кПа. 2. 16,3 кПа. 3. 16,3 кПа.  
4. 16,3 кПа. 5. 16,3 кПа.

### Задание 2

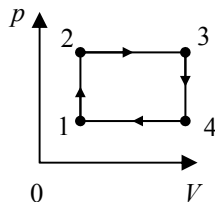
В какой из точек циклического процесса, изображенного на  $p$ - $V$ -диаграмме, средняя квадратичная скорость молекул идеального газа максимальна? Число молекул газа постоянно.

- 1) 1 2) 2 3) 3 4) 4 5. среди ответов нет верного.

### Задание 3

При значениях числа Рейнольдса  $1000 \leq Re \leq 2300$  наблюдается ...

- 1 покой жидкости (газа). 2 турбулентное течение.  
3 испарение жидкости (газа). 4 ламинарное течение.  
5 переход от ламинарного течения к турбулентному.



#### Задание 4

Показатель политропы  $n$  равен:

1. 0. 2.  $\frac{(C - C_V)}{(C - C_p)}$ . 3.  $\frac{(C_p)}{(C_V)}$ . 4.  $const$ . 5.  $\frac{(C - C_p)}{(C - C_V)}$ .

( $C$  – теплоёмкость системы  $C_V$  – теплоёмкость при постоянном объёме.  $C_p$  – теплоёмкость при постоянном давлении).

#### Задание 5

Найти  $\langle v_x^2 \rangle$  – среднее значение квадрата проекции  $v_x$  скорости молекул газа при температуре  $T$ . Масса каждой молекулы равна  $m$ .

1.  $\sqrt{k \cdot T \cdot m}$ . 2.  $\sqrt{\frac{k \cdot T}{m}}$ . 3.  $k \cdot T \cdot m$ . 4.  $\frac{m}{k \cdot T}$ . 5.  $\frac{k \cdot T}{m}$ .

### Вариант 10

#### Задание 1

Как изменились концентрация молекул и их средняя кинетическая энергия, если в газе одновременно увеличились в два раза давление и температура?

1. Энергия молекул и концентрация увеличились вдвое.
2. Энергия уменьшилась, а концентрация увеличилась вдвое.
3. Энергия не изменилась, а концентрация увеличилась вдвое.
4. Энергия увеличилась вдвое, а концентрация не изменилась.
5. Энергия уменьшилась, а концентрация не изменилась.

#### Задание 2

Определите число  $N$  атомов в 1 кг водорода и массу одного атома водорода.

1.  $N = 3 \cdot 10^{25}$ ,  $m_0 = 3,2 \cdot 10^{-27}$  кг    2.  $N = 3 \cdot 10^{24}$ ,  $m_0 = 6,72 \cdot 10^{-26}$  кг  
3.  $N = 9 \cdot 10^{26}$ ,  $m_0 = 3,32 \cdot 10^{-27}$  кг    4.  $N = 3 \cdot 10^{-26}$ ,  $m_0 = 1,52 \cdot 10^{-27}$  кг  
5.  $N = 3 \cdot 10^{26}$ ,  $m_0 = 3,32 \cdot 10^{-27}$  кг

### Задание 3

Коэффициенты переноса связаны между собой следующими соотношениями...

$$1. \begin{cases} D = \eta\rho; \\ \kappa = c_v\eta \end{cases} 2. \begin{cases} \eta = \rho D; \\ c_v = \kappa\eta \end{cases} 3. \begin{cases} \eta = c_v D; \\ \kappa = c_v\eta \end{cases} 4. \begin{cases} \eta = \rho D; \\ \kappa = c_v\eta \end{cases} 5. \begin{cases} \eta = \rho D; \\ \kappa = \rho\eta \end{cases}$$

где  $\eta$  - коэффициент вязкости,  $\rho$  - плотность газа,  $D$  - коэффициент диффузии,  $\kappa$  - коэффициент теплопроводности,  $c_v$  - удельная теплоёмкость газа при постоянном объёме

### Задание 4

В изолированных системах...

- $\delta Q = 0, \delta A \neq 0$ ;
- $\delta A = 0, \delta Q \neq 0$ ;
- $\delta Q = 0, \delta A = 0$ ;
- $\delta Q \neq 0, \delta A \neq 0$ ;
- среди ответов нет верного.

### Задание 5

Стальная и бронзовая ленты одинаковой толщины 0,2 мм склеены вместе и при температуре 293 К образуют плоскую биметаллическую пластинку. Каким будет радиус изгиба пластинки при температуре 393 К? Коэффициенты линейного теплового расширения бронзы и стали равны соответственно:  $2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ;  $1,1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ .

- 11 см.
- 22 см.
- 33 см.
- 44 см.
- 55 см.

## Вариант 11

### Задание 1

В закрытом сосуде вместимостью 20 л находятся водород массой 6 г и гелий массой 12 г. Определите давление газовой смеси в сосуде, если температура смеси  $T = 300 \text{ K}$ .

