

**ПРАКТИКУМ  
ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ  
К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПО РАЗДЕЛАМ  
«МЕХАНИКА» И «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА»**

**ОМСК 2022**

Министерство транспорта Российской Федерации  
Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Омский государственный университет путей сообщения

---

ПРАКТИКУМ  
ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ  
К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПО РАЗДЕЛАМ  
«МЕХАНИКА» И «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА»

Утверждено методическим советом университета

Омск 2022

УДК 531(075.8)  
ББК 22.2я73  
В64

**Практикум для самостоятельной подготовки студентов к решению задач по разделам «Механика» и «Молекулярная физика»:** / С. В. Вознюк, С. А. Гельвер, Л. А. Литневский, Ю. М. Сосновский, Г. Б. Тодер, Н. А. Хмырова; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2022. 34 с.

В практикуме содержатся примеры решения задач по разделам «Механика» и «Молекулярная физика», задачи для самостоятельной работы, справочные данные и библиографический список.

Студентам предоставляется возможность систематического индивидуального обучения на аудиторных и внеаудиторных, в частности, дистанционных занятиях путем решения каждым студентом собственного набора задач, подобранного в соответствии с таблицей вариантов.

Практикум предназначен для самостоятельной работы студентов первого курса очной формы обучения.

Библиогр.: 8 назв. Табл. 4. Рис. 4. Прил. 2.

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор В. В. Харламов;  
канд. физ.-мат. наук, доцент В. В. Дмитриев.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	5
1. Примеры решения задач .....	6
2. Задачи для самостоятельного решения .....	19
2.1. Кинематика поступательного движения.....	19
2.2. Динамика поступательного движения .....	20
2.3. Кинематика и динамика вращательного движения .....	21
2.4. Закон сохранения импульса .....	22
2.5. Закон сохранения момента импульса.....	24
2.6. Энергия, работа. Закон сохранения энергии .....	25
2.7. Первый закон термодинамики .....	26
2.8. Второй закон термодинамики .....	28
Библиографический список.....	30
Приложение 1. Таблица вариантов и номера задач.	
Разделы «Механика» и «Молекулярная физика» .....	31
Приложение 2. Справочные данные.....	32



## ВВЕДЕНИЕ

При изучении курса физики решение задач имеет большое значение. Задачи позволяют лучше понять и запомнить основные законы физики, развивают навыки в применении теоретических знаний для решения конкретных практических вопросов.

Цель настоящего пособия – оказать помощь студентам в освоении методики решения типовых физических задач по разделам «Механика» и «Молекулярная физика».

В пособии два основных раздела: примеры решения задач и задачи для самостоятельного решения. Представлены примеры решения задач по кинематике и динамике поступательного движения материальной точки, по кинематике и динамике вращательного движения абсолютно твердого тела вокруг неподвижной оси, на законы сохранения импульса, момента импульса и энергии, а также на законы молекулярной физики и термодинамики. Теоретические сведения, необходимые для решения задач, содержатся в работах [1 – 3]. Примеры оформления решения задач показаны в учебно-методической литературе [4 – 8].

В основу каждой физической задачи положен частный случай проявления общих законов физики. Поэтому прежде чем приступить к решению задачи, необходимо тщательно изучить соответствующую теорию. Затем следует внимательно прочитать и записать условия задачи, перевести единицы измерения всех величин в основные единицы системы СИ и, если это необходимо, сделать схематический рисунок, отражающий условия задачи.

Все задачи следует решать в общем виде. Это означает, что сначала выводится формула для расчета искомой величины, а затем в нее подставляются численные данные. Такой подход позволяет выработать общие приемы решения задач по каждому разделу физики.

При вычислениях часто удобно использовать формулы приближения, позволяющие упростить расчеты, не влияя на их точность.

По задачам из настоящего пособия может проводиться контроль самостоятельной работы (КСР) студентов. Номера задач для КСР определяются по таблице вариантов, расположенной в прил. 1. Номер варианта определяется по двум последним цифрам шифра в зачетной книжке студента. Студенты, имеющие две последние цифры шифра 01, 02, ..., 49, 50, выполняют варианты 1, 2, ..., 49, 50. Студенты, имеющие две последние цифры шифра 51, 52, ..., 99, 00, выполняют варианты 1, 2, ..., 49, 50.

## 1. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

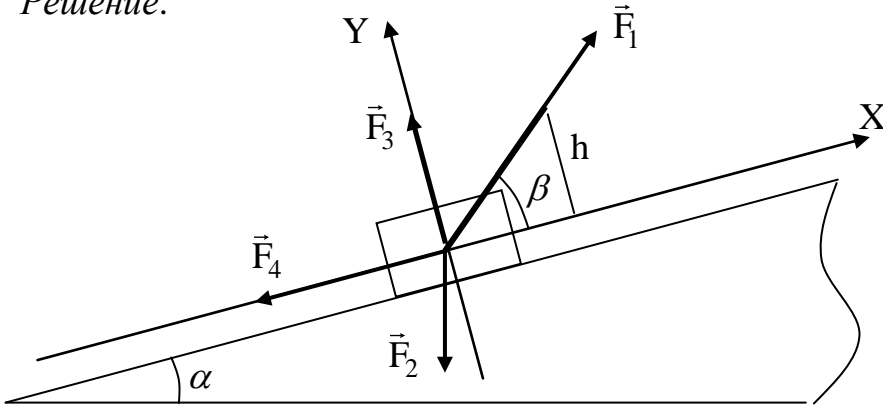
**Задача 1.** Радиус-вектор материальной точки меняется с течением времени по закону  $\vec{r}(t) = At^3\vec{i} + Bt^2\vec{j} + C\vec{k}$ , где  $A = 2 \text{ м/с}^3$ ;  $B = 4 \text{ м/с}^2$ ;  $C = -2 \text{ м}$  – константы. Найти модуль мгновенной скорости и ускорение точки через 2 с от начала движения.

<p>Дано:</p> $\vec{r}(t) = At^3\vec{i} + Bt^2\vec{j} + C\vec{k}$ $A = 2 \text{ м/с}^3$ ; $B = 4 \text{ м/с}^2$ $C = -2 \text{ м}$ ; $t_1 = 2 \text{ с}$	<p>Решение.</p> <p>Мгновенную скорость находим по формуле:</p> $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = 3At^2\vec{i} + 2Bt\vec{j}, \text{ где } v_x = 3At^2, v_y = 2Bt. \text{ Отсю-}$ <p>да <math>v_1 = \sqrt{v_{1x}^2 + v_{1y}^2 + v_{1z}^2} = \sqrt{(3At^2)^2 + (4Bt)^2}.</math></p>
<hr/> $v_1 - ?$ ; $\vec{a}_1 - ?$	

Мгновенное ускорение находим по формуле:  $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = 6At\vec{i} + 2B\vec{j}.$

Численный расчет:  $v_1 = \sqrt{(3 \cdot 2 \cdot 2^2)^2 + (4 \cdot 4 \cdot 2)^2} = 40 \text{ м/с};$   
 $\vec{a}_1 = 6 \cdot 2 \cdot 2\vec{i} + 2 \cdot 4\vec{j} = (24\vec{i} + 8\vec{j}) \text{ м/с}^2.$

**Задача 2.** Небольшие санки массой 3 кг при помощи веревки длиной 1,5 м тянут с постоянной скоростью вверх по наклонной плоскости, составляющей с горизонтом угол  $30^\circ$  (рис. 1.1). К веревке (вдоль нее) прикладывают силу в 21 Н. Расстояние от свободного конца веревки до наклонной плоскости равно 1 м (веревка прикреплена к центру масс санок). Найти коэффициент трения скольжения санок о поверхность плоскости.

<p>Дано:</p> $m = 3 \text{ кг}$ $l = 1,5 \text{ м}$ $h = 1 \text{ м}$ $F_1 = 21 \text{ Н}$ $\alpha = 30^\circ$	<p>Решение.</p> 
<hr/> $\mu - ?$	<p style="text-align: center;">Рис. 1.1</p>

Санки, участвующие в поступательном движении, примем за материальную точку. Согласно основному уравнению динамики частицы (второму закону Ньютона) имеем:

$$m\vec{a} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 \quad (1.1)$$

(в инерциальной системе отсчета произведение массы частицы на ее ускорение равно векторной сумме всех сил, действующих на эту частицу).

На санки действуют (см. рис. 1.1) силы:  $\vec{F}_1$ , направленная под углом  $\beta$  к перемещению; тяжести  $\vec{F}_2$ ; реакции опоры  $\vec{F}_3$ ; трения  $\vec{F}_4$ .

