Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Международный государственный экологический
университет имени А.Д.Сахарова»

Факультет мониторинга окружающей среды
Кафедра физики и высшей математики

В. Ф. Малишевский, А. А. Луцевич

ВСПОМНИМ ШКОЛЬНУЮ ФИЗИКУ. МЕХАНИКА
(В ПОМОЩЬ ПЕРВОКУРСНИКУ)

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Минск
2014

УДК 537 (075.8)
ББК 22.33
М 19

Рекомендовано к изданию НМС МГЭУ имени А. Д. Сахарова

Авторы:
В. Ф. Малишевский, зав. кафедрой физики и высшей математики
МГЭУ имени А.Д. Сахарова, к.ф.-м.н., доцент
А.А. Луцевич, доцент кафедры физики и высшей математики
МГЭУ имени А.Д. Сахарова, к. пед. н.

Рецензенты:
профессор кафедры физики БГАТУ, д. ф.-м. н. *Добрянский В. М.;*
зав. кафедрой экологических информационных систем
МГЭУ имени А.Д. Сахарова, к.ф.-м.н., доцент *Иванюкович В. А.*

М19 Малишевский, В. Ф.
Вспомним школьную физику. Механика (в помощь первокурснику) : учебно-метод. пособие / В. Ф. Малишевский, А. А. Луцевич. – Минск : МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2014. – 102 с.
ISBN 978-985-551-087-2

Пособие адресовано первокурсникам, в нем изложены основные положения механики, которая изучается в средней школе в соответствии с программой по физике. Без знания основ механики изучение курса общей физики в высшей школе является весьма проблематичным, поскольку механике принадлежит особая роль, которую можно сравнить с ролью самой физики по отношению к другим естественным дисциплинам.

Решения задач изложены с элементами анализа и необходимыми пояснениями. Для самостоятельной работы составлены количественные и качественные задачи, в некоторых из которых присутствуют практическая или экологическая составляющие.

ISBN 978-985-551-087-2

ПРЕДИСЛОВИЕ

Основными факторами, обеспечивающими успешное изучение курса физики в высших учебных заведениях, являются системность и глубина знаний студентов по школьному курсу данной дисциплины и умение применять эти знания в конкретных ситуациях.

Целью данного пособия является оказание студентам первого курса помощи в систематизации, обобщении и углублении знаний по курсу механики средней общеобразовательной школы.

Изучение общей физики в высшей школе без знания основ механики является весьма проблематичным, так как изучение физики в высших учебных заведениях начинается с механики. Студенты, как правило, хорошо решают задачи с простым применением формул, а применение законов механики к конкретным задачам, в которых требуется понимание и анализ происходящих процессов, у многих первокурсников, как показывает практика, вызывает заметные трудности.

По этой причине в пособии особое внимание обращено на понимание векторного характера кинематических и динамических законов механического движения; знание кинематико-динамического метода решения основной задачи механики; умение применять закон сохранения механической энергии, закон сохранения импульса и теорему об изменении кинетической энергии при энергетическом описании механического движения.

Следует отметить, что механике принадлежит особая роль в физике, которую можно сопоставить с ролью самой физики по отношению к другим естественным дисциплинам. Для объяснений явлений из других разделов физики, т. е. «вне механики», мы часто вынуждены прибегать к механическим образам и моделям. Понятия, законы и теоретические положения механики в той или иной степени применяются практически во всех разделах физики (молекулярная физика, электродинамика, квантовая физика и др.).

Умение решать физические задачи и отвечать на вопросы, связанные с пониманием физических явлений, является не только основным критерием качества усвоения основных компонентов системы физических знаний, но и способности использовать эти знания в практической деятельности.

В каждом из четырех разделов пособия, наряду с краткими теоретическими сведениями, приведены примеры решения задач, а также задания (вопросы, качественные и расчетные задачи) для самостоятельной работы. Некоторые задания имеют практическое и экологическое содержание.

ВВЕДЕНИЕ

Физика (от греч. *physis* – природа) – это наука о природе, изучающая формы материи (их иногда называют «первичными», или «основными»), которые входят в состав любых сложных материальных систем, взаимодействие этих форм и их движения, исследующая простейшие материальные структуры: элементарные частицы, атомы, молекулы, тела, поля, системы тел и полей, их строение, взаимодействие и движение.

Физическое знание, являясь результатом познания материального мира, строится на основе изучения физических моделей объективной действительности. Процесс познания физических объектов и явлений начинается с проведения наблюдений или постановки специального научного опыта (эксперимента), в котором целенаправленно изучаются определенные свойства физического объекта, явления. Полученные в результате наблюдений и (или) эксперимента сведения о том, что происходит в природе, называются *научными фактами*. Иными словами, научные факты – это знания, достоверность которых доказана.