- 0,75 кПа;
- 0,75 ГПа;
- 0,75 МПа;
- 75 МПа;
- 75 кПа.

### Задание 2

В сосуде находится 4 моля идеального газа. Как надо изменить объём сосуда при добавлении в него ещё 4 молей газа, не изменяя давления, чтобы абсолютная температура газа увеличилась в 3 раза?

1. Уменьшить в 4 раза.
2. Увеличить в 4 раза.
3. Уменьшить в 6 раз
4. Увеличить в 6 раз.
5. Увеличить в 12 раз.

### Задание 3

При изобарическом процессе работа газа равна...

1.  $A_{12} = \frac{M}{\mu} RT \frac{V_2}{V_1}$ ;
2.  $A_{12} = 0$ ;
3.  $A_{12} = \frac{M}{\mu} R(T_2 - T_1)$ ;
4.  $A_{12} = \frac{M}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$ ;
5. среди ответов нет верного.

### Задание 4

Определите среднюю продолжительность свободного пробега молекул водорода при температуре 300 К и давлении 5 кПа. Эффективный диаметр молекул принять равным 0,28 нм.

1. 100 нс.
2. 170 нс.
3. 70 нс.
4. 340 нс.
5. 100 пс.

### Задание 5

Найти для газообразного азота при температуре 300 К отношение числа молекул с компонентами скорости вдоль оси  $x$  в интервале  $300 \pm 0,31$  м/с к числу молекул с компонентами скорости вдоль той же оси в интервале  $500 \pm 0,51$  м/с.

1. 0,5.
2. 1,5.
3. 2.
4. 2.
5. 1. 3.

## Вариант 12

### Задание 1

Определите плотность смеси газов водорода массой  $m_1=8$  г и кислорода массой  $m_2=64$  г при температуре  $T=290$  К и при давлении 0,1 МПа. Газы считать идеальными.

1. 0,498 кг/м<sup>3</sup>.
2. 498 кг/м<sup>3</sup>.
3. 0,498 г/м<sup>3</sup>.
4. 4,98 кг/м<sup>3</sup>.
5. 498 кг/мм<sup>3</sup>.

### Задание 2

При изотермическом процессе работа, совершаемая газом, определяется по формуле...

$$1. A_{12} = U_2 - U_1. \quad 2. A_{12} = \frac{mRT}{M} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right) \right].$$

$$3. A_{12} = \frac{m}{M} RT \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad 4. A_{12} = P(V_2 - V_1).$$

$$5. A_{12} = \frac{m}{M} RT \cdot \ln \frac{V_1}{V_2}.$$

(P, V, T U – давление, объем, температура и внутренняя энергия газа соответственно; n – показатель процесса, R – универсальная газовая постоянная).

### Задание 3

В теплоизолированных (адиабатических) системах...

1.  $\delta Q = 0$ ,  $\delta A \neq 0$ ; 2.  $\delta A = 0$ ,  $\delta Q \neq 0$ ; 3.  $\delta Q = 0$ ,  $\delta A = 0$
4.  $\delta Q \neq 0$ ,  $\delta A \neq 0$ ; 5. среди ответов нет верного.

### Задание 4

Коэффициент диффузии и внутреннего трения при некоторых условиях равны соответственно  $1,42 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$  и  $8,5 \text{ мкПа}\cdot\text{с}$ . Определите концентрацию молекул воздуха при этих условиях.

1.  $1,25 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ . 2.  $1,5 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ . 3.  $1,25 \cdot 10^{-24} \text{ м}^{-3}$ .
4.  $0,25 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ . 5.  $0,25 \cdot 10^{-24} \text{ м}^{-3}$ .

### Задание 5

В U – образной трубке находится керосин. В одном колене высота уровня керосина 20 см, а температура  $15^\circ \text{ C}$ . Какова температура керосина в другом колене, если высота уровня в нём на 1,5 см выше? Коэффициент объёмного расширения керосина  $0,96 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

1.  $55^\circ \text{ C}$ . 2.  $95^\circ \text{ C}$ . 3.  $125^\circ \text{ C}$ . 4.  $155^\circ \text{ C}$ . 5.  $275^\circ \text{ C}$ .

## Вариант 13

### Задание 1

В баллоне вместимостью 20 л содержит смесь водорода и азота при температуре 290 К и давлении 1 МПа. Определите массу водорода, если масса смеси равна 150 г.

1. 6,3 кг. 2. 3,3 г. 3. 3,3 кг. 4. 6,3 г. 5. 6,3 мг.

### Задание 2

В ёмкости находится 2 моля идеального газа. Каким должен стать объём этой ёмкости, если туда добавить ещё 6 молей газа, не изменяя давление, чтобы абсолютная температура газа увеличилась в 4 раза?

1.  $V_2 = 2/3 \cdot V_1$ . 2.  $V_2 = 3/2 \cdot V_1$ . 3.  $V_2 = 1/3 \cdot V_1$ .  
4.  $V_2 = 16 \cdot V_1$ . 5.  $V_2 = 1/16 \cdot V_1$ .