Выбираем инерциальную систему отсчета, связывая ее с неподвижной наклонной плоскостью так, чтобы ось X была направлена в сторону движения тела. Находим проекции всех векторов уравнения движения на координатные оси:

$$X: ma_x = F_1 \cos \beta - F_2 \sin \alpha - F_4; \quad (1.2)$$

$$Y: 0 = F_1 \sin \beta - F_2 \cos \alpha + F_3. \quad (1.3)$$

Учитывая, что ускорение равно нулю (так как санки движутся с постоянной скоростью),

$$\sin \alpha = h / l; \quad (1.4)$$

$$\cos \beta = \sqrt{1 - h^2 / l^2}; \quad (1.5)$$

$$F_2 = mg; \quad (1.6)$$

$$F_4 = \mu F_3 = \mu(F_2 \cos \alpha - F_1 \sin \beta), \quad (1.7)$$

получаем:

$$\mu = \frac{F_1 \sqrt{1 - h^2 / l^2} - mg \sin \alpha}{mg \cos \alpha - F_1 \frac{h}{l}}. \quad (1.8)$$

Проверяем единицу измерения:

$$[\mu] = \frac{H - H}{H - H} = 1.$$

Производим вычисления:



$$\mu = \frac{21\sqrt{1 - 1^2/1,5^2} - 3 \cdot 9,8 \sin 30^\circ}{3 \cdot 9,8 \cos 30^\circ - 21 \cdot \frac{1}{1,5}} = 0,08.$$

О т в е т:  $\mu = 0,08$ .

З а д а ч а 3. Найти силу трения между тормозной колодкой и ободом колеса, вращающегося с частотой 30 об/с, если под действием этой силы колесо останавливается за 20 с (рис. 1.2). Колесо имеет форму сплошного диска массой 10 кг и диаметром 0,2 м. Сколько оборотов сделает колесо до остановки?

Дано:
$v_0 = 30$ об/с
$t = 20$ с
$m = 10$ кг
$d = 0,2$ м
$F_4 - ?$
$N - ?$

Решение.

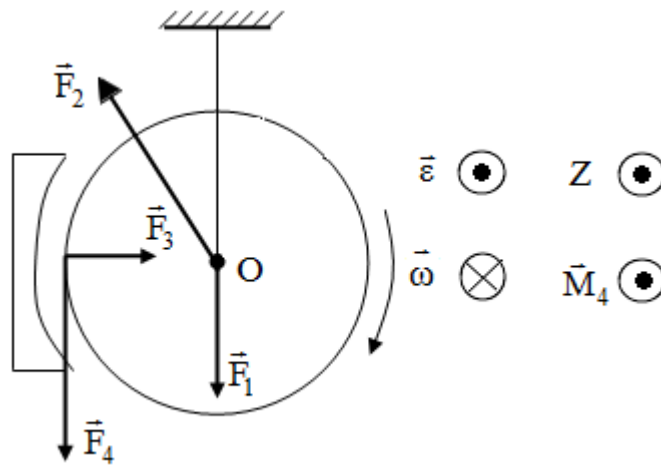


Рис. 1.2

Колесо вращается относительно неподвижной оси, проходящей через центр инерции О. Согласно основному уравнению динамики вращательного движения абсолютно твердого тела вокруг неподвижной оси

$$I \ddot{\varepsilon} = \vec{M}_1 + \vec{M}_2 + \vec{M}_3 + \vec{M}_4 \quad (1.9)$$

(в инерциальной системе отсчета произведение момента инерции твердого тела относительно центра масс на его угловое ускорение равно векторной сумме моментов всех внешних сил, действующих на это тело относительно центра масс). На колесо действуют (см. рис. 1.2) силы: тяжести  $\vec{F}_1$ ; реакции опоры  $\vec{F}_2$ ;  $\vec{F}_3$ , с которой прижимают к колесу тормозную колодку; трения  $\vec{F}_4$  между колодкой и ободом колеса (трением на оси колеса можно пренебречь).

Направление вращения колеса указано на рис. 1.2. Направление угловой скорости определяем в соответствии с направлением вращения по правилу обхвата (буравчика). Так как вращение замедленное, угловое ускорение направлено противоположно угловой скорости, как указано на рис. 1.2. Выбираем инерциальную систему отсчета, в которой ось  $Z$  сонаправлена с угловым ускорением. Проектируем уравнение (1.9) на ось  $Z$ :

$$I_z \varepsilon_z = M_4 = F_4 \cdot \frac{d}{2} \quad (1.10)$$

(проекции моментов сил  $\vec{F}_1$ ,  $\vec{F}_2$  и  $\vec{F}_3$  на ось  $Z$  равны нулю).

Колесо имеет форму сплошного диска, поэтому момент инерции

$$I_z = \frac{1}{2} m R^2 = \frac{1}{2} m \left( \frac{d}{2} \right)^2. \quad (1.11)$$

Движение колеса вращательное равнопеременное, поэтому для решения задачи воспользуемся формулами:

$$\omega_z = \omega_{0z} + \varepsilon_z t; \quad (1.12)$$

$$\varphi = \frac{\omega_{0z} + \omega_z}{2} t; \quad (1.13)$$

$$\varphi = \omega_{0z} t + \frac{\varepsilon_z t^2}{2}; \quad (1.14)$$

$$\varphi = \frac{\omega_z^2 - \omega_{0z}^2}{2\varepsilon_z}; \quad (1.15)$$

$$\varphi = 2\pi N; \quad (1.16)$$

$$\omega_z = 2\pi \nu_z. \quad (1.17)$$

Учитывая, что колесо остановится ( $\omega_z = 0$ ), получаем:

$$\varepsilon_z = \frac{\omega - \omega_0}{t} = \frac{0 - 2\pi \nu_0}{t} = - \frac{2\pi \nu_0}{t}. \quad (1.18)$$

Тогда окончательно имеем:  $\frac{1}{2} m \left( \frac{d}{2} \right)^2 \left( \frac{2\pi \nu_0}{t} \right) = F_4 \cdot \frac{d}{2}$ , отсюда  $F_4 = \frac{m d \pi \nu_0}{2t}$ .

Проверяем единицу измерения:

$$[F_4] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-1}}{\text{с}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} = \text{Н}.$$

Производим вычисления:

$$F_4 = \frac{10 \cdot 0,2 \cdot 3,14 \cdot 30}{2 \cdot 20} = 4,7 \text{ Н}.$$

Количество оборотов  $N$ , которое сделает колесо до остановки, вычисляем через полный угол поворота колеса:  $\varphi = 2\pi N = \frac{\omega_{0z} + \omega_z}{2} t = \frac{2\pi v_0}{2} t$ , отсюда

$$N = \frac{v_0}{2} t.$$

Проверяем единицу измерения:

$$[N] = \text{с}^{-1} \cdot \text{с} = 1.$$

Производим вычисления:

$$N = \frac{30}{2} \cdot 20 = 300.$$

О т в е т:  $F_4 = 4,7 \text{ Н}$ ;  $N = 300 \text{ об.}$

**Задача 4.** Налетев на пружинный буфер, вагон массой 16 т, двигавшийся со скоростью 0,6 м/с, остановился, сжав пружину на 8 см. Найти общую жесткость пружин буфера. Насколько бы деформировались пружины при уменьшении скорости вагона в два раза?

Дано:	СИ	Решение.
$m = 16 \text{ т}$	$1,6 \cdot 10^4 \text{ кг}$   $8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$	В первом случае двигавшийся вагон обладал кинетической энергией, которая после его остановки полностью перешла в потенциальную энергию сжатых пружин буфера. Поэтому по закону сохранения энергии можно записать:
$v_1 = 0,6 \text{ м/с}$		
$v_2 = v_1 / 2$		
$\Delta x_1 = 8 \text{ см}$		
$k - ?$		$\frac{mv_1^2}{2} = \frac{k\Delta x_1^2}{2}. \quad (1.19)$
$\Delta x_2 - ?$		

Отсюда

$$k = \frac{mv_1^2}{\Delta x_1^2}. \quad (1.20)$$

Проверяем единицу измерения:

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

Производим вычисления:

$$k = \frac{1,6 \cdot 10^4 \cdot 0,6^2}{(8 \cdot 10^{-2})^2} = 900000 \left( \frac{\text{Н}}{\text{м}} \right) = 9 \cdot 10^5 \left( \frac{\text{Н}}{\text{м}} \right).$$

Во втором случае вагон остановился не полностью, поэтому в потенциальную энергию буферных пружин перешла только часть кинетической энергии. С учетом этого запишем:

$$\frac{mv_1^2}{2} = \frac{mv_2^2}{2} + \frac{k\Delta x_2^2}{2}. \quad (1.21)$$

Отсюда

$$\Delta x_2 = \frac{v_1}{2} \sqrt{\frac{3m}{k}}. \quad (1.22)$$

Проверяем единицу измерения:

$$[\Delta x_2] = \frac{\text{м}}{\text{с}} \left( \frac{\text{кг}}{\text{Н/м}} \right)^{1/2} = \frac{\text{м}}{\text{с}} \left( \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}} \right)^{1/2} = \text{м}.$$

Производим вычисления:

$$\Delta x_2 = \frac{0,6}{2} \sqrt{\frac{3 \cdot 1,6 \cdot 10^4}{9 \cdot 10^5}} \approx 0,069 \text{ (м)} \approx 7 \text{ (см)}.$$

О т в е т:  $k = 9 \cdot 10^5 \left( \frac{\text{Н}}{\text{м}} \right), \quad \Delta x_2 \approx 7 \text{ (см)}.$

**Задача 5.** Небольшой ящик массой 20 кг соскальзывает по идеально гладкому лотку длиной 2 м на неподвижную тележку с песком (рис. 1.3) и застревает в нем. Тележка с песком массой 80 кг может свободно (без трения) перемещаться по рельсам в горизонтальном направлении. Определить скорость тележки с ящиком, если лоток наклонен под углом  $30^\circ$  к рельсам.