В результате обобщения фактов формулируются *физические понятия*.

Физическое понятие – это мысль (знание), в которой отражаются общие существенные свойства (стороны) определенного класса физических объектов и явлений, существенные связи и отношения между ними.

Слово или словосочетание, которое является точным названием определенного физического понятия, называется **физическим термином**.

Физические понятия условно можно разделить на пять основных групп.

1. Структурные формы вещества (макротела, молекулы, атомы, ионы, ядра атомов, элементарные частицы).
2. Свойства материальных объектов (вещества и полей).
3. Физические явления (механические движения, тепловые, электрические, магнитные, оптические и др.).
4. Физические величины, характеризующие свойства тел и явлений (масса, скорость, температура, давление, плотность, заряд и др.).
5. Предметные понятия (приборы, установки и т. д.).

Определение любого из понятий каждой из пяти групп дается через ближайшее родовое понятие и видовое отличие.

Основную группу понятий в физике составляют физические величины.

Физическая величина – это количественная характеристика свойств материальных объектов и явлений, которая имеет числовое значение, полученное путем измерений и показывающая, в какой степени данное свойство проявляется у того или иного объекта.

Физические величины – это принятый в физике способ описания объективной реальности. Так, например, в природе нет сил как чего-то самостоятельного, что существует наряду с материальными объектами (телами и полями) или независимо от них, а есть взаимодействия, для количественного описания которых вводится физическая величина, называемая силой.

Физические законы выражают необходимые устойчивые, существенные связи между физическими величинами, обусловленные наличием причинно-следственных связей между свойствами материальных объектов или между явлениями и процессами, которые происходят в природе. Связь между физическими величинами и их взаимозависимость выражаются посредством формул. Поэтому формулы, описывающие зависимости между свойствами объектов или физическими явлениями, представляют собой математические выражения физических законов, признаки и свойства явлений и процессов.

Законы, описывающие физические явления или поведение физических объектов, дают ответ на вопрос, каким образом происходит явление или как ведет себя изучаемый объект. Ответ на вопрос почему данное явление происходит именно так (объект ведет себя именно так) а не иначе, можно получить только на основании физической теории.

Физическая теория – это высшая форма организации физических знаний, дающая целостное представление о закономерностях и существенных связях идеального объекта этой теории.

В структуре завершенной физической теории можно выделить следующие части: *основание теории, ядро теории, следствия теории и ее интерпретацию*.

<table>
<tr><td colspan="5">Основание теории</td></tr>
<tr><td>Эмпирический базис</td><td colspan="2">Идеализированный объект (модель)</td><td>Система величин и процедуры их измерения</td><td>Предшествующие теории</td></tr>
<tr><td colspan="5">Ядро теории</td></tr>
<tr><td colspan="3">Система общих законов</td><td rowspan="3">Фундаментальные физические постоянные</td><td rowspan="3">Связь с предшествующими теориями</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Законы сохранения</td><td colspan="2">Законы эволюции</td></tr>
<tr><td>Динамические</td><td>Статистические</td></tr>
<tr><td colspan="5">Следствия теории</td></tr>
<tr><td colspan="2">Применение законов, входящих в ядро теории</td><td colspan="2">Объяснение эмпирических фактов</td><td>Предсказание новых явлений</td></tr>
<tr><td colspan="5">Интерпретация теории</td></tr>
<tr><td colspan="3">Истолкование основных понятий и законов</td><td colspan="2">Установление границ применимости теории</td></tr>
</table>

В основание теории входят: небольшое количество экспериментальных фактов, которые являются опытной базой теории (так называемый экспериментальный базис теории); класс физических систем, которые описываются данной теорией; идеальные физические объекты и модели этих систем; система фундаментальных физических понятий, характеризующих идеальный объект или модель, а также предшествующие физические теории, относящиеся к рассматриваемому классу физических систем.

Ядро теории – это система наиболее общих для данной теории принципов и законов, описывающих в математической форме движение и эволюцию физических систем, которые рассматриваются в теории (совокупность законов движения и законов сохранения). К ядру теории относятся также фундаментальные физические постоянные.

