Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Кузбасский государственный технический университет»

Кафедра физики

ФИЗИКА

Методические указания по выполнению контрольной работы № 1
для студентов заочной формы обучения
по курсу общей физики для всех специальностей

Составители Т. А. Балашова
Н. Н. Демидова
Т. В. Лавряшина

Утверждено на заседании кафедры
Протокол № 4 от 07.11.2008

Рекомендованы к печати
учебно-методической комиссией
специальности 130404
Протокол № 24 от 21.11.2008

Электронная копия находится
в библиотеке главного корпуса
ГУ КузГТУ

Кемерово 2008

Перед выполнением контрольных работ необходимо ознакомиться с общими методическими указаниями [1, с. 4–6]. Не приступайте к решению задач, не проработав теоретический материал на соответствующую тему. Обратите внимание на различие в обозначениях векторных и скалярных величин, например, для вектора силы – **F** или $\vec{F}$, для модуля силы – F.

Контрольная работа № 1

В контрольную работу № 1 включены задачи по физическим основам механики, молекулярной физики и термодинамики.

Задачи 1–10 на законы кинематики прямолинейного и криволинейного движения.

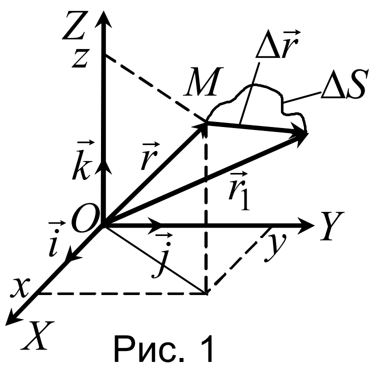

Рис. 1

Найти закон движения – значит определить вид зависимости, например, координаты x при прямолинейном движении от времени t, то есть $x = x(t)$ (задачи 2–4). Возможны и обратные задачи: по заданному уравнению движения определяются величины, характеризующие движение – скорость υ (задачи 5, 7). При этом необходимо помнить, что в общем случае положение материальной точки M в пространстве в момент времени t задается радиус-вектором $\vec{r}$ или при использовании декартовой системы координат тремя координатами x, y, z (см. рис. 1): $\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$, где $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$ – единичные векторы. Изменение положения материальной точки за время $\mathrm{d}t$ характеризуется вектором перемещения $\mathrm{d}\vec{r}$, а за промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$ – вектором $\Delta\vec{r}$. Модуль вектора перемещения Δr совпадает с пройденным путем только в случае прямолинейного движения без изменения направления вектора скорости $\vec{\upsilon}$. Вектор скорости $\vec{\upsilon}$ определяется производной радиус-вектора $\vec{r}$ по времени t:

$$\vec{\upsilon} = \frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}t},$$

причем вектор $\vec{\upsilon}$ направлен по касательной к траектории движения в данной точке. Проекция вектора скорости $\vec{\upsilon}$ на ось OX определяется производной координаты x по времени t:

$$\upsilon_x = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}.$$

Вектор ускорения $\vec{a}$ при движении материальной точки определяется производной вектора скорости $\vec{\upsilon}$ по времени t:

$$\vec{a} = \frac{\mathrm{d}\vec{\upsilon}}{\mathrm{d}t},$$

а его проекция на ось OX – это производная проекции скорости $\vec{\upsilon}_x$ по времени t или вторая производная координаты x по времени t (задача 1):

$$a_x = \frac{\mathrm{d}\upsilon_x}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2}.$$

Решая задачу 5 по определению скорости υ, учтите, если $a = \frac{\mathrm{d}\upsilon}{\mathrm{d}t}$, то $\mathrm{d}\upsilon = a\mathrm{d}t$. Следовательно, скорость υ определится интегрированием выражения

$$\upsilon = \int a\mathrm{d}t.$$

При расчете скорости константу интегрирования, которая зависит от начальных условий, возьмите равной начальной скорости υ_0.