Дано:

$$m_1 = 20 \text{ кг}$$

$$l = 2 \text{ м}$$

$$m_2 = 80 \text{ кг}$$

$$\alpha = 30^\circ$$

$$v'_{2x} = ?$$

Решение.

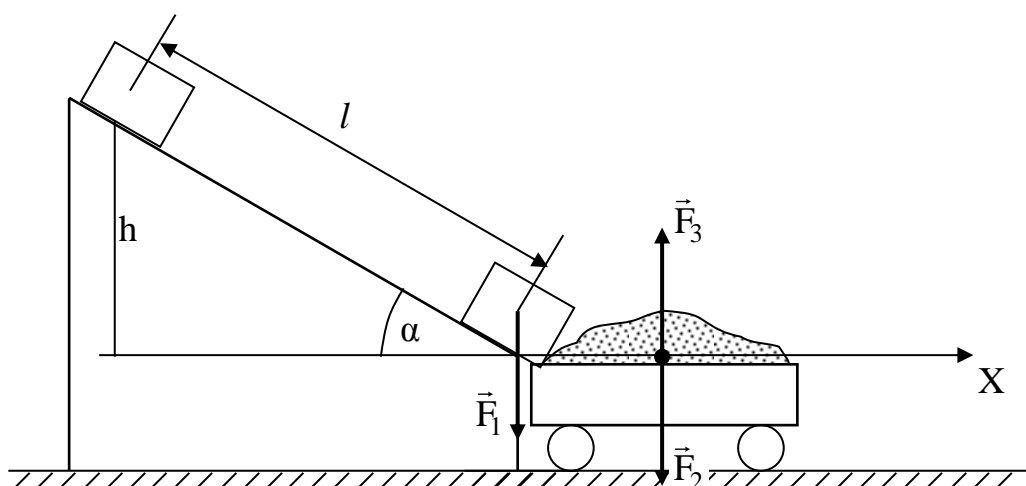


Рис. 1.3

Тележку и ящик можно рассматривать как систему двух неупруго взаимодействующих тел. Эта система не замкнута, так как сумма внешних сил (см. рис. 1.3), действующих на систему (сил тяжести  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$  и силы реакции опоры  $\vec{F}_3$ ), не равна нулю, поэтому применить закон сохранения импульса к системе «ящик – тележка» нельзя, но так как проекция суммы указанных сил на ось X, параллельную рельсам, равна нулю, проекцию импульса системы на это направление можно считать постоянной, т. е.

$$p_{1x} + p_{2x} = p'_{1x} + p'_{2x}, \quad (1.23)$$

где  $p_{1x}$  и  $p_{2x}$  – проекции импульса ящика и тележки с песком непосредственно перед падением ящика на тележку;  $p'_{1x}$  и  $p'_{2x}$  – то же после падения ящика.

Учитывая, что тележка до взаимодействия с ящиком покоилась ( $p_{2x} = 0$ ), а после взаимодействия оба тела системы движутся с одной скоростью  $v'_{2x}$ , получаем:

$$m_1 v_1 \cos \alpha = (m_1 + m_2) v'_{2x}. \quad (1.24)$$

Скорость ящика перед падением на тележку  $v_1$  определяем из закона сохранения механической энергии:

$$m_1 g h = \frac{m_1 v_1^2}{2}, \quad (1.25)$$

где  $h = l \sin \alpha$ .

Решая уравнения (1.24) и (1.25) совместно относительно  $v'_{2x}$ , получаем:

$$v'_{2x} = \frac{m_1 \sqrt{2 g l \sin \alpha \cos \alpha}}{m_1 + m_2}. \quad (1.26)$$

Проверяем единицу измерения:

$$[v'_{2x}] = \frac{\text{кг} \sqrt{\text{м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{м}}}{\text{кг}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Производим вычисления:

$$v'_{2x} = \frac{20 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2 \cdot \sin 30^\circ \cdot \cos 30^\circ}}{20 + 80} = 0,767 \text{ (м/с)}.$$

О т в е т:  $v'_{2x} = 0,767 \text{ м/с}$ .

**Задача 6.** Платформа в виде сплошного диска радиусом 1,5 м и массой 180 кг вращается по инерции вокруг вертикальной оси, делая 12 об/мин. В центре платформы стоит человек массой 60 кг. Какую линейную скорость относительно пола помещения будет иметь человек, если он перейдет на край платформы?

Дано:	СИ	Решение.
$R = 1,5 \text{ м}$	0,2 об/с	Платформа вращается по инерции, следовательно, момент внешних сил относительно оси вращения $Z$ , совпадающей с геометрической осью платформы, равен нулю.
$m_1 = 180 \text{ кг}$		
$m_2 = 60 \text{ кг}$		
$v_1 = 12 \text{ об/мин}$		
$v_2 = ?$		При этом условии момент импульса ( $\vec{L} = I \vec{\omega}$ ) системы «платформа – человек» относительно оси $Z$ остается постоянным:

$$(I_1 + I_2) \vec{\omega} = (I'_1 + I'_2) \vec{\omega}', \quad (1.27)$$

где  $I_1$  и  $I_2$  – моменты инерции платформы и человека в начальном состоянии системы;  $I_1'$  и  $I_2'$  – моменты инерции платформы и человека в конечном состоянии системы (после перехода на край платформы);  $\vec{\omega}$  и  $\vec{\omega}'$  – угловая скорость вращения системы в начальном и конечном состояниях.

Найдя проекции всех величин, входящих в векторное уравнение (1.27), относительно инерциальной системы отсчета (ось  $Z$  совпадает с геометрической осью вращения платформы), запишем закон сохранения момента импульса в скалярной форме:

$$(I_{1z} + I_{2z}) \omega_z = (I_{1z}' + I_{2z}') \omega_z'. \quad (1.28)$$

Момент инерции платформы относительно оси  $Z$  при переходе человека не изменяется:

$$I_{1z} = I_{1z}' = 0,5 m_1 R^2. \quad (1.29)$$

Момент инерции человека относительно той же оси будет изменяться. Если рассматривать человека как материальную точку, то его момент инерции в начальном положении (в центре платформы)  $I_{2z}$  можно считать равным нулю. В конечном положении (на краю платформы) момент инерции человека

$$I_{2z}' = m_2 R^2. \quad (1.30)$$

Учитывая сказанное выше и то, что  $\omega_z' = v/R$  ( $v$  – линейная скорость человека относительно пола), получаем:

$$\left( \frac{1}{2} m_1 R^2 + 0 \right) 2\pi v_1 = \left( \frac{1}{2} m_1 R^2 + m_2 R^2 \right) \frac{v}{R}. \quad (1.31)$$

После сокращения на  $R^2$  и простых преобразований находим:

$$v = \frac{2\pi v_1 m_1 R}{m_1 + 2 m_2}. \quad (1.32)$$

Проверяем единицу измерения:

$$[v] = \frac{c^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}}{\text{кг}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Производим вычисления:

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,2 \cdot 180 \cdot 1,5}{180 + 2 \cdot 60} = 1,13 \left( \frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$$

О т в е т:  $v = 1,13 \text{ м/с}$ .

**Задача 7.** В цилиндре под поршнем находится водород массой 20 г при температуре 27 °С. Водород сначала расширился адиабатно, увеличив свой объем в пять раз, а затем был сжат изотермически до первоначального объема. Найти изменение внутренней энергии газа, работу, совершенную газом в этих процессах, и количество теплоты, подведенной к газу в этих процессах. Изобразить процессы в диаграмме «давление – объем».