### Задание 3

Уравнение Майера имеет вид:

- 1  $C_V = C_P + R$ ; 2  $R = C_P + C_V$ ; 3  $C_P = C_V + k$ ;  
4  $C_P = C_V + R$ ; 5  $C_V = C_P + k \cdot R$

( $C_V$  – теплоёмкость при постоянном объёме.  $C_P$  – теплоёмкость при постоянном давлении.  $R$  – универсальная газовая постоянная.  $k$  – постоянная Больцмана).

### Задание 4

Одинаковые количества теплоты сообщены одинаковым массам аргона, кислорода и углекислого газа. У какого газа в результате этого будет достигнута наиболее высокая температура, а у какого наиболее низкая? Процесс изохорический, начальные температуры одинаковы.

1. Наиболее высокая у Ar, наиболее низкая у O<sub>2</sub>.  
2. Наиболее высокая у Ar, наиболее низкая у CO<sub>2</sub>.  
3. Наиболее высокая у O<sub>2</sub>, наиболее низкая у CO<sub>2</sub>.  
4. Наиболее высокая у O<sub>2</sub>, наиболее низкая у Ar.  
5. Наиболее высокая у CO<sub>2</sub>, наиболее низкая у Ar.  
6. Наиболее высокая у CO<sub>2</sub>, наиболее низкая у O<sub>2</sub>.

### Задание 5

Плотность ртути уменьшилась при нагревании до 98 % от её плотности при  $0^\circ \text{C}$ . До какой температуры нагрели ртуть? Коэффициент теплового объёмного расширения ртути  $0,181 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ .  
1.  $55^\circ \text{C}$ . 2.  $110^\circ \text{C}$ . 3.  $210^\circ \text{C}$ . 4.  $250^\circ \text{C}$ . 5.  $300^\circ \text{C}$ .

## Вариант 14

### Задание 1

Азот массой 7 г находится под давлением 0,1 МПа и температурой 290 К. Вследствие изобарного нагревания азот занял объём 10 л. Определите объём газа до расширения.

1.  $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ; 2.  $6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ ; 3.  $3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ ;  
4.  $9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ; 5.  $6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ;

### Задание 2

Уравнение Бернулли имеет вид ...

1  $\frac{\rho \cdot v^2}{2} - \rho \cdot g \cdot h - p = 0$ .      2  $\frac{m \cdot v^2}{2} + m \cdot g \cdot h = const$

3  $\rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h + p = const$ . 4  $\frac{\rho \cdot v^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h + p = const$ .

5  $\frac{\rho \cdot v^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h + p = 0$ .

### Задание 3

При изохорическом процессе работа газа равна...

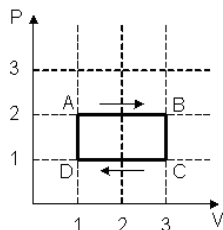
1.  $A_{12} = \frac{M}{\mu} RT \frac{V_2}{V_1}$ ; 2.  $A_{12} = 0$ ; 3.  $A_{12} = \frac{M}{\mu} R(T_2 - T_1)$ ;

4.  $A_{12} = \frac{M}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$  5. среди ответов нет верного.



#### Задание 4

На  $(P, V)$  диаграмме изображен циклический процесс идеального газа. На участках ВС-CD температура...



1. повышается
2. понижается
3. на ВС повышается, на CD понижается
4. на ВС понижается, на CD повышается
5. не изменяется

#### Задание 5

При температуре  $20^\circ \text{C}$  длины алюминиевого и медного стержней одинаковы. Какова длина алюминиевого стержня при  $-20^\circ \text{C}$ , если длина медного стержня при этой температуре 60 см? Коэффициенты линейного теплового расширения: алюминия -  $23,8 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ; меди  $16,5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ .

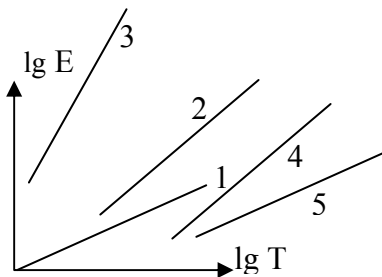
1. 20 см.
2. 40 см.
3. 60 см.
4. 80 см.
5. 100 см.

### Вариант 15

#### Задание 1

Какая из представленных на рисунке прямых отражает правильную зависимость логарифма средней кинетической энергии молекул газа  $E$  от логарифма температуры  $T$  газа?

1. 1.
2. 2.
3. 3.
4. 4.
5. 5.



#### Задание 2

Энтропия системы пропорциональна ...

- 1 статистическому весу микросостояния.
- 2 квадрату статистического веса макросостояния.
- 3 логарифму термодинамической вероятности.
- 4 числу различных микросостояний.
- 5 величине обратной статистическому весу.