При криволинейном движении, в частности, при движении по окружности, вектор ускорения $\vec{a}$ удобнее проектировать на направление касательной к траектории и нормали к касательной (рис. 2). Тангенциальное ускорение a_τ характеризует быстроту изменения скорости по величине:

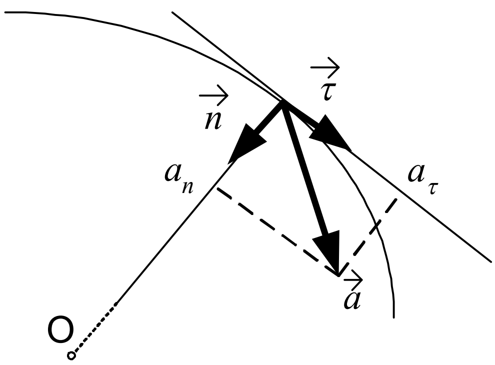

Рис. 2

$$a_\tau = \frac{\mathrm{d}\upsilon}{\mathrm{d}t},$$

нормальное ускорение a_n – быстроту изменения скорости по направлению ($\vec{\tau}$ и $\vec{n}$ – единичные векторы выбранных направлений).

В задачах 7–9 закон движения задан зависимостью пройденного пути s от времени t. Для расчета нормального ускорения по формуле

$$a_n = \frac{\upsilon^2}{R}$$

необходимо предварительно определить скорость движения, которая численно равна первой производной пути s по времени t:

$$\upsilon = \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}.$$

Для расчета тангенциального ускорения a_τ – взять вторую производную пути s по времени t:

$$a_\tau = \frac{\mathrm{d}\upsilon}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2 s}{\mathrm{d}t^2}.$$

Вектор полного ускорения $\vec{a}$ определяется векторной суммой

$$\vec{a} = a_\tau \vec{\tau} + a_n \vec{n},$$

а его модуль

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}.$$

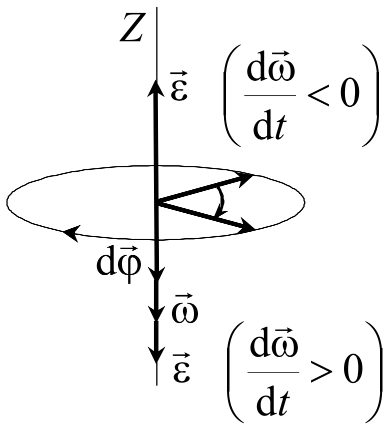

Рис. 3

Закон движения при вращении материальной точки по окружности может быть задан зависимостью угла φ поворота радиус-вектора $\vec{r}$ от времени t (задача 6). Поворот радиус-вектора $\vec{r}$ за время $\mathrm{d}t$ характеризуется вектором $\mathrm{d}\vec{\varphi}$, направление которого связано с направлением вращения правилом правого винта (правилом «буравчика») (рис. 3). Вектор угловой скорости $\vec{\omega}$ определяется производной угла поворота по времени:

$$\vec{\omega} = \frac{\mathrm{d}\vec{\varphi}}{\mathrm{d}t},$$

поэтому направлен так же, как и вектор $\mathrm{d}\vec{\varphi}$. Вектор углового ускорения $\vec{\varepsilon}$ при ускоренном вращении совпадает с направлением вектора угловой скорости $\vec{\omega}$ и направлен противоположно ему при замедленном вращении. Угловое ускорение $\vec{\varepsilon}$ равно производной угловой скорости $\vec{\omega}$ по времени:

$$\vec{\varepsilon} = \frac{\mathrm{d}\vec{\omega}}{\mathrm{d}t}.$$

Причиной, вызывающей быстроту изменения положения тела в пространстве со временем, является сила $\vec{F}$ при прямолинейном движении или момент силы $\vec{M}_z$ при вращении твердого тела. Сила $\vec{F}$ и ускорение $\vec{a}$ связаны вторым законом Ньютона: $\vec{F} = m\vec{a}$ (задачи 1–5). Момент силы $\vec{M}_z$ и угловое ускорение $\vec{\varepsilon}$ связаны уравнением динамики вращательного движения:

$$\vec{M}_z = J_z\vec{\varepsilon} = J_z\frac{\mathrm{d}\vec{\omega}}{\mathrm{d}t},$$

где J_z — момент инерции твердого тела относительно оси вращения.

Примечания:

1. Перед решением задач этой темы обратите внимание на примеры 1, 6, 9 [1].

2. В задачах 1–5, 7, 9 координата x и пройденный путь s измеряются в метрах (м), время t – в секундах (с), в том числе x_0 = 1 м (задача 4).