Графики процессов адиабатного расширения 1 – 2 и изотермического сжатия 2 – 3 согласно условию задачи изображены на диаграмме (рис. 1.4) в PV-координатах.

Дано:	СИ
$m = 20 \text{ г}$	$m_1 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ кг}$
$M = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$	
$t_1 = 27 \text{ °С}$	$T_1 = 300 \text{ К}$
$V_3 = V_1; V_2/V_1 = 5$	
$T_2 = \text{const}$	
$i = 5$	
$\Delta W - ?$	
$A - ?$	
$Q - ?$	

*Решение.*

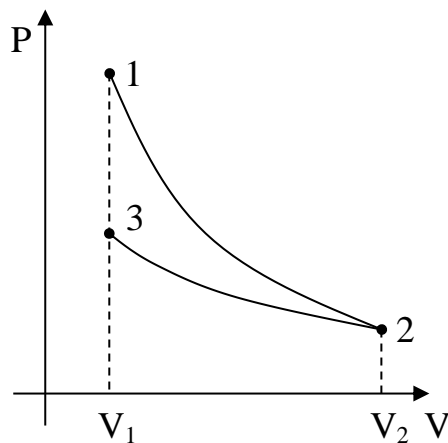


Рис. 1.4

Изменение внутренней энергии идеального газа в процессе 1 – 2 – 3 вычисляется по формуле:

$$\Delta W_{\text{вн}} = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R (T_3 - T_1), \quad (1.33)$$

где  $i$  – число степеней свободы молекул двухатомного газа водорода  $\text{H}_2$ ;  $T_3 = T_2$ , так как процесс 2 – 3 изотермический.

При адиабатном процессе 1 – 2 температура и объемы газа связаны между собой уравнением:

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}, \quad (1.34)$$



где  $\gamma$  – постоянная адиабаты для двухатомного газа,  $\gamma = \frac{i+2}{i} = 1,4$ , отсюда

$$T_3 = T_2 = T_1(V_1/V_2)^{\gamma-1}. \quad (1.35)$$

Тогда общее изменение внутренней энергии газа

$$\Delta W_{\text{вн}} = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R T_1 \left( \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} - 1 \right). \quad (1.36)$$

Проверяем единицу измерения:

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

Производим вычисления:

$$\Delta W_{\text{вн}} = \frac{5}{2} \frac{2 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-3}} \cdot 8,31 \cdot 300 \left( \left( \frac{1}{5} \right)^{1,4-1} - 1 \right) = -29,6 \text{ (кДж)}.$$

Так как в изотермическом процессе 2 – 3  $\Delta W_{\text{вн}2-3} = 0$ , работу  $A_{1-2}$  газа при адиабатном расширении 1 – 2 вычисляем по формуле:

$$A_{1-2} = -\Delta W_{\text{вн}1-2} = -\Delta W_{\text{вн}1-3}; \quad (1.37)$$

$$A_{1-2} = 29,6 \text{ кДж}.$$

Работу  $A_{2-3}$  при изотермическом сжатии рассчитываем по уравнению:

$$A_{2-3} = \frac{m}{M} R T_2 \ln \frac{V_3}{V_2} = \frac{m}{M} R T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \ln \frac{V_3}{V_2}. \quad (1.38)$$

Проверяем единицу измерения:

$$[A_{2-3}] = \frac{\frac{\text{кг}}{\text{кг}}}{\text{моль}} \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot \text{К} = \text{Дж}.$$

Производим вычисления:

$$A_{2-3} = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-3}} \cdot 8,31 \cdot 300 \left( \frac{1}{5} \right)^{1,4-1} \ln \frac{1}{5} = -21,1 \text{ (кДж)}.$$

Следовательно, полная работа, совершаемая газом,

$$A_{1-3} = A_{1-2} + A_{2-3}; \quad (1.39)$$

$$A_{1-3} = 29,6 - 21,1 = 8,5 \text{ (кДж)}.$$

Согласно первому закону термодинамики теплота  $Q$ , переданная газу, равна сумме изменения внутренней энергии и работы:

$$Q = \Delta W_{\text{вн}} + A_{1-3}; \quad (1.40)$$

$$Q = -29,6 + 8,5 = -21,1 \text{ кДж}.$$

О т в е т:  $\Delta W_{\text{вн}} = -29,6 \text{ кДж}$ ;  $A_{1-3} = 8,5 \text{ кДж}$ ;  $Q = -21,1 \text{ кДж}$  (тепло отводится).

З а д а ч а 8. Два килограмма льда, находящегося при температуре  $-13^\circ\text{C}$ , нагрели и превратили в пар. Определить изменение энтропии в этом процессе.

Дано:	СИ	Решение.
$m = 2 \text{ кг}$		Весь процесс можно разбить
$t_1 = -13^\circ\text{C}$	$T_1 = 260 \text{ K}$	на четыре отдельных процесса: на-
$t_2 = 0^\circ\text{C}$	$T_2 = 273 \text{ K}$	гревание льда от температуры $T_1$ до
$c_1 = 2100 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$		температуры плавления $T_2$ ; плавле-
$\lambda = 330 \text{ кДж/кг}$	$\lambda = 3,3 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$	ние льда при постоянной темпера-
$c_2 = 4190 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$		туре $T_2$ ; нагревание воды, образо-
$t_3 = 100^\circ\text{C}$	$T_3 = 373 \text{ K}$	вавшейся при плавлении льда, до
$r = 2,25 \text{ МДж/кг}$	$r = 2,25 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$	температуры кипения $T_3$ ; превраще-
$\Delta S - ?$		ние воды в пар при постоянной тем-
		пературе $T_3$ .

Общее изменение энтропии  $\Delta S$  равно сумме изменений энтропии, происходящих на отдельных стадиях процесса:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3 + \Delta S_4. \quad (1.41)$$

Процесс нагревания твердого вещества (льда) происходит при неизменном объеме ( $\delta A = 0$ ), следовательно, изменение энтропии в этом процессе

$$\Delta S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q_1}{T} = \int_1^2 \frac{dW_{\text{вн}}}{T} = mc_1 \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = mc_1 \ln \frac{T_2}{T_1}, \quad (1.42)$$

где  $c_1$  — удельная теплоемкость льда (в этой области температуры  $c_1 = \text{const} = 2100 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ ).

Изменение энтропии  $\Delta S_2$  при плавлении льда ( $T_2 = \text{const}$ )

$$\Delta S_2 = \int_2^3 \frac{\delta Q_2}{T} = \frac{1}{T_2} \int_2^3 \delta Q_2 = \frac{Q_{2-3}}{T_2} = \frac{m\lambda}{T_2}, \quad (1.43)$$

где  $\lambda$  – удельная теплота плавления льда,  $\lambda = 330$  кДж/кг.

Изменение энтропии  $\Delta S_3$  при нагревании воды от  $T_1$  до температуры кипения  $T_3$  (процесс происходит без изменения объема) рассчитываем по формуле:

$$\Delta S_3 = \int_3^4 \frac{\delta Q_3}{T} = mc_2 \ln \frac{T_3}{T_2}, \quad (1.44)$$

где  $c_2$  – удельная теплоемкость воды (в этой области температуры  $c_2 = \text{const} = 4190$  Дж/(кг·К)).

И, наконец, изменение энтропии  $\Delta S_4$  при превращении воды в пар

$$\Delta S_4 = \int_4^5 \frac{\delta Q_4}{T} = \frac{1}{T_3} \int_4^5 \delta Q_4 = \frac{Q_{4-5}}{T_3} = \frac{mr}{T_3}, \quad (1.45)$$

где  $r$  – удельная теплота парообразования воды,  $r = 2,25$  МДж/кг.

Таким образом, общее изменение энтропии в данном процессе

$$\Delta S = m \left( c_1 \ln \frac{T_2}{T_1} + \frac{\lambda}{T_2} + c_2 \ln \frac{T_3}{T_2} + \frac{r}{T_3} \right). \quad (1.46)$$

Проверяем единицу измерения:

$$[\Delta S] = \text{кг} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

Производим вычисления:

$$\Delta S = 2 \left( 2100 \cdot \ln \frac{273}{260} + \frac{3,3 \cdot 10^5}{273} + 4190 \cdot \ln \frac{373}{273} + \frac{2,25 \cdot 10^6}{373} \right) = 17,3 \text{ (кДж/К)}.$$

О т в е т:  $\Delta S = 17,3$  кДж/К.