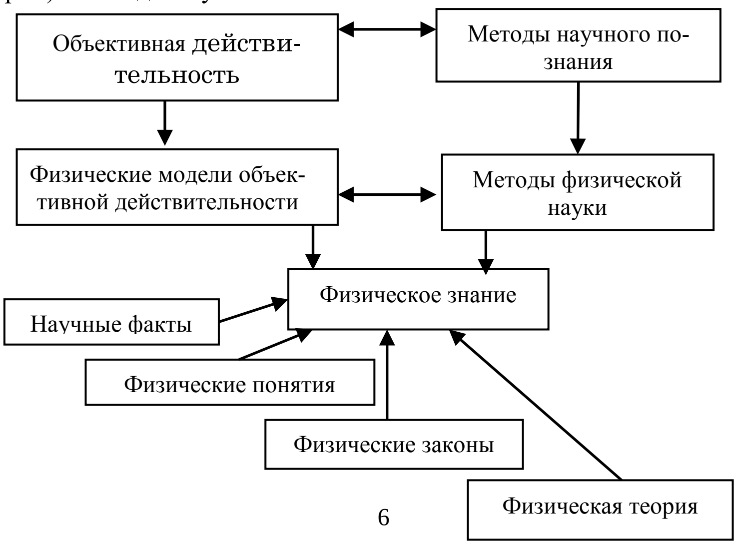
К следствиям теории относятся частные законы, которые выводятся из основных законов теории применительно к конкретной ситуации и которые позволяют объяснить уже известные научные факты и предсказать новые.

Интерпретация теории предполагает рассмотрение вопросов, касающихся соотношений между данной, предшествующими и последующими теориями, т. е. определение границ, в которых действует старая теория, входящая в ее основание.

Вне этих границ старая теория не действует, а внутри них – выводы данной и старой теорий должны совпадать. В свою очередь, данная теория может быть частью более общей теории. Поэтому важнейшим элементом интерпретации является выявление границ применения данной теории.

Физическое знание также несет в себе знание методов, при помощи которых осуществляется познание объективной действительности.

Таким образом, структура физического знания включает результаты познания объективной действительности (научные факты, физические понятия, законы, теории) и методы научного познания.



МЕХАНИКА

Механика – наука о механическом движении материальных макроскопических тел и происходящих при этом взаимодействиях между ними. Рассматриваемые в механике взаимодействия представляют собой те действия тел друг на друга, результатом которых являются изменения скоростей точек этих тел или их деформации

Классическая механика как физическая теория исходит из гипотезы о том, что свойства пространства и времени не зависят от наличия или отсутствия в нем каких-либо физических объектов. Пространство и время в классической механике считаются абсолютными. Поэтому результаты измерений промежутков времени и длин отрезков не меняются при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой.

Пространство – форма существования материи, выражающая ее протяженность, структурность, сосуществование и взаимодействие элементов во всех материальных системах.

Время – форма существования материи, выражающая длительность ее существования, последовательность смены состояний в изменении и развитии всех материальных систем (совокупность отношений, выражающих координацию, сменяющих друг друга состояний (явлений) – их последовательность и длительность).

Физические величины, значения которых не изменяются при переходе от одной инерциальной системы к другой, называют **инвариантными (**масса, сила, заряд и др.). Если значения физической величины в разных инерциальных системах отсчета не совпадают, то такая физическая величина называется **относительной (**перемещение, скорость, импульс энергия и др.).

Математическое выражение второго закона Ньютона также инвариантно относительно выбора инерциальной системы отсчета, поскольку все физические величины, входящие в этот закон, не зависят от выбора инерциальной системы отсчета.

Из сказанного следует, что все механические явления при одинаковых условиях в любых инерциальных системах отсчета происходят одинаково. Это утверждение называют *принципом относительности Галилея*. Иными словами, равномерное прямолинейное движение системы отсчета не влияет на механические явления, т. е. все инерциальные системы отсчета в отношении механических явлений равноправны.

Основная (прямая) задача механики состоит в определении положения тела в любой момент времени по заданным начальным и граничным условиям (координаты, скорость, связи) и действующим на тело силам.

Эта задача решается на основе трех законов Ньютона. Первый закон постулирует существование инерциальных систем отсчета и дает способ отыскания этих систем. Третий закон позволяет найти все существенные взаимодействия данного тела с окружающими материальными объектами и установить, таким образом, силы, действующие на это тело. Второй закон дает возможность найти ускорение данного тела в инерциальной системе отсчета, если известна зависимость сил взаимодействия от координат взаимодействующих тел или их относительной скорости, т. е. силы $\vec{F}$ как функции перемещения (координат) и скорости $\vec{F} = \vec{F}(\vec{r}, \vec{\upsilon})$, должны быть определены независимо от второго закона Ньютона (закон всемирного тяготения, закон Гука, закон Кулона и т. д.).