3. В задачах 6, 10 угол поворота φ измеряется в радианах (рад). Угол поворота φ и число оборотов N связаны соотношением $\varphi = 2\pi N$. С другой стороны, при равноускоренном вращении этот же угол φ может быть выражен через начальную угловую скорость ω_0 и угловое ускорение ε:

$$\varphi = \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}.$$

Задачи 11–20 на тему «Следствия из преобразований Лоренца»:

1. Релятивистское сокращение продольных размеров тела в направлении его движения (задачи 11, 12, 19, 20) происходит согласно формуле

$$\ell = \ell_0\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}},$$

где ℓ_0 – собственная длина тела в инерциальной системе, относительно которой тело покоится; ℓ – длина тела, движущегося относительно неподвижной системы со скоростью υ; c – скорость света в вакууме.

В условии задач 19, 20 дается относительное изменение продольных размеров, выраженное в процентах. За относительное изменение продольных размеров принимается величина, равная отношению линейного сокращения $\Delta\ell = \ell_0 - \ell$ к длине ℓ_0 покоящегося тела, то есть

$$\varepsilon = \frac{\ell_0 - \ell}{\ell_0}.$$

2. Релятивистское замедление времени (задачи 13–15) определяется по формуле

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}}, \qquad (1)$$

где τ_0 – собственное время жизни частицы, отсчитанное по часам, движущимся вместе с ней со скоростью υ; τ – время, измеренное по неподвижным часам. Согласно формуле (1) движущиеся часы идут медленнее, чем покоящиеся часы.

В задаче 13, зная скорость движения частицы, нужно определить расстояние, которое пролетит π-мезон до распада:

$$\ell = \upsilon\tau.$$

В задаче 14 по известному расстоянию, пройденному частицей до распада, необходимо определить время τ, а затем по формуле (1) – собственное время жизни частицы.

3. Теорему о сложении скоростей в релятивистской механике (задачи 16–18), можно представить формулой

$$u' = \frac{u \mp \upsilon}{1 \mp \frac{u\upsilon}{c^2}},$$

где u и u' – скорости тела относительно двух инерциальных систем отсчета, движущихся со скоростью υ относительно друг друга. При этом знак «–» берется, если скорости $\vec{u}$ и $\vec{\upsilon}$ совпадают по направлению, а «+» – если скорости направлены навстречу друг другу.

В задачах 13–18 скорость υ движения частицы задана в долях скорости света в вакууме

$$\upsilon = \beta c, \qquad \text{где} \qquad \beta = \frac{\upsilon}{c}.$$

Тогда, например, для задачи 13

$$\upsilon = 0{,}9c = 0{,}9 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} = 2{,}7 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Задачи 21–30 относятся к разделу «Динамика поступательного и вращательного движения».

При решении этих задач используются законы сохранения импульса и механической энергии.

1. Закон сохранения импульса: суммарный импульс замкнутой системы взаимодействующих тел с течением времени не изменяется

$$\sum_{i=1}^{n} m_i \vec{\upsilon}_i = \text{const}. \qquad (2)$$

Этот закон является следствием однородности пространства.

Если сумма проекций сил на выбранное направление равна нулю, то систему можно считать замкнутой в этом направлении и применять при решении задачи закон сохранения импульса, перейдя к скалярной форме записи.

2. Закон сохранения механической энергии: полная механическая энергия тела в поле консервативных сил с течением времени не изменяется

$$E = T + П = \text{const}, \qquad (3)$$

где E – полная механическая энергия, T — кинетическая энергия, $П$ – потенциальная энергия. Этот закон является следствием однородности времени.

Используйте (3) при решении задач 22, 25 и 30.

Для системы взаимодействующих тел, в которых присутствуют неконсервативные силы, например, сила трения (задачи 21, 23, 24, 26, 28), или часть механической энергии переходит во внутреннюю энергию неупруго взаимодействующих тел (задачи 26, 30), полная механическая энергия не сохраняется и

$$\Delta E = A_{\text{тр}} \qquad \text{или} \qquad \Delta E = A_{\text{деф}}.$$

При этом потенциальная энергия не изменяется, если ее отсчет производится относительно одного и того же уровня.

3. Перед решением задач 21–23, 25 разберите пример 1.

Пример 1. Шар массой 3 кг катится без проскальзывания по горизонтальной поверхности со скоростью 2 м/с. Определить кинетическую энергию этого шара.