## 2. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

### 2.1. Кинематика поступательного движения

1) Ускорение частицы меняется с течением времени по закону  $\vec{a}(t) = At^3\vec{i} + Bt^{4/3}\vec{j}$ , где  $A = 0,04 \text{ м/с}^5$  и  $B = 0,4 \text{ м/с}^{10/3}$ . Начальная скорость частицы  $\vec{v}_0 = L\vec{j}$ , где  $L = 0,13 \text{ м/с}$ . Найти: а) модуль скорости частицы через 0,84 с после начала движения; б) перемещение частицы за время от 0,3 с до 0,6 с.

2) Зависимость ускорения частицы от времени задана соотношениями:  $a_x(t) = At^4$ ;  $a_y(t) = Ct$ ;  $a_z(t) = 0 \text{ м/с}^2$ , где  $A = 0,0016 \text{ м/с}^6$ ;  $C = 2,7 \text{ м/с}^3$ . Начальная скорость частицы  $\vec{v}_0 = L\vec{j} + M\vec{k}$ , где  $L = 44 \text{ м/с}$ ;  $M = 26 \text{ м/с}$ . Найти: а) зависимость скорости частицы от времени; б) модуль перемещения частицы за промежуток времени от 2 с до 3 с.

3) Зависимость скорости материальной точки от времени имеет вид:  $\vec{v}(t) = A\sqrt{t^3}\vec{i} + Bt^3\vec{j} + Ct^2\vec{k}$ , где  $A = 5 \text{ м/с}^{5/2}$ ;  $B = 2,1 \text{ м/с}^4$ ;  $C = 3,5 \text{ м/с}^3$ . Найти: а) зависимость ускорения от времени; б) модуль перемещения через 4 с после начала движения материальной точки.

4) Радиус-вектор материальной точки меняется с течением времени по закону  $\vec{r}(t) = At^3\vec{i} + Bt^4\vec{k}$ , где  $A = 2 \text{ м/с}^3$ ;  $B = 0,7 \text{ м/с}^4$ . Найти: а) зависимость ускорения точки от времени; б) угол между радиусом-вектором и ускорением точки через 1,8 с от начала движения.

5) Частица движется с зависящей от времени скоростью  $\vec{v}(t) = At^2\vec{i} + Bt\vec{j}$ , где  $A = 1,2 \text{ м/с}^3$ ;  $B = 7,1 \text{ м/с}^2$ . В начальный момент времени частица находилась в начале координат. Найти: а) модуль ускорения частицы в момент времени, равный 2,7 с; б) перемещение частицы за промежуток времени от  $t_1 = 1,4 \text{ с}$  до  $t_2 = 3,8 \text{ с}$ .

6) Реактивный снаряд движется в плоскости  $xOy$  так, что его координаты меняются с течением времени по закону  $x(t) = (2,3t^2 - 4,5) \text{ м}$ ;  $y(t) = (3,7t - 1,6) \text{ м}$ . В момент времени, равный 86 с, найти скорость и ускорение снаряда, а также их модули. Получить уравнение траектории и построить ее. Определить перемещение снаряда за первые 12 с движения.

7) Скорость лыжника в конце уклона равна 6 м/с. Найти начальную скорость лыжника и ускорение, с которым он двигался, если уклон длиной 90 м он прошел за 33 с.

8) При торможении мотоцикл, двигавшийся со скоростью 106 км/ч, остановился через 6 с. Найти тормозной путь мотоцикла.

9) Через переезд одновременно начинают проезжать два состава. Длина первого состава в 1,4 больше длины второго. Ускорение первого состава в 2,5 раза больше, чем второго. Скорость первого поезда в начале пути в 4,2 раза меньше скорости второго. Сравнить промежутки времени, за которые составы полностью проехали переезд, и приобретенные ими за это время скорости.

10) Охотник, стоявший под деревом, стреляет в прыгающую с дерева белку в момент ее отрыва от ветки, расположенной непосредственно над охотником на высоте 62 м. Скорость вылета пули из ружья 24 м/с. Начальная скорость белки 6 м/с направлена под углом  $20^\circ$  вниз к горизонту. Найти: а) под каким углом к горизонту должен целиться охотник, чтобы попасть в белку; б) через какое время пуля попадет в белку. Сопротивлением воздуха пренебречь.

## 2.2. Динамика поступательного движения

11) На небольшое покоящееся тело массой 2 кг действовали силой, направленной под углом  $30^\circ$  вверх к горизонту. После начала движения по горизонтальной поверхности тело за 5 с прошло 25 м. Найти значение действующей силы, если коэффициент трения скольжения равен 0,02.

12) Тело массой 200 кг равномерно поднимают по наклонной плоскости, образующей угол  $30^\circ$  с горизонтом, прикладывая силу 1500 Н вдоль линии движения. С каким по величине ускорением тело будет соскальзывать вдоль этой наклонной плоскости, если его отпустить?

13) Какую по величине силу необходимо приложить под углом  $30^\circ$  к горизонту к центру инерции платформы массой 16 т, стоящей на рельсах, чтобы она стала двигаться равноускоренно и за 30 с прошла 20 м, если коэффициент сопротивления равен 0,05?

14) Мальчик тянет нагруженные сани массой 50 кг в гору с силой 200 Н. Угол наклона горы равен  $15^\circ$ . Веревка, за которую мальчик тянет, составляет угол  $45^\circ$  с горизонтом. Коэффициент трения санок о поверхность горки равен 0,02. Определить ускорение, с которым движутся санки.

15) Автомобиль массой  $6,8 \cdot 10^3$  кг подъехал к подъему дороги с углом наклона  $15^\circ$ . Сила тяги автомобиля – 8 кН, коэффициент сопротивления – 0,06. Найти величину ускорения автомобиля при подъеме.

16) На каком расстоянии от перекрестка начал тормозить водитель при красном свете светофора, если автомобиль двигался в гору с углом наклона  $30^\circ$  с начальной скоростью  $60 \text{ км/ч}$ ? Коэффициент трения между шинами и дорогой  $0,1$ .

17) Два бруска одинаковой массы по  $200 \text{ г}$  поставили на наклонную плоскость с углом наклона  $60^\circ$ . Коэффициент трения верхнего бруска о плоскость  $0,1$ , а нижнего –  $0,5$ . Определить силу взаимодействия брусков при их совместном соскальзывании с наклонной плоскости.

18) Человек толкает газонокосилку массой  $18 \text{ кг}$  с постоянной силой  $90 \text{ Н}$ , направленной вдоль ручки, расположенной под углом  $30^\circ$  к горизонту. Газонокосилка движется с постоянной скоростью. Вычислить величину силы, которую человек должен приложить к газонокосилке, чтобы разогнать ее из состояния покоя до скорости  $4 \text{ км/ч}$  за  $2,5 \text{ с}$ .

19) К потолку трамвайного вагона подвешен на нити небольшой шарик. Вагон тормозит так, что величина его скорости равномерно изменяется от  $18$  до  $6 \text{ км/ч}$  на расстоянии  $3 \text{ м}$ . На какой угол отклонится при этом нить шарика от вертикали?

20) Небольшое тело массой  $100 \text{ г}$  тянут по горизонтальной поверхности с силой  $40 \text{ мН}$ . Если эта сила приложена под углом  $60^\circ$  вверх к горизонту – тело движется равномерно. С каким по величине ускорением будет двигаться тело, если эту силу приложить под углом  $30^\circ$  вверх к горизонту?

### **2.3. Кинематика и динамика вращательного движения**

21) К ободу горизонтально расположенного неподвижного колеса, имеющего форму диска, диаметром  $60 \text{ см}$  и массой  $50 \text{ кг}$  прикладывают касательную силу  $98 \text{ Н}$ . Через сколько времени после начала действия силы колесо будет вращаться с частотой  $100 \text{ об/с}$  относительно вертикальной неподвижной оси, проходящей через центр масс колеса?

22) Горизонтально расположенный обруч, вращаясь равнозамедленно, при торможении уменьшил за  $1 \text{ мин}$  частоту вращения от  $300$  до  $180 \text{ об/мин}$ . Масса обруча –  $2 \text{ кг}$ , диаметр –  $80 \text{ см}$ . Найти модуль тормозящего момента.

23) Сплошной шар диаметром  $20 \text{ см}$  и массой  $35 \text{ кг}$  вращается вокруг неподвижной оси, проходящей через его центр, с частотой  $5 \text{ об/с}$ . На шар действовал постоянный вращающий момент, вследствие чего шар сделал  $200 \text{ об}$  за  $15 \text{ с}$ . Найти модуль вращающего момента.

24) Два горизонтально расположенных колеса, имеющие форму дисков, массой 200 и 400 г и радиусом 10 и 20 см соответственно начинают вращаться одновременно относительно неподвижных осей, проходящих через центры масс дисков. Модуль углового ускорения первого колеса равен  $3,14 \text{ рад/с}^2$ . За 20 с от начала вращения первое колесо сделало на 30 оборотов больше второго. Насколько отличаются по величине вращающие моменты, действующие на колеса?