Определив ускорение $\vec{a} = \vec{a}(t)$, используя зависимость $\vec{F} = m\vec{a}$, можно найти скорость и радиус-вектор тела в произвольный момент времени $\vec{\upsilon}(t) = \vec{\upsilon}_0 + \int_0^t \vec{a}(t)dt$ и $\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \int_0^t \vec{\upsilon}(t)dt$, т. е. решить основную задачу механики.

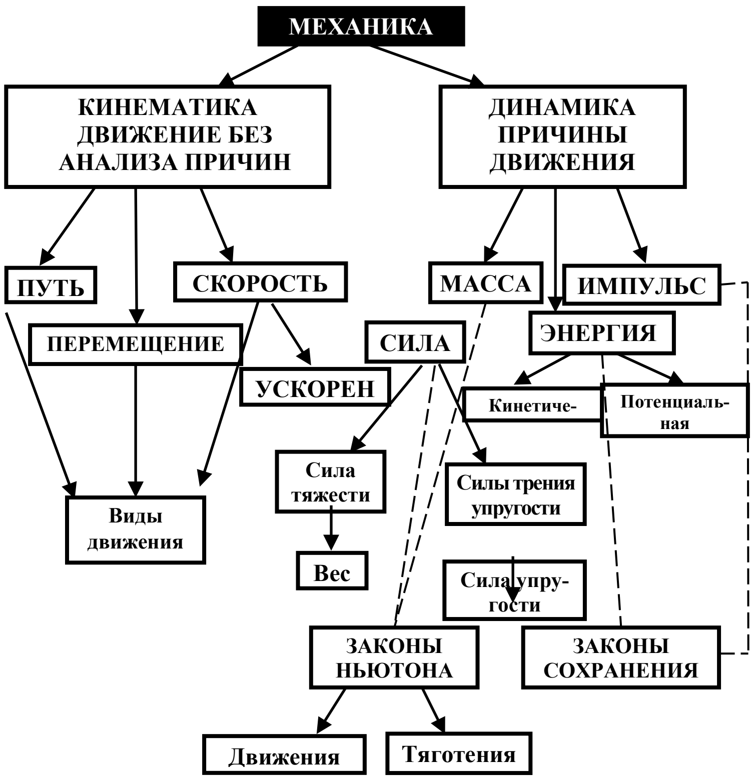


Рисунок 1. Структура и содержание механики

РАЗДЕЛ 1. ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ

Механическое движение. Относительность движения. Система отсчета. Материальная точка. Траектория. Путь и перемещение.

Равномерное движение. Графическое представление равномерного движения.

Неравномерное движение. Средняя скорость. Мгновенная скорость.

Равноускоренное движение. Ускорение. Графическое представление равноускоренного движения. Свободное падение.

Движение по окружности с постоянной по модулю скоростью. Линейная и угловая скорости. Период и частота вращения. Центростремительное ускорение.

Кинематика [от греч. kinema (kinematos) – движение] – раздел механики, в котором изучаются геометрические свойства механического движения тел без учета массы тел и взаимодействий между ними, т. е. без выявления причин, которые вызывают и изменяют состояние движения. Структура и содержание механики приведены на рисунке 2.

Структура и содержание кинематики

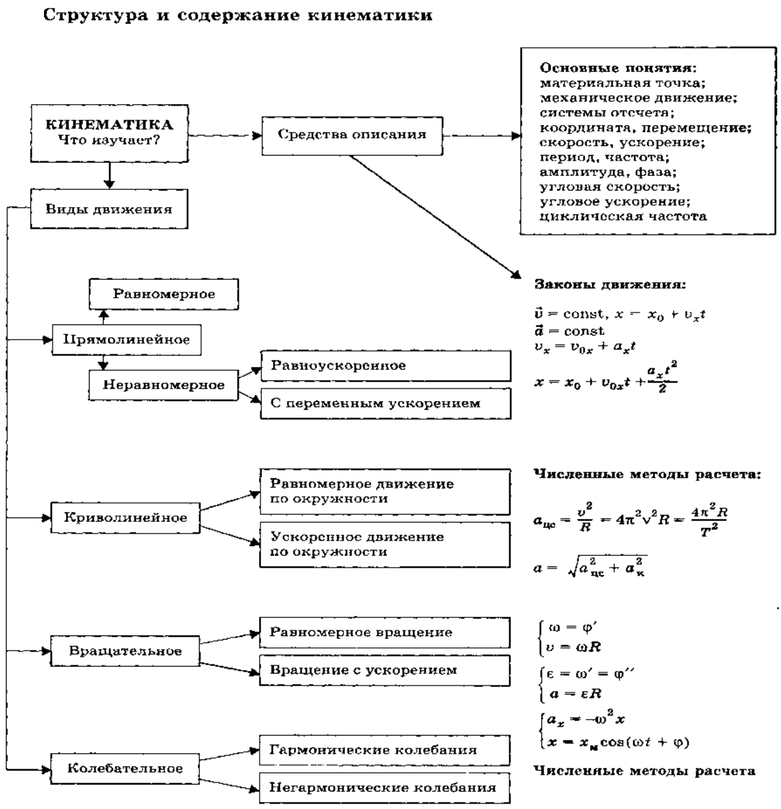


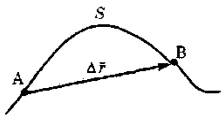
Рисунок 2. Структура и содержание кинематики