Решение

$m = 3$ кг	
$v = 2$ м/с	
$T - ?$	

Катящийся шар участвует в двух движениях, и скорость $\vec{\upsilon}$ любой его точки определяется выражением

$$\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_c + \vec{u},$$

где $\vec{\upsilon}_c$ – скорость центра масс, то есть скорость поступательного движения; $\vec{u}$ – линейная скорость, обусловленная вращением вокруг центра масс, ее модуль

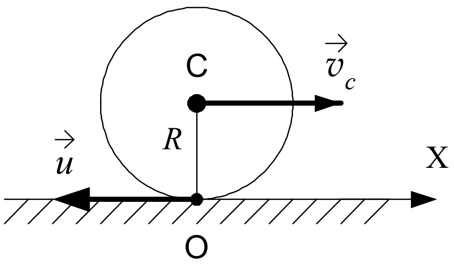

Рис. 4

$$u = \omega R.$$

В проекции на ось X

$$\upsilon = \upsilon_c + \omega R. \qquad (4)$$

Если скольжения нет, то $\upsilon = 0$, и точка O является мгновенной осью вращения шара.

Кинетическая энергия тела, вращающегося относительно мгновенной оси, проходящей через точку O,

$$T_{\text{вр}} = \frac{J_z \omega^2}{2}. \qquad (5)$$

Момент инерции J_z шара относительно мгновенной оси определяется по теореме Штейнера

$$J_z = J_{zc} + md^2,$$

где $J_{zc} = \frac{2}{5} mR^2$ – момент инерции шара относительно оси, проходящей через его центр масс; $d = R$ – расстояние между осями. Тогда

$$J_z = \frac{2}{5} mR^2 + mR^2 = 1{,}4 mR^2. \qquad (6)$$

Решая совместно уравнения (4), (5) и (6), получим

$$T_{\text{вр}} = \frac{1{,}4mR^2\upsilon_c^2}{2R^2} = 0{,}7m\upsilon_c^2.$$

По условию задачи $\upsilon_c = \upsilon = 2$ м/с, следовательно, кинетическая энергия катящегося шара

$$T = 0{,}7 \cdot 3\,\text{кг} \cdot 2^2 (\text{м/с})^2 = 8{,}4\,\text{Дж}.$$

Примечания:

1. Условие задачи 21 необходимо трактовать следующим образом.

Сплошной цилиндр массой 0,1 кг катится без проскальзывания с начальной скоростью 4 м/с. Определить кинетическую энергию цилиндра и время до его остановки, если на него действует сила трения 0,1 Н.

2. Перед решением задачи 24 разобрать пример 9 [1, с. 42].

3. При решении задачи 30 разберите пример 5 [1, с. 38]. Кроме того, решая эту задачу, учтите, что закон сохранения механической энергии используется в ней дважды. Шарик, падающий с высоты h_1, обладает потенциальной энергией $П_1 = mgh_1$ относительно нулевого уровня (плиты). Эта энергия переходит в кинетическую $T_1 = \frac{m\upsilon_1^2}{2}$. После взаимодействия с плитой часть кинетической энергии переходит во внутреннюю энергию (выделяется в виде тепла Q при ударе). Затем кинетическая энергия $T_2 = \frac{m\upsilon_2^2}{2}$ переходит в потенциальную $П_2 = mgh_2$. При описании взаимодействия плиты и шарика используйте второй закон Ньютона в виде

$$\vec{F}\Delta t = \Delta(m\vec{\upsilon}), \tag{7}$$

где $\vec{F}\Delta t$ – импульс силы, переданный плите; $\Delta(m\vec{\upsilon})$ – изменение импульса шарика.

4. При решении задачи 29 используйте уравнение (7), не забывая при этом, что $\Delta(m\vec{\upsilon}) = \vec{p}_2 - \vec{p}_1$ – это разность двух векто-

ров. Для нахождения $\Delta(m\vec{\upsilon})$ сделайте рисунок, на котором укажите импульсы $\vec{p}_1$ и $\vec{p}_2$ молекулы до и после удара. Тогда модуль изменения импульса $\Delta(m\vec{\upsilon})$ легко определить по теореме косинусов.

5. Решая задачи 21, 25, 28, дополнительно используйте кинематические уравнения

$$\upsilon_t = \upsilon_0 + at; \qquad \upsilon_t^2 - \upsilon_0^2 = 2as,$$

где υ_t и υ_0 – конечная и начальная скорости, соответственно; a – ускорение, которое положительно при ускоренном движении (задача 25) и отрицательно при замедленном движении (задача 28); s – пройденный путь.

Задачи 31–40 на тему «Релятивистская механика». При решении задач данной темы необходимо знать следующее:

1. Масса частицы зависит от скорости ее движения согласно формуле

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}}, \tag{8}$$

где m_0 – масса покоящейся частицы; m – масса частицы, движущейся со скоростью υ.