### Задание 3

Газ расширяется от объема  $V_1$  до объема  $V_2$ . В одном случае расширение происходит изотермически, в другом – адиабатически. Как при каждом из этих процессов меняется энтропия газа?

1. При обоих процессах растет.
2. При обоих процессах убывает.
3. При изотермическом растет, при адиабатическом убывает.
4. При изотермическом убывает, при адиабатическом растет.
5. При изотермическом растет, при адиабатическом не изменяется.
6. При изотермическом убывает, при адиабатическом не изменяется.
7. При изотермическом не изменяется, при адиабатическом растет.
8. При изотермическом не изменяется, при адиабатическом убывает.

### Задание 4

В сосуд, содержащий 10 г льда при температуре  $-10^\circ\text{C}$ , малыми порциями впускают водяной пар при температуре  $100^\circ\text{C}$ . Какое количество воды окажется в сосуде, когда весь лед растает?

- 1 100 г; 1 200 г; 1 300 г; 1 400 г; 1 500 г;

### Задание 5

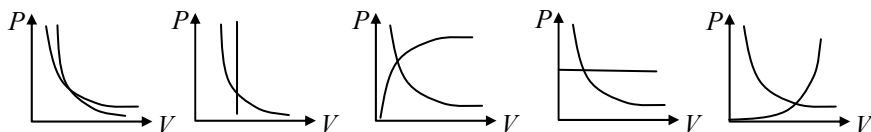
Если температура на улице равна  $-20^\circ\text{C}$ , то температура в комнате равна  $+20^\circ\text{C}$ . Если же температура на улице равна  $-40^\circ\text{C}$ , то в комнате устанавливается температура  $+10^\circ\text{C}$ . Найти температуру батареи, отапливающей комнату.

1.  $20^\circ\text{C}$ ; 2.  $40^\circ\text{C}$ ; 3.  $60^\circ\text{C}$ ; 4.  $80^\circ\text{C}$ ; 5.  $100^\circ\text{C}$ .

## Вариант 16

### Задание 1

Какой из графиков (см. рис.) правильно отражает зависимости для адиабаты и изотермы?



### Задание 2

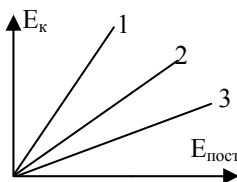
В ёмкости находится идеальный газ в количестве 3 моль. Каким должен стать объём этой емкости при выпуске из неё 1 моля газа, не изменяя давление, чтобы абсолютная температура газа увеличилась в 2 раза?

1.  $V_2 = 4/3 \cdot V_1$ .
2.  $V_2 = 3/4 \cdot V_1$ .
3.  $V_2 = 1/3 \cdot V_1$ .
4.  $V_2 = 3 \cdot V_1$ .
5.  $V_2 = 1/4 \cdot V_1$ .

### Задание 3

В равных объемах при одинаковых температуре и давлении содержатся азот, аргон и метан. Какому газу соответствуют прямые 1, 2, 3 на графике зависимости полной кинетической энергии  $E_k$  от кинетической энергии поступательного движения ...

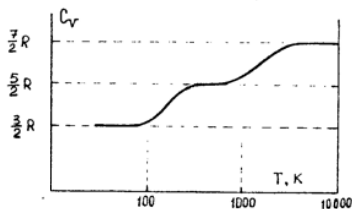
- 1 азот, аргон, метан.
- 2 азот, метан, аргон.
- 3 метан, аргон, азот.
- 4 аргон, азот, метан.
- 5 метан, азот, аргон.



### Задание 4

На рисунке показана зависимость теплоёмкости некоторого газа при постоянном объёме от температуры. Какой это газ?

1. Водород ( $H_2$ )
2. Гелий (He)
3. Метан ( $CH_4$ )
4. Пары воды ( $H_2O$ )
5. Углекислый газ ( $CO_2$ )



### Задание 5

Сколько льда может получиться из 1 кг переохлаждённой до  $-10^\circ C$  воды? Теплоёмкость обычной и переохлаждённой воды одинаковая.

1. 100 г;
2. 125 г;
3. 150 г;
4. 175 г;
5. 200 г.

## Вариант 17

### Задание 1

В сосуде вместимостью 1 л находится кислород массой 1 г. Определите концентрацию молекул кислорода в сосуде.  
1.  $1,88 \cdot 10^{-25} \text{ м}^{-3}$ . 2.  $1,88 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ . 3.  $1,88 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$ .  
4.  $2,88 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ . 5.  $0,88 \cdot 10^{-25} \text{ м}^{-3}$ .

### Задание 2

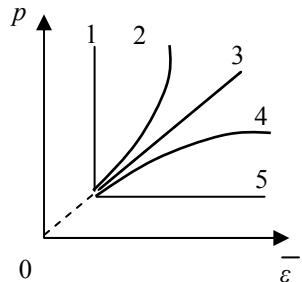
При некоторых значениях температуры и давления 1 моль кислорода занимает объем 10 л. Какой объем при таких же условиях займет 1 моль гелия?  
1. 80 л. 2. 10 л. 3. 1,25 л. 4. 5 л. 5. 20 л.