25) Вентилятор, вращавшийся с частотой 15 об/с, под действием тормозящего момента  $1,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$  останавливается за 40 с. Найти момент инерции вентилятора.

26) По касательной к шкиву маховика в виде диска диаметром 75 см и массой 40 кг приложена сила 1 кН. Определить угловое ускорение маховика, если радиус шкива равен 12 см. Трением пренебречь.

27) Твердый шар диаметром 8 см под действием момента сил  $4,65 \text{ Н}\cdot\text{м}$  ускоряется из состояния покоя и за 15 с совершает 180 полных оборотов вокруг неподвижной оси, проходящей через центр шара. Чему равна масса шара?

28) К ободу однородного сплошного диска диаметром 90 см приложена постоянная касательная сила  $0,1 \text{ кН}$ , приводящая к вращению диска относительно оси, проходящей через его центр инерции. При вращении диска на него действует еще и момент сил трения величиной  $20 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . За 5 с диск увеличивает свою частоту вращения со 180 до 300 об/мин. Определить массу диска.

29) Тонкий однородный стержень длиной 50 см и массой 400 г вращается около вертикальной неподвижной оси, проходящей перпендикулярно стержню через его середину. Определить вращающий момент, при котором стержень из состояния покоя за 4 с приобретет угловую скорость  $12 \text{ с}^{-1}$ .

30) Двум одинаковым маховикам, находящимся в покое, сообщили одинаковую угловую скорость  $63 \text{ рад/с}$  и предоставили их самим себе. Под действием сил трения один маховик остановился через одну минуту, а второй сделал до полной остановки 360 об. У какого маховика тормозящий момент был больше и во сколько раз?

#### **2.4. Закон сохранения импульса**

31) Из первоначально покоившегося орудия массой 1,5 т вылетает снаряд массой 12 кг со скоростью 500 м/с под углом  $60^\circ$  вверх к горизонту. Какова скорость отката орудия?

32) На плот массой 120 кг, движущийся по реке со скоростью 5 м/с, с берега горизонтально (перпендикулярно направлению движения плота) бросают груз массой 80 кг со скоростью 10 м/с. Найти величину и направление скорости плота вместе с грузом после броска.

33) Снаряд массой 10 кг, летящий в вертикальном направлении, разрывается в верхней точке полета на три осколка. Первый осколок массой 5 кг стал двигаться в горизонтальном направлении со скоростью 100 м/с, второй массой 2 кг – в вертикальном направлении вниз со скоростью 50 м/с. Определить величину и направление скорости третьего осколка.

34) Два небольших шарика движутся по взаимно перпендикулярным направлениям. Первый шарик массой 500 г движется со скоростью 2 м/с, второй массой 300 г – со скоростью 1 м/с. Найти величину и направление скорости шариков после их абсолютно неупругого столкновения.

35) Охотник стреляет из ружья с лодки, неподвижной относительно берега, под углом  $30^\circ$  вверх к горизонту, после чего лодка приобретает скорость, равную 0,05 м/с. Масса дроби равна 20 г, скорость вылета дроби относительно берега – 500 м/с, масса охотника – 75 кг. Найти массу лодки.

36) Доска массой 8 кг свободно скользит по поверхности гладкого льда со скоростью 20 м/с. На доску с берега прыгает человек массой 70 кг. Скорость человека равна 2 м/с и направлена горизонтально и перпендикулярно скорости доски. Определить скорость доски с человеком.

37) При горизонтальном полете со скоростью 250 м/с снаряд массой 8 кг разорвался на две части. Большая часть снаряда массой 6 кг получила скорость 400 м/с в направлении полета снаряда. Определить модуль и направление скорости меньшей части снаряда.

38) Метеорит и ракета движутся перпендикулярно друг другу. Ракета попадает в метеорит и застревает в нем. Масса метеорита – 20 т, ракеты – 10 т, скорость метеорита – 180 км/ч, ракеты – 360 км/ч. Определить импульс метеорита и ракеты после соударения.

39) Два шарика массой 6 и 4 кг движутся вдоль одной прямой со скоростью 8 и 3 м/с соответственно. С какой скоростью шарики будут двигаться после абсолютно неупругого удара, если: а) первый шарик догоняет второй; б) шарики движутся навстречу друг другу?



40) Снаряд массой 20 кг, летящий горизонтально со скоростью 500 м/с, попадает в платформу с песком массой 10 т и застревает в нем. Определить скорость, которую получила платформа от толчка.

## 2.5. Закон сохранения момента импульса

41) Платформа, имеющая форму диска, массой 240 кг может вращаться около вертикальной неподвижной оси, проходящей через центр масс платформы. На краю платформы стоит человек. На какой угол повернется платформа, если человек массой 60 кг пойдет вдоль ее края и, обойдя ее, вернется в исходную точку относительно Земли? Момент инерции человека рассчитывать как для материальной точки.

42) В центре неподвижной скамьи Жуковского стоит человек и держит руками ось велосипедного колеса. Ось колеса совпадает с осью скамьи. Колесо вращается с частотой 10 об/с. Момент инерции человека со скамьей –  $5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ , колеса –  $1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . С какой частотой будет вращаться скамья, если ось колеса повернуть на  $90^\circ$  вокруг горизонтальной оси?

43) На краю карусели, имеющей форму диска массой 200 кг и диаметром 4 м, вращающейся с частотой 1 об/с, стоят пять человек, каждый массой по 60 кг. Найти частоту вращения карусели, если все люди сместятся к ее центру на половину радиуса. Считать, что по сравнению с размером карусели люди представляют собой материальные точки.

44) На краю неподвижного диска диаметром 1,8 м и массой 20 кг стоит человек массой 60 кг. С какой частотой начнет вращаться диск, если человек поймает летящий на него небольшой мяч массой 200 г? Траектория мяча горизонтальна и проходит на расстоянии 100 см от оси вращения. Скорость мяча – 5 м/с. Человека считать материальной точкой.

45) На скамье Жуковского стоит человек и держит в вытянутых в разные стороны руках гири массой 5 кг каждая. Расстояние между гирями – 140 см. Скамья вращается с частотой  $1 \text{ с}^{-1}$ . Как изменится частота вращения скамьи, если человек сожмет руки так, что расстояние от каждой гири до оси вращения станет равным 20 см? Момент инерции человека и скамьи –  $2,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

46) Платформа в виде диска вращается по инерции около вертикальной оси с частотой 14 об/мин. На краю платформы стоит человек массой 70 кг. Когда человек перешел в центр платформы, частота вращения возросла до 25 об/мин. Определить массу платформы. Человека считать материальной точкой.

47) Шарик массой 60 г, привязанный к концу нити длиной 1,2 м, вращается с частотой 2 об/с, опираясь на горизонтальную плоскость. Нить укорачивается, приближая шарик к оси до расстояния 60 см. С какой частотой при этом будет вращаться шарик?

48) В центре скамьи Жуковского стоит человек и держит в руках стержень, расположенный вертикально вдоль оси скамьи. Скамья с человеком вращается с угловой скоростью 4 рад/с. С какой угловой скоростью будет вращаться скамья с человеком, если повернуть стержень так, чтобы он занял горизонтальное положение? Суммарный момент инерции человека и скамьи –  $5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Длина стержня – 1,8 м, его масса – 6 кг. Центр инерции стержня с человеком находится на оси платформы.

49) Однородный стержень длиной 1 м и массой 600 г может свободно вращаться вокруг горизонтальной оси, проходящей через один из его концов. В другой конец абсолютно неупруго ударяет пуля массой 7 г, летящая со скоростью 360 м/с перпендикулярно стержню и его оси. С какой угловой скоростью начнет двигаться стержень?

50) Человек массой 60 кг находится на неподвижной платформе массой 100 кг. Какова будет частота вращения платформы, если человек будет двигаться по окружности радиусом 5 м вокруг оси вращения со скоростью 4 км/ч относительно Земли? Диаметр платформы – 10 м. Считать платформу однородным диском, а человека – материальной точкой.

## **2.6. Энергия, работа. Закон сохранения энергии**

51) Из ствола автоматического пистолета вылетела пуля массой 10 г со скоростью 300 м/с. Затвор пистолета массой 200 г прижимается к стволу пружиной, жесткость которой равна 25 кН/м. На какое расстояние отойдет затвор после выстрела? Считать, что пистолет жестко закреплен.