2. Кинетическая энергия релятивистской частицы (ее скорость сравнима со скоростью света) определяется не по привычной формуле $\frac{m\upsilon^2}{2}$, а как разность между полной энергией mc^2 и энергией m_0c^2 покоя частицы:

$$T = mc^2 - m_0c^2 = (m - m_0)c^2.$$

Или, учитывая зависимость массы от скорости (8), получим, что

$$T = m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} - 1\right).$$

Масса и энергия покоя частицы определяются по табл. 16 [1, с. 139].

3. Импульс релятивистской частицы рассчитывают по формуле

$$p = \frac{m_0 \upsilon}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}}.$$

Если известна кинетическая энергия частицы (задача 31), то импульс определяют по формуле

$$p = \frac{1}{c}\sqrt{T(T + 2E_0)},$$

где E_0 = 0,51 МэВ – энергия покоя электрона. В этом случае импульс рассчитывают в МэВ/c, где c – скорость света в вакууме.

Задачи 41–60 на тему «Основы молекулярно-кинетической теории газа».

В задачах 41–44 требуется знание числа i степеней свободы молекулы газа. При этом следует учесть, что числом степеней свободы называют число независимых координат, полностью определяющих положение системы в пространстве.

Для жесткой пространственно-ориентированной системы возможны три степени свободы поступательного движения (вдоль осей координат) и три степени свободы вращательного движения. Поэтому для молекулы идеального газа, которую рассматривают как материальную точку, возможны лишь три степени свободы поступательного движения (энергию вращательного движения можно не учитывать), то есть $i = 3$.

Молекулу двухатомного газа рассматривают как систему из двух жестко связанных материальных точек. Такая молекула, кроме трех степеней свободы поступательного движения, имеет еще две степени свободы вращательного движения. Вращение вокруг третьей оси, проходящей через оба атома, не учитывается, то есть молекула двухатомного газа имеет пять степеней свободы: $i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вр}} = 5$.

Трехатомные и многоатомные нелинейные молекулы с жесткими связями между атомами имеют шесть степеней свободы:

три поступательных и три вращательных. Перед решением этих задач полезно разобрать пример 11 [1, с. 45].

Примечания:

1. В задаче 42 концентрацию молекул газа примите равной $8 \cdot 10^{11}$ см$^{-3}$.
2. В задаче 49 принять объем сосуда равным 1 л.
3. В задачах 52, 53 учтите, что эффективный диаметр молекулы углекислого газа примерно равен $4 \cdot 10^{-10}$ м.

При решении задач 45–50 воспользуйтесь уравнением Клапейрона – Менделеева, связывающим между собой основные параметры состояния газа: давление p, объем V, температуру T. Решая задачи 47, 48, 50 для определения давления смеси газов используйте *закон Дальтона*: давление смеси газов равно сумме парциальных давлений $p_1, p_2, ..., p_n$ входящих в нее газов:

$$p = p_1 + p_2 + ... + p_n.$$

Под парциальным давлением подразумевают давление, которое производил бы газ, входящий в состав газовой смеси, если бы он один занимал объем, равный объему смеси при той же температуре. Разберите пример 10 [1, с. 43–45].

Решая задачи 51–56, для определения эффективного диаметра d молекулы воспользуйтесь табл. 6 «Приложения» [1, с. 138]. Перед решением этих задач разберите пример 12 [1, с. 46].

Задачи 54, 55, 57–60 посвящены изучению явлений переноса: внутреннего трения, диффузии, теплопроводности. Перед решением этих задач рассмотрите пример 13 [1, с. 47]. Обратите внимание, что для расчета коэффициента теплопроводности æ необходимо знать величину удельной теплоемкости c_V газа при постоянном объеме:

$$c_V = \frac{i}{2}\frac{R}{M}.$$

Единица измерения коэффициента æ – Вт/(м·К).

Задачи 61–70 на применение первого начала термодинамики для изопроцессов в газах.

Согласно первому началу термодинамики количество теплоты δQ, сообщаемое системе, расходуется на увеличение внутренней энергии dU системы и на совершение системой работы δA против внешних сил:

$$\delta Q = \mathrm{d}U + \delta A.$$

Для равновесного процесса перехода термодинамической системы из начального состояния 1 в конечное состояние 2

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

Решение данных задач требует особого внимания при использовании первого начала термодинамики для рассматриваемого газового процесса.