### Задание 3

При нагревании на  $5^\circ\text{C}$  некоторой массы молекулярного водорода его внутренняя энергия изменилась на 25 Дж. При аналогичном нагревании такой же массы атомарного водорода его внутренняя энергия изменилась на...  
1 50 Дж. 2 15 Дж. 3 10 Дж. 4 12,5 Дж. 5 8,31 Дж.

### Задание 4

Какой из графиков верно отражает взаимосвязь давления и средней кинетической энергии поступательного движения молекул при их постоянной концентрации в сосуде с идеальным газом?  
1). 1 2). 2 3). 3 4). 4 5). 5



### Задание 5

В колбе находится вода при  $0^\circ\text{C}$ . Откачивая пар, воду заморозили. Какая часть воды испарилась?  
1. 1/2. 2. 1/4. 3. 1/5. 4. 1/7. 5. 1/9.

## Вариант 18

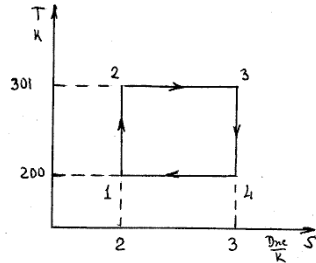
### Задание 1

В сосуде вместимостью 5 л при нормальных условиях находится азот. Определите количество вещества газа.

1. 0.233 моль. 2. 233 моль. 3. 0.233 кмоль.
4. 233 кмоль. 5. 0.233 моль<sup>-1</sup>.

### Задание 2

На рисунке представлен цикл Карно для теплового двигателя. Работа, совершенная одним молеом одноатомного идеального газа в процессе 4-1, равна



1. 1260 Дж 2. -1260 Дж 3. 301 Дж 4. 200 Дж 5. -200 Дж

### Задание 3

В тепловых резервуарах ...

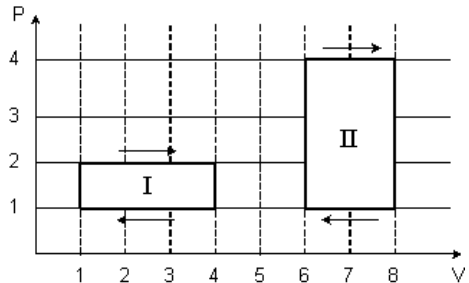
1.  $\delta Q = 0$ ,  $\delta A \neq 0$ ; 2.  $\delta A = 0$ ,  $\delta Q \neq 0$ ; 3.  $\delta Q = 0$ ,  $\delta A = 0$
4.  $\delta Q \neq 0$ ,  $\delta A \neq 0$ ; 5. среди ответов нет верного.

### Задание 4

На (P,V)-диаграмме изображены два циклических процесса.

Отношение работ  $A_I/A_{II}$ , совершенных в этих циклах, равно...

- 1)  $-\frac{1}{2}$ ; 2)  $\frac{1}{2}$ ; 3)  $-2$ ;
- 4) 2; 5) 3.



### Задание 5

В стакан, содержащий 200 г воды, опускают нагреватель мощностью 50 Вт. Максимальная температура воды после длительного нагревания составляет  $55^{\circ}\text{C}$ . За какое время вода остынет на  $1^{\circ}\text{C}$  после выключения нагревателя? Оцените максимальную температуру воды в стакане при увеличении напряжения в сети на 20%. Температура окружающего воздуха  $20^{\circ}\text{C}$ .

- 1) 10 с;  $40^{\circ}\text{C}$ ; 2) 15 с;  $70^{\circ}\text{C}$ ; 3) 20 с;  $20^{\circ}\text{C}$ ;
- 4) 30 с;  $90^{\circ}\text{C}$ ; 5) 17 с;  $110^{\circ}\text{C}$ ;

## Вариант 19

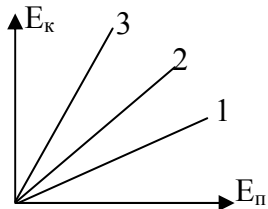
### Задание 1

Показатель политропы равен единице при...

- 1 политропическом процессе.
- 2 изотермическом процессе.
- 3 изохорическом процессе.
- 4 адиабатическом процессе.
- 5 изобарном процессе.

### Задание 2

В равных объемах при одинаковых температуре и давлении содержатся углекислый газ, кислород и метан. Какому газу соответствуют прямые 1, 2, 3 на графике зависимости полной кинетической энергии  $E_k$  от кинетической энергии поступательного движения  $E_p$ .



- 1 углекислый газ, кислород, метан.
- 2 кислород, метан, углекислый газ.
- 3 метан, углекислый газ, кислород.
- 4 кислород, углекислый газ, метан.
- 5 метан, кислород, углекислый газ.