52) В цирковом номере на грудь человека ставят наковальню массой 10 кг, по которой ударяют молотом массой 2 кг. С какой скоростью должен двигаться молот перед неупругим ударом, чтобы после удара механическая энергия системы не превышала 16 Дж?

53) Если на верхний конец вертикально расположенной спиральной пружины положить груз, то пружина сожмется на 3 мм. Насколько сожмет пружину тот же груз, упавший на конец пружины с высоты 8 см?

54) На конце невесомой нерастяжимой нити длиной 1,5 м подвешен шар массой 1,3 кг. В шар попадает и застревает в нем летящая горизонтально со скоростью 47 м/с пластиковая пуля массой 13 г. На какую высоту поднимется шар?

55) Два шарика подвешены на параллельных нитях одинаковой длины так, что они соприкасаются. Масса первого шарика равна 200 г, второго – 100 г. Первый шарик отклоняют так, что его центр тяжести поднимается на высоту 4,5 см, и отпускают. На какую высоту поднимутся шарики после соударения, если удар неупругий?

56) Вентилятор начинает вращаться с постоянной угловым ускорением  $0,3 \text{ рад/с}^2$  и через 15 с после начала вращения приобретает момент импульса  $30 \text{ кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}$ . Насколько изменится кинетическая энергия вентилятора еще через 5 с?

57) Маховик вращается с постоянной частотой 10 об/с, его кинетическая энергия – 8 кДж. За какое время вращения момент сил 50 Н·м, приложенный к этому маховику, увеличит его частоту вращения в два раза?

58) Двигатель мощностью 3 кВт за 12 с разогнал маховик до частоты вращения 10 об/с. Определить момент инерции маховика, если первоначально он покоился.

59) Кинетическая энергия вращающегося маховика равна 1 кДж. Под действием постоянного тормозящего момента маховик начинает вращаться равнозамедленно и, сделав 80 оборотов, останавливается. Определить момент сил торможения.

60) Тонкий однородный стержень длиной 1,2 м и массой 300 г, расположенный вертикально, может вращаться вокруг горизонтальной оси, проходящей через верхний конец, перпендикулярно стержню. Стержень отклоняют от вертикальной оси на угол  $60^\circ$  и отпускают. С какой угловой скоростью стержень будет проходить положение равновесия?

## **2.7. Первый закон термодинамики**

61) Один киломоль одноатомного газа, находящегося при температуре  $27^\circ\text{C}$ , охлаждается изохорически, вследствие чего его давление уменьшается в два раза. Затем газ изобарически расширяется так, что в конечном состоянии его температура равна первоначальной. Изобразить процесс на диаграмме «давление – объем». Вычислить количество теплоты, поглощенной газом, произведенную им работу и приращение внутренней энергии газа.

62) Кислород массой 2,0 кг занимает объем  $1,5 \text{ м}^3$  и находится под давлением 2,0 атм. Газ нагрели сначала при постоянном давлении до объема  $3,0 \text{ м}^3$ , а затем – при постоянном объеме до давления 5,0 атм. Найти изменение внутренней энергии газа, совершенную им работу и переданное газу количество теплоты. Построить график процесса на диаграмме «давление – температура».

63) Кислород массой 200 г занимает объем 100 л и находится под давлением 200 кПа. При нагревании газ расширился при постоянном давлении до объема 300 л, затем его давление возросло до 500 кПа при неизменном объеме. Найти изменение внутренней энергии газа, совершенную им работу и теплоту, переданную газу. Построить график процесса на диаграмме «давление – температура».

64) Один киломоль двухатомного идеального газа занимал первоначально объем  $2,0 \text{ м}^3$  под давлением 1,2 МПа. Газ нагрели при постоянном объеме так, что его давление возросло до 1,6 МПа. Затем газ расширился при этом же давлении до объема  $3,0 \text{ м}^3$ . Определить количество теплоты, сообщенной газу, работу, совершенную им, и изменение его внутренней энергии. Изобразить процесс на диаграмме «давление – температура».

65) Моль идеального газа имеет первоначально температуру  $17^\circ\text{C}$ . Газ расширяется изобарически до тех пор, пока его объем не увеличится в два раза. Затем газ охлаждается изохорически до первоначальной температуры. Определить приращение внутренней энергии газа, работу, совершенную газом, и количество теплоты, полученной газом. Изобразить процесс на диаграмме «объем – температура».

66) Азот массой 14 г, находящийся при температуре  $147^\circ\text{C}$ , адиабатически расширяется так, что давление уменьшается в пять раз, а затем изотермически сжимается до первоначального давления. Найти приращение внутренней энергии газа, совершенную газом работу и количество тепла, отданного газом. Изобразить процесс на диаграмме «давление – объем».

67) Идеальный газ, занимающий объем  $0,39 \text{ м}^3$  при давлении 155 кПа, изотермически расширяется до десятикратного объема, затем изохорически нагревается так, что в конечном состоянии его давление равно первоначальному. В результате этих процессов газу сообщается 1,50 МДж тепла. Вычислить число степеней свободы молекул этого газа. Изобразить процесс на диаграмме «давление – объем».

68) Водород занимает объем  $10,0 \text{ м}^3$  при давлении  $0,1 \text{ МПа}$ . Его нагрели при постоянном объеме до давления  $0,3 \text{ МПа}$ , затем, изотермически увеличив объем, довели давление газа до первоначального. Определить изменение внутренней энергии газа, работу, совершенную им, и теплоту, сообщенную газу. Изобразить процесс на диаграмме «давление – объем».

69) Азот массой  $50,0 \text{ г}$  находится при температуре  $17 \text{ }^\circ\text{C}$ . В результате изохорного охлаждения его давление уменьшилось в два раза, затем в результате изобарного расширения температура газа в конечном состоянии стала равна первоначальной. Определить работу, совершенную газом, изменение внутренней энергии и количество теплоты, сообщенной газу. Изобразить процесс на диаграмме «давление – объем».

70) Углекислый газ массой  $500 \text{ г}$ , находящийся под давлением  $0,5 \text{ МПа}$  при температуре  $127 \text{ }^\circ\text{C}$ , подвергли изотермическому расширению, в результате которого давление газа уменьшилось в три раза. После этого газ подвергли изобарному сжатию до первоначального объема, затем его давление было изохорно увеличено до первоначального значения. Определить изменение внутренней энергии газа, работу, совершенную газом, и количество теплоты, полученной газом за цикл. Изобразить цикл на диаграмме «давление – объем».

## 2.8. Второй закон термодинамики

71) Идеальный газ, расширяясь изотермически при  $T = 300 \text{ К}$ , переходит из состояния, соответствующего адиабате со значением энтропии  $S_1 = 13,6 \text{ Дж/К}$ , в другое состояние, соответствующее адиабате со значением  $S_2 = 210,6 \text{ Дж/К}$ . Какую работу совершает газ в ходе этого процесса?

72) В одном сосуде, объем которого равен  $1,6 \text{ л}$ , находится  $14 \text{ мг}$  азота, в другом сосуде объемом  $3,4 \text{ л}$  –  $16 \text{ мг}$  кислорода. Температура газов одинаковая. Сосуды соединяют, и газы перемешиваются без изменения температуры. Найти приращение энтропии при этом процессе.

73) Энтропия моля идеального газа при температуре  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  и давлении  $0,1 \text{ МПа}$  равна  $204,8 \text{ Дж/К}$ . В результате изотермического расширения объем, занимаемый газом, увеличился до  $0,05 \text{ м}^3$ . Определить энтропию газа в конечном состоянии.

74) Найти приращение энтропии при конденсации 800 г водяного пара, находящегося при температуре 100 °С, и последующем охлаждении воды до температуры 20 °С. Теплоемкость воды считать не зависящей от температуры окружающей среды. Конденсация происходит при давлении 760 мм рт. ст.

75) Найти приращение энтропии при превращении в воду 200 г льда, находившегося при температуре минус 10,7 °С. Теплоемкость льда считать не зависящей от температуры. Температуру плавления принять равной 273 К.

76) Гелий массой 8,0 г занимает объем 3,0 дм<sup>3</sup> под давлением 1,6 МПа. Газ охлаждается при том же объеме, давление его снижается до 1,2 МПа. Затем газ сжимают при этом давлении до объема 2,0 дм<sup>3</sup>. Вычислить приращение энтропии газа.

77) Смешали воду массой 5,0 кг при температуре 7 °С с водой массой 8,0 кг при температуре 77 °С. Найти температуру смеси и изменение энтропии, происходящее при смешивании.

78) Газ, совершающий цикл Карно, отдает холодильнику  $\frac{3}{5}$  количества теплоты, полученной от нагревателя. Температура нагревателя равна 700 °С. Найти температуру холодильника.

79) Газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя в три раза выше температуры холодильника. Газ за цикл передает холодильнику количество теплоты 38,1 кДж. Какую полезную работу совершает газ? Найти КПД машины.

80) Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя равна 220 °С, температура холодильника равна 17 °С. При изотермическом расширении газ совершает работу 120 Дж. Определить количество теплоты, которое газ отдает холодильнику при изотермическом сжатии.

## Библиографический список

1. Т р о ф и м о в а, Т. И. Курс физики / Т. И. Т р о ф и м о в а. – Москва, 2006. – 560 с. – Текст : непосредственный.
2. Оселедчик, Ю. С. Физика. Модульный курс для технических вузов : учебное пособие для бакалавров / Ю. С. Оселедчик, П. И. Самойленко, Т. Н. Точилина. – Москва, 2012. – 526 с. – Текст : непосредственный.
3. К р о х и н, С. Н. Краткий курс физики / С. Н. К р о х и н, Л. А. Л и т н е в с к и й. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2012. – Часть 1. – 37 с. – Текст : непосредственный.
4. Учебно-методическое пособие для подготовки студентов к решению задач по разделам «Механика» и «Молекулярная физика» / С. В. В о з н ю к, С. А. Г е л ь в е р [и др.]. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2022. – 43 с. – Текст : непосредственный.
5. Л и т н е в с к и й, Л. А. Кинематика и динамика частиц. Примеры решения задач / Л. А. Л и т н е в с к и й, Ю. М. С о с н о в с к и й. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2016. – 32 с. – Текст : непосредственный.
6. Г е л ь в е р, С. А. Кинематика и динамика вращательного движения абсолютно твердого тела. Примеры решения задач / С. А. Г е л ь в е р, С. Н. С м е р д и н. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2016. – 31. – Текст : непосредственный.
7. А р о н о в а, Т. А. Законы сохранения. СТО. Примеры решения задач / Т. А. А р о н о в а, И. А. Д р о з д о в а. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2016. – 34. – Текст : непосредственный.
8. В о з н ю к, С. В. Молекулярная физика и термодинамика. Примеры решения задач / С. В. Вознюк, С. А. Минабудинова, Н. А. Хмырова. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2018. – 32 с. – Текст : непосредственный.

## ТАБЛИЦА ВАРИАНТОВ И НОМЕРА ЗАДАЧ

## РАЗДЕЛЫ «МЕХАНИКА» И «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА»

Вариант	Номера задач								Вариант	Номера задач							
	1	2	3	4	5	6	7	8		1	2	3	4	5	6	7	8
01	1	11	21	31	41	51	61	71	26	6	18	30	32	44	56	68	80
02	2	12	22	32	42	52	62	72	27	7	19	21	33	45	57	69	71
03	3	13	23	33	43	53	63	73	28	8	20	22	34	46	58	70	72
04	4	14	24	34	44	54	64	74	29	9	11	23	35	47	59	61	73
05	5	15	25	35	45	55	65	75	30	10	12	24	36	48	60	62	74
06	6	16	26	36	46	56	66	76	31	1	14	27	40	43	56	69	72
07	7	17	27	37	47	57	67	77	32	2	15	28	31	44	57	70	73
08	8	18	28	38	48	58	68	78	33	3	16	29	32	45	58	61	74
09	9	19	29	39	49	59	69	79	34	4	17	30	33	46	59	62	75
10	10	20	30	40	50	60	70	80	35	5	18	21	34	47	60	63	76
11	1	12	23	34	45	56	67	78	36	6	19	22	35	48	51	64	77
12	2	13	24	35	46	57	68	79	37	7	20	23	36	49	52	65	78
13	3	14	25	36	47	58	69	80	38	8	11	24	37	50	53	66	79
14	4	15	26	37	48	59	70	71	39	9	12	25	38	41	54	67	80
15	5	16	27	38	49	60	61	72	40	10	13	26	39	42	55	68	71
16	6	17	28	39	50	51	62	73	41	1	15	29	33	47	51	65	79
17	7	18	29	40	41	52	63	74	42	2	16	30	34	48	52	66	80
18	8	19	30	31	42	53	64	75	43	3	17	21	35	49	53	67	71
19	9	20	21	32	43	54	65	76	44	4	18	22	36	50	54	68	72
20	10	11	22	33	44	55	66	77	45	5	19	23	37	41	55	69	73
21	1	13	25	37	49	51	63	75	46	6	20	24	38	42	56	70	74
22	2	14	26	38	50	52	64	76	47	7	11	25	39	43	57	61	75
23	3	15	27	39	41	53	65	77	48	8	12	26	40	44	58	62	76
24	4	16	28	40	42	54	66	78	49	9	13	27	31	45	59	63	77
25	5	17	29	31	43	55	67	79	50	10	14	28	32	46	60	64	78



## СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Таблица П.2.1

## Десятичные приставки

Наименование	Обозначение	Отношение	Наименование	Обозначение	Отношение
деци	д	$10^{-1}$	дека	да	$10^1$
санти	с	$10^{-2}$	гекто	г	$10^2$
милли	м	$10^{-3}$	кило	к	$10^3$
микро	мк	$10^{-6}$	мега	М	$10^6$
нано	н	$10^{-9}$	гига	Г	$10^9$
пико	п	$10^{-12}$	тера	Т	$10^{12}$

Таблица П.2.2

## Некоторые физические постоянные

Физическая постоянная	Значение
Гравитационная постоянная $G$ , Н·м <sup>2</sup> /кг <sup>2</sup>	$6,67 \cdot 10^{-11}$
Ускорение свободного падения $g$ , м/с <sup>2</sup>	9,8
Скорость света $c$ , м/с	$3,0 \cdot 10^8$
Масса покоя электрона $m_e$ , кг	$9,1 \cdot 10^{-31}$
Масса покоя протона $m_p$ , кг	$1,67 \cdot 10^{-27}$
Постоянная Больцмана $k_B$ , Дж/К	$1,38 \cdot 10^{-23}$
Универсальная газовая постоянная $R$ , Дж/(моль·К)	8,31
Число Авогадро $N_A$ , моль <sup>-1</sup>	$6,022 \cdot 10^{23}$

Т а б л и ц а П.2.3

Молярная масса и число степеней свободы  
(поступательных и вращательных) молекул некоторых газов

Газ	Молярная масса $M$ , г/моль	Число степеней свободы $i$
Водород ( $H_2$ )	2	5
Гелий (He)	4	3
Водяной пар ( $H_2O$ )	18	6
Неон (Ne)	20	3
Азот ( $N_2$ )	28	5
Кислород ( $O_2$ )	32	5
Аргон (Ar)	40	3
Углекислый газ ( $CO_2$ )	44	6

Т а б л и ц а П.2.4

Плотность и тепловые свойства веществ

Вещество	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Удельная теплоем- кость, кДж/(кг·К)	Удельная теплота плавления, МДж/кг	Удельная теплота парообразо- вания, МДж/кг
Вода	1,00	4,19	—	2,25
Лед	0,90	2,10	0,33	—

П р и м е ч а н и я.

1 (физическая) атмосфера (1 атм.) =  $10^5$  Па.

1 миллиметр ртутного столба (1 мм рт. ст.) = 133 Па.

1 атомная единица массы (1 а. е. м.) =  $1,66 \cdot 10^{-27}$  кг.

1 литр (1 л) =  $10^{-3}$  м<sup>3</sup>.

1 килокалория (ккал) = 4190 Дж.

Температура по шкале Кельвина:  $T, K = t, ^\circ C + 273 K$ .

Коэффициент трения скольжения металла по металлу  $\mu_{\text{ММ}} = 0,15 \div 0,20$ ;  
дерева по дереву –  $\mu_{\text{ДД}} = 0,20 \div 0,50$ .

Нормальные условия: давление  $p_0 = 760$  мм рт. ст. =  $10^5$  Па, температура  $t_0 = 0$  °С.

*Учебное издание*

ВОЗНЮК Сергей Викторович, ГЕЛЬВЕР Сергей Александрович,  
ЛИТНЕВСКИЙ Леонид Аркадьевич, СОСНОВСКИЙ Юрий Михайлович,  
ТОДЕР Георгий Борисович, ХМЫРОВА Наталья Анатольевна

ПРАКТИКУМ  
ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ  
К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПО РАЗДЕЛАМ  
«МЕХАНИКА» И «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА»

---

Редактор Н. А. Майорова

\*\*\*

Подписано в печать 14.02.2023. Формат 60 × 84<sup>1/16</sup>.  
Офсетная печать. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 2,3.  
Тираж 30 экз. Заказ .

\*\*

Редакционно-издательский отдел ОмГУПСа  
Типография ОмГУПСа

\*

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35