1) При изотермическом процессе (протекает при постоянной температуре T = const)

$$Q = A.$$

Так как внутренняя энергия U является функцией состояния системы, а ее изменение определяется при любых термодинамических процессах соотношением

$$\Delta U = \frac{i}{2}\frac{m}{M}R\Delta T,$$

то при изотермическом переходе $\Delta U = 0$, т. е. U не изменяется (задачи 62, 63, 67, 70).

2) При изохорном процессе (протекает при постоянном объеме V = const)

$$Q = \Delta U,$$

так как работа при изохорном переходе не совершается

$$A = \int_1^2 p\mathrm{d}V = 0$$

(задачи 61, 68).

3) При изобарном процессе (протекает при постоянном давлении p = const)

$$Q = \Delta U + A$$

(задачи 61, 63, 66–69).

4) При адиабатном процессе (протекает без теплообмена с окружающей сре-

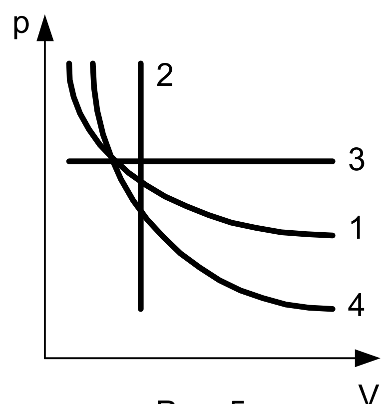

Рис. 5

дой $\delta Q = 0$)

$$A = -\Delta U \quad \text{или} \quad \Delta U = -A = A',$$

где A' – работа, совершаемая внешними силами над системой (задачи 64, 65).

Перед решением данных задач необходимо использовать графическое представление обсуждаемых процессов в координатах p–V (рис. 5), где 1 – изотермический процесс, 2 – изохорный, 3 – изобарный, 4 – адиабатный процесс.

Примечания:

1. Молярная масса M аргона Ar (задачи 61, 68) равна $40 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, а число степеней свободы $i = 3$.

2. Число степеней свободы i для молекул воздуха принять равным 5, полагая, что в его состав в основном входят двухатомные молекулы N_2, O_2, H_2, CO (задача 63).

3. Изобарный переход системы из одного состояния в другое рассмотрен в примере 14 [1, с. 48–49].

4. Перед решением задач 64 и 65 разберите пример 15 [1, с. 51], но дополнительно учтите, что при адиабатическом сжатии $A < 0$ и $\Delta U > 0$.

5. Критерий выгодности (задачи 67, 68) необходимо оценивать отношением механических работ при указанных процессах.

6. При решении задачи 68 в общем виде разность температур ΔT – лишнее данное в ее условии.

Задачи 71–80 на тему «Энтропия. Цикл Карно».

В задачах 73–76 рассматривается цикл Карно, состоящий из двух изотермических и двух адиабатных процессов. На рис. 6 представлены циклы Карно в прямом (рис. 6, а) и обратном (рис. 6, б) направлениях. Для прямого цикла Карно Q_1 – количество теплоты, полученное рабочим телом при изотермическом расширении при температуре T_1, Q_2 – количество теплоты, отданное рабочим телом холодильнику при изотермическом сжатии при температуре T_2. При этом рабочим телом совершается работа A, равная

$$A = Q_1 - Q_2,$$

а коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad \text{или} \quad \eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