### Задание 3

Уравнение Ван-дер-Ваальса описывает поведение реальных газов и имеет вид:

$$1 \left( P + \frac{v^2 \cdot a'}{V^2} \right) (V - v \cdot b') = \nu RT \quad . \quad 2. (P - a')(V - b') = \nu RT$$

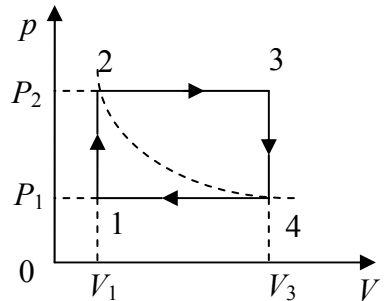
$$3 \left( P + a'V^2 \right) \left( V - \frac{b'}{v} \right) = RT \quad . \quad 4 (P - a'V)(V - b'v) = RT \quad .$$

$$5 \left( P - \frac{a'}{V} \right) (V - b') = \nu RT \quad .$$

( $a', b'$  - поправки Ван-дер-Ваальса;  $P, V, T, \nu$  - давление, объем, температура, количество вещества газа;  $R$  - универсальная газовая постоянная).

### Задание 4

Состояние одного моля идеального газа изменяется по замкнутому циклу, состоящему из двух изобарических процессов и двух изохорических (см. рис.). В состоянии 1 температура газа  $T_1 = 100 \text{ K}$ , в состоянии 3 температура газа  $T_3 = 400 \text{ K}$ . В состояниях 2 и 4 температуры одинаковы.



Определить работу, совершенную газом за цикл.

1. 415 Дж.
2. 831 Дж.
3. 1662 Дж.
4. 525 Дж.
5. 1050 Дж.

### Задание 5

На электрической плитке мощностью 1 кВт кипит чайник с водой. Найти скорость истечения пара из носика чайника. Площадь носика  $1 \text{ см}^2$ , давление на выходе из носика считать равным атмосферному.

1. 3,5 м/с.
2. 5,5 м/с.
3. 7,5 м/с.
4. 9,5 м/с.
5. 11,5 м/с.

### Вариант 20

#### Задание 1

Средняя квадратичная скорость некоторого газа при нормальных условиях равна 480 м/с. Сколько молекул содержит 1 г этого газа?

1.  $2 \cdot 10^{22}$ .
2.  $4 \cdot 10^{22}$ .
3.  $6 \cdot 10^{22}$ .
4.  $8 \cdot 10^{22}$ .
5.  $10^{23}$ .

#### Задание 2

Какая из предоставленных на рис.1 прямых правильно изображает зависимость логарифма средней квадратичной скорости молекул газа  $v$  от логарифма температуры  $T$ ?

1. 1.
2. 2.
3. 3.
4. 4.
5. 5.

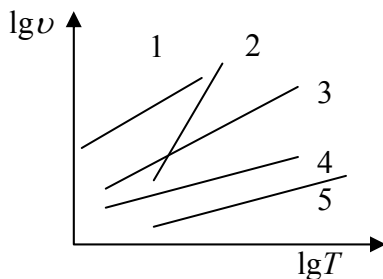


Рис. 1

#### Задание 3

Газ из состояния с давлением  $p_1$  и объемом  $V_1$  переходит, расширяясь, в состояние с давлением  $p_2$  и объемом  $V_2$ . В первом случае переход осуществляется сначала по изобаре, затем по изохоре, во втором — сначала по изохоре, затем по изобаре. В каком случае, будет совершена большая работа и в каком случае произойдет большее изменение энтропии?

1. В первом случае больше и работа, и изменение энтропии.
2. В первом случае больше работа, меньше изменение энтропии.
3. В первом случае больше работа, изменение энтропии равно нулю.
4. Во втором случае больше работа и больше изменение энтропии.
5. Во втором случае больше работа, меньше изменение энтропии.



6. Во втором случае больше работа, изменение энтропии равно нулю.

7. Работа одинакова в обоих случаях, изменение энтропии больше в первом случае.

8. Работа одинакова в обоих случаях, изменение энтропии больше во втором случае.

9. Работа одинакова в обоих случаях, в обоих случаях изменение энтропии равно нулю.

#### Задание 4

Точки 1 и 2 лежат на одной адиабате. В каком из состояний, 1 или 2, выше температура и больше энтропия?

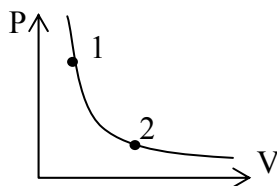
1 Температура выше и энтропия больше в точке 2.

2 Температура выше в точке 1, энтропия одинакова в обеих точках.

3 Температура выше в точке 2, энтропия больше в точке 1

4 Температура выше и энтропия больше в точке 1.

5 Температура выше в точке 2, энтропия одинакова в обеих точках.