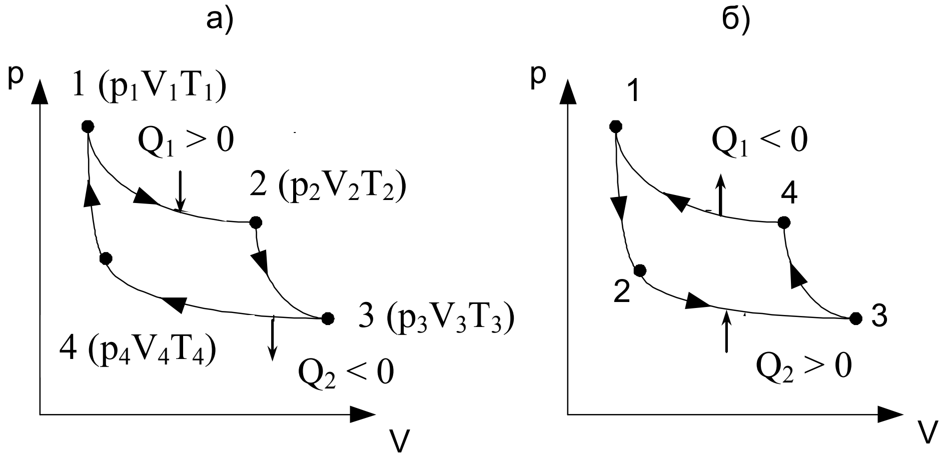

Рис. 6

В обратном цикле Карно количество теплоты Q_1 отводится от рабочего тела в процессе изотермического сжатия при температуре T_1, а количество теплоты Q_2 подводится к рабочему телу при температуре T_2, причем $T_2 < T_1$. Следовательно, $Q_1 < 0$, $Q_2 > 0$ и работа, совершаемая рабочим телом за один цикл будет отрицательной $A = Q_1 + Q_2 < 0$ (положительная работа расширения газа при температуре T_2 меньше модуля отрицательной работы сжатия газа при температуре T_1). Если рабочее тело совершает обратный цикл, то происходит передача тепла от холодного тела к горячему за счет работы, совершенной внешними силами. По этому принципу работают холодильные машины.

Величина, равная отношению теплоты Q_2, отведенной в обратном цикле от охлаждаемого тела, к работе внешних сил, затраченной в этом цикле, называется холодильным коэффициентом:

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$

<u>Пример 2.</u> Тепловая машина работает по циклу Карно, КПД которого 0,3. Каким станет КПД этой машины, если она будет совершать тот же цикл в обратном направлении?

$\eta = 0{,}3$	
ε – ?	

Решение

Холодильный коэффициент ε определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2} \text{ или } \frac{1}{\varepsilon} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_2} = \frac{T_1 - T_2}{T_2} = \frac{T_1}{T_2} - 1,$$

коэффициент полезного действия $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$. Тогда

$$\frac{T_2}{T_1} = 1 - \eta, \qquad \frac{1}{\varepsilon} = \frac{1}{1-\eta} - 1, \qquad 1 - \eta = \varepsilon - \varepsilon(1-\eta).$$

Отсюда холодильный коэффициент

$$\varepsilon = \frac{1-\eta}{\eta} = \frac{1 - 0{,}3}{0{,}3} = 2{,}3 = 230\,\%.$$

Ответ: $\varepsilon = 230$ %.

В задачах 71, 72, 77–80 необходимо рассчитать изменение энтропии ΔS. Энтропия S – функция состояния, элементарное изменение которой $\mathrm{d}S$ определяется отношением элементарного количества теплоты δQ, сообщаемого системе в обратимом равновесном процессе, к температуре T, при которой передается это количество теплоты:

$$\mathrm{d}S = \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{\text{обр}}.$$

Изменение энтропии ΔS при переходе системы из состояния 1 в состояние 2 определяется по формуле

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

В задачах 71, 72 количество теплоты δQ определите, используя первое начало термодинамики:

$$\delta Q = \mathrm{d}U + \delta A$$

для любого процесса в идеальном газе.

Если температура вещества в твердом или жидком состоянии изменяется на $\mathrm{d}T$, то количество теплоты δQ, подводимое при нагревании ($dT > 0$) или отводимое при охлаждении ($dT < 0$), определите по формуле

$$\delta Q = mc\,dT,$$

где m – масса вещества, c – удельная теплоемкость (задачи 77, 79, 80).

При плавлении или парообразовании вещества (задачи 77, 78, 80) массой dm количество теплоты δQ определяется выражениями

$$\delta Q = \lambda dm \qquad \text{и} \qquad \delta Q = r dm,$$

где λ – удельная теплота плавления (характеризует количество теплоты, необходимое для плавления единицы массы вещества при температуре плавления), r – удельная теплота парообразования (характеризует количество теплоты, которое необходимо для превращения единицы массы вещества в пар при температуре кипения). При изменении агрегатного состояния вещества изменение энтропии ΔS равно сумме изменений энтропии в различных процессах, то есть

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \ldots = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + \int_2^3 \frac{\delta Q}{T} + \ldots . \qquad (9)$$

<u>Пример 3.</u> Найти изменение ΔS энтропии при превращении массы m = 20 г льда, взятого при температуре t = –20 °С, в пар ($t_{пар}$ = 100 °С).

m = 20 г = $2 \cdot 10^{-2}$ кг
T = 253 К
$T_{пл}$ = 273 К
$T_{пар}$ = 373 К
$c_л = 2{,}1 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К)
$\lambda = 3{,}35 \cdot 10^5$ Дж/кг
$c_в = 4{,}2 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К)
$r = 2{,}26 \cdot 10^6$ Дж/кг

ΔS – ?