#### Задание 5

В теплоизолированном сосуде находится идеальный одноатомный газ при температуре 300 К и кусочек железа массой 0,2 кг при температуре 500 К. Начальное давление газа равно  $10^5$  Па, а объем сосуда  $1000 \text{ см}^3$ . Найти давление газа в равновесном состоянии. Удельная теплоемкость железа  $c_{\text{ж}} = 450 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ . Объемом железа пренебречь.

1  $0,5 \cdot 10^5$  Па; 2  $1,5 \cdot 10^5$  Па; 3  $2,5 \cdot 10^5$  Па;

4  $3 \cdot 10^5$  Па; 5  $3,5 \cdot 10^5$  Па;

## 7. СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ

Таблица 2

### Основные физические постоянные

Физическая величина	Численное значение
Авогадро постоянная	$N_A = 6,022169(40) \cdot 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>
Атмосфера стандартная (давление атмосферное нормальное)	1 атм = $1,01325 \cdot 10^5$ Па (точно)
Атомная единица массы	1 а.е.м. = $1,660531(11) \cdot 10^{-27}$ кг
Больцмана постоянная	$k = 1,380658(12) \cdot 10^{-23}$ Дж·К <sup>-1</sup>
Объем моля идеального газа при нормальных условиях (P = 1 атм, T = 273,15 К)	$V_o = 22,41410(19) \cdot 10^{-3}$ м <sup>3</sup>
Универсальная газовая постоянная	$R = k N_A = 8,31441(26)$ Дж·К <sup>-1</sup> ·моль <sup>-1</sup>

Таблица 3

Множ, тел, ,яр, ставк, ядляябразован, ядесят, чных,я  
кратныхяд, н, ця

Множитель	Приставка	
	Наименование	Обозначение
$10^{12}$	Тера	Т
$10^9$	Гига	Г
$10^6$	Мега	М
$10^3$	Кило	к
$10^{-1}$	Деци	д
$10^{-2}$	Санتي	с
$10^{-3}$	Милли	м
$10^{-6}$	Микро	мк
$10^{-9}$	Нано	н
$10^{-12}$	Пико	п

Таблица 4

## Основные величины, их обозначения и единицы величин в СИ

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			Международное	русское
Длина	L	метр	m	м
Время	T	секунда	s	с
Масса	M	килограмм	kg	кг
Сила электрического тока	I	Ампер	A	А
Термодинамическая температура	Θ	Кельвин	K	К
Количество вещества	N	моль	mol	моль
Сила света	J	кандела	cd	кд

Таблица 5

## Производные единицы СИ, имеющие наименование

Величина	Единица		
	наименование	Обозначение	Выражение через основные единицы СИ
Частота	Герц	Гц	$\text{с}^{-1}$
Сила	Ньютон	Н	$\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Давление	Паскаль	Па	$\text{м}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Энергия, работа, количество теплоты	Джоуль	Дж	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Мощность, поток энергии	Ватт	Вт	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$

Таблица 6

## Производные единицы физических величин

Наименование величины	Единица		
	определяющее уравнение	обозначение	наименование и определение
Количество теплоты, внутренняя энергия	$Q$	Дж	<i>Джоуль</i> равен количеству теплоты, эквивалентному работе 1 Дж
Тепловой поток (тепловая мощность)	$\Phi$	Вт	<i>Ватт</i> равен тепловому потоку, эквивалентному механической мощности 1 Вт
Градиент температуры	$ \Delta T/\Delta x $	К/м	<i>Кельвин на метр</i> равен температурному градиенту поля, в котором на участке длиной 1 м в направлении градиента температура изменяется на 1 К
Коэффициент теплопроводности	$\lambda = \frac{Q}{\frac{\Delta T}{\Delta x}}$	Вт /м·К	<i>Ватт на метр-кельвин</i> равен теплопроводности вещества, в котором при стационарном режиме с поверхностной плотностью потока 1 Вт/м <sup>2</sup> устанавливается температурный градиент 1 К/м
Теплоемкость системы	$C = dQ/dt$	Дж/К	<i>Джоуль на кельвин</i> равен теплоемкости системы, температура которой повышается на 1 К при подведении к системе количества теплоты 1 Дж
Удельная теплоемкость	$c = \frac{dQ}{mdt}$	Дж кг·К	<i>Джоуль на килограмм-кельвин</i> равен удельной теплоемкости вещества, имеющего при массе 1 кг теплоемкость 1 Дж/К

Наименование величины	Единица		
	определяющее уравнение		определяющее уравнение
Молярная теплоемкость	$C_m = \frac{dQ}{vdt}$	Дж моль · К	<i>Джоуль на моль-кельвин</i> равен молярной теплоемкости вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль теплоемкость 1 Дж/К
Энтропия	$\delta Q/T$	Дж/К	<i>Джоуль на кельвин</i> равен изменению энтропии системы, которой при температуре $T$ К в изотермическом процессе сообщается количество теплоты $Q$ Дж
Коэффициент поверхностного натяжения	$\sigma = F/\ell$	Н/м = Дж/м <sup>2</sup>	<i>Ньютон на метр</i> равен поверхностному натяжению жидкости, создаваемому силой 1 Н, приложенной к участку контура свободной поверхности длиной 1 м и действующей нормально к контуру и по касательной к поверхности