Решение

Изменение энтропии в равновесном процессе при переходе открытой системы из одного состояния в другое определяется формулой

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T},$$

где S_1 и S_2 – энтропия системы в первом и втором состояниях. В данной задаче изменение энтропии складывается из ее изменений в отдельных процессах:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3 + \Delta S_4.$$

Изменение энтропии ΔS_1 при нагревании массы m льда от температуры T до температуры $T_{пл}$ плавления:

$$\Delta S_1 = \int_{T}^{T_{пл}} \frac{mc_л \mathrm{d}T}{T} = mc_л \ln\frac{T_{пл}}{T},$$

где $c_л$ – удельная теплоемкость льда.

Изменение энтропии ΔS_2 в процессе плавления льда массой m при температуре $T_{пл}$ плавления

$$\Delta S_2 = \int \frac{\delta Q}{T} = \frac{1}{T_{пл}} \int_0^m \lambda \mathrm{d}m = \frac{m\lambda}{T_{пл}},$$

где λ – удельная теплота плавления льда.

Изменение энтропии ΔS_3 при нагревании воды до температуры $T_{пар}$ парообразования:

$$\Delta S_3 = \int \frac{\delta Q}{T} = \int_{T_{пл}}^{T_{пар}} \frac{mc_в \mathrm{d}T}{T} = mc_в \ln\frac{T_{пар}}{T_{пл}},$$

где $c_в$ – удельная теплоемкость воды.

Изменение энтропии ΔS_4 при парообразовании массы m воды при температуре $T_{пар}$ кипения:

$$\Delta S_4 = \int \frac{\delta Q}{T} = \frac{1}{T_{пар}} \int_0^m r \mathrm{d}m = \frac{mr}{T_{пар}},$$

где r – удельная теплота парообразования.

Общее изменение энтропии:

$$\Delta S = mc_л \ln\frac{T_{пл}}{T} + \frac{m\lambda}{T_{пл}} + mc_в \ln\frac{T_{пар}}{T_{пл}} + \frac{mr}{T_{пар}}.$$

Рассчитаем изменение энтропии ΔS:

$$\Delta S = 2\cdot 10^{-2}\cdot 2{,}1\cdot 10^{3} \ln\frac{273}{253} + \frac{2\cdot 10^{-2}\cdot 3{,}35\cdot 10^{5}}{273} +$$

$$+ 2\cdot 10^{-2}\cdot 4{,}2\cdot 10^{3} \ln\frac{373}{273} + \frac{2\cdot 10^{-3}\cdot 2{,}26\cdot 10^{6}}{373} = 66\left(\frac{\text{Дж}}{\text{К}}\right).$$

Ответ: 66 Дж/К.

Примечания:

1. Значения удельной теплоты плавления λ, удельной теплоты парообразования r, удельной теплоемкости c приведены в табл. 7–9 [1, с. 138–139].

2. Необходимые при решении задач 78 и 80 температуры плавления льда и свинца равны 0°C и 327°C, соответственно.

3. При смешивании воды с разными температурами (задача 79) изменение энтропии ΔS по формуле (9) определяется с учетом знака ее изменения: если $\delta Q > 0$, то $\mathrm{d}S > 0$ и наоборот.

Список рекомендуемой литературы

1. Физика: программа, методические указания и контрольные задания для студентов-заочников технологических специальностей вузов / под ред. В. Л. Прокофьева. – М.: Высш. шк., 1998. – 143 с.

2. Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для инж.-техн. специальностей вузов. – 14-е изд., стереотип. – М. : Академия, 2007. – 560 с.

3. Детлаф, А. А. Курс физики : учеб. пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – М. : Академия, 2007. – 720 с.

Составители
Татьяна Александровна Балашова
Нина Николаевна Демидова
Таисия Васильевна Лавряшина

ФИЗИКА

Методические указания по выполнению контрольной работы № 1
для студентов заочной формы обучения
по курсу общей физики для всех специальностей

Рецензент Н. Б. Окушко

Подписано в печать 18.12.2008. Формат 60x84/16.
Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе. Уч.-изд. л. 1,0.
Тираж 446 экз. Заказ .
ГУ КузГТУ, 650026, Кемерово, ул. Весенняя, 28.
Типография ГУ КузГТУ, 650099, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4А.