Таблица 7

## Поправки Ван-дер-Ваальса

Газ	$a, \text{Н} \cdot \text{м}^4 / \text{моль}^2$	$b, 10^{-5} \cdot \text{м}^3 / \text{моль}$
Азот	0,135	3,86
Аргон	0,134	3,22
Водяной пар	0,545	3,04
Кислород	0,136	3,17
Неон	0,209	1,70
Углекислый газ	0,361	4,28

Таблица 8

## Число степеней свободы

Вещество	Поступательное движение	Вращательное движение	Колебательное движение	Всего
Одноатомный газ	3	-	-	3
Двухатомный газ*	3	2	-	5
Трехатомный газ*	3	3	-	6
Твердое тело**	3	3	-	6
Жидкость	не определено			

\* для молекул с жесткой связью между атомами

\*\* для твердого тела с жесткой связью между атомами

Таблица 9

## Относительные молекулярные массы некоторых газов

Газ	Формула	Относительная молекулярная масса, а.е.м.
Азот	$N_2$	28,134
Аргон	Ar	39,948
Вода (пары)	$H_2O$	18,0152
Водород	$H_2$	2,0158
Гелий	He	4,0026
Кислород	$O_2$	31,9988
Метан	$CH_4$	16,0416
Углекислый газ	$CO_2$	44,0088
Хлор	Cl	35,452

## 8. РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

### Основная литература

1. *Трофимова Т.И.* Курс физики : учеб. пособие / Т.И.Трофимова. - 21-е изд., стер. - М. : Академия, 2015. - 560 с. и пред.изд. (2008, 2007, 2004, 1997)

2. *Детлаф А.А.* Курс физики : учеб. пособие / А.А. Детлаф, Б.М.Яворский. - 5-е изд., стер. - М. : АСADEMIА, 2005. - 720 с.и пред. изд. (2003, 2002, 2001, 1998)

3. *Савельев И.В.* Курс физики : учеб. пособие: в 3 т. Т.1. Механика. Молекулярная физика /И.В. Савельев – Изд. 5-е, стер. - СПб.[и др.]: Лань,2016. - 352 с.и пред. изд. (2008, 1998, 1989)

4. Савельев И.В. Курс физики : учеб. пособие: в 3 т. Т.2. Электричество. Колебания и волны /И.В. Савельев – Изд. 4-е, стер. - СПб.[и др.]: Лань,2016. - 480 с.и пред. изд. (2008, 1998, 1989)

5. *Савельев И.В.* Курс физики : учеб. пособие: в 3 т. Т.3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц /И.В. Савельев – Изд. 4-е, стер. - СПб.[и др.]: Лань,2016. - 308 с.и пред. изд. (2007,1989, 1987)

### Дополнительная литература

6. *Иродов И.Е.* Задачи по общей физике: учеб. пособие / И. Е. Иродов. - Москва: Лань, 2009. - 416 с.— 434 с. и пред. изд. (2007, 2004, 2003, 1988)

7. *Мустафаев А.С.* Введение в ядерную физику: учеб. пособие /А.С.Мустафаев. Н.С.Пшелко; Нац. минер.-сырьевой ун-т "Горный". С-Пб.: Горн.ун-т, 2013.-132 с.

8. *Чуркин Ю.В.* Физика твердого тела: учеб. пособие/ Ю. В. Чуркин, С. В. Субботин ; СЗТУ. - СПб. : Изд-во СЗТУ, 2008. - 144 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение .....	3
2. Методические указания к самостоятельной работе .....	4
3. Методические указания к выполнению.....	5
контрольных работ .....	5
4. Программа раздела молекулярная физика и термодинамика.....	8
5. Учебные материалы и задачи для вариантов контрольных работ ..	9
5.1. Элементы молекулярно-кинетической теории .....	9
5.2. Законы идеального газа.....	11
5.3. Статистические распределения .....	12
5.4. Законы термодинамики и термодинамические процессы .....	14
5.5. Циклы .....	16
5.6. Явления переноса .....	17
5.7. Реальные газы, жидкости и твёрдые тела.....	19
6. Задания для самостоятельной работы .....	23
7. Справочные таблицы.....	49
8. Рекомендательный библиографический список.....	54



## **ФИЗИКА**

### **МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА**

*Методические указания к самостоятельной работе  
для студентов бакалавриата и специалитета  
всех направлений*

Сост.: *В.В. Фицак, Н.Н. Смирнова*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой  
общей и технической физики

Ответственный за выпуск *В.В. Фицак*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 29.04.2019. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 3,2. Усл.кр.-отт. 3,2. Уч.-изд.л. 2,5. Тираж 100 экз. Заказ 413. С 158.

Санкт-Петербургский горный университет  
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета  
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2