Механическое движение – это изменение с течением времени взаимного положения тел или их частиц в пространстве. Например, движение небесных тел, колебания земной коры, воздушные и морские течения, движения транспортных средств, машин и механизмов, деформации элементов конструкций и сооружений, движение жидкостей и газов и др.

Материальная точка – это тело, размерами, формой и внутренней структурой которого в рассматриваемой задаче о его движении можно пренебречь, а всю массу тела считать сконцентрированной в одной точке. Материальная точка является идеальной физической моделью реального тела, которое рассматривается в конкретной задаче. Положение материальной точки в пространстве можно задать только относительно какой-нибудь системы отсчета.

Система отсчета – реальное или условное твердое тело (тело отсчета), с которым жестко связана система координат, снабженная часами и используемая для определения положения в пространстве исследуемых физических объектов (частиц, тел и т. п.) в различные моменты времени. В физике пользуются преимущественно инерциальными системами отсчета.

Траектория (от позднелатинского trajectorius – относящийся к перемещению) – это непрерывная (явная или воображаемая) линия, которую описывает материальная точка при своем движении относительно выбранной системы отсчета.



Вид траектории движения свободной материальной точки зависит от сил, которые действуют на нее, начальных условий и системы отсчета, а вид траектории движения несвободной точки – еще и от характера связей.

Говорить о траектории движения тела имеет смысл лишь в том случае, когда размеры этого тела малы по сравнению с расстоянием, которое оно проходит.

По виду траекторий различают прямолинейное и криволинейное движения. Криволинейное движение тела можно рассматривать как сложное движение, состоящее – поступательного из вращательного движений.

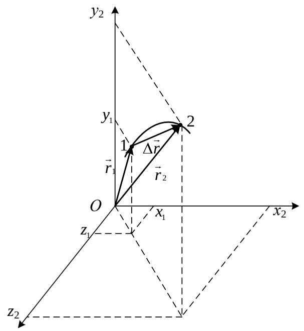
Поступательное движение – движение твердого тела, при котором прямая, соединяющая любые две точки тела, перемещается параллельно самой себе. При поступательном движении все точки тела описывают одинаковые траектории и в каждый момент времени имеют одинаковые скорости и ускорения.

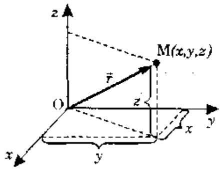
Вращательное движение – это движение тела, при котором все его точки движутся по окружностям, центры которых лежат на одной и той же прямой, называемой осью вращения.

1.1. Способы задания движения материальной точки

Векторный способ: положение материальной точки в данный момент времени характеризуется радиусом-вектором $\vec{r}$, проведенным из начала координат в данную точку.

Радиус-вектор $\vec{r}$ – физическая векторная величина, введенная для количественного определения положения материальной точки (тела) в пространстве и равная вектору, соединяющему начало координат с точкой, в которой находится тело.





Перемещение $\Delta\vec{r}$ – физическая векторная величина, введенная для количественного оценивания изменения положения, движущейся поступательно материальной точки относительно рассматриваемой системы отсчета. Перемещение $\Delta\vec{r}$ движущейся материальной точки за определенный промежуток времени – это вектор, который соединяет ее положение в момент начала отсчета времени ($t_0 = 0$) с положением в следующий момент $(t > 0)$ и направленный в сторону конечной точки, т. е.

$$\Delta\vec{r} = \vec{r}_2(t) - \vec{r}_1(t_0),$$

Где $\Delta\overrightarrow{r_2}(t)$ и $\Delta\overrightarrow{r_1}(t)$– радиусы-векторы материальной точки в эти моменты времени. Единица перемещения в СИ – метр (м).

Проекции перемещения на координатные оси Ox, Oy и Oz могут быть выражены через разности координат его конца и начала

$$\Delta r_x = \Delta x = x_2 - x_1, \ \Delta r_y = \Delta y = y_2 - y_1 \text{ и } \Delta r_z = \Delta z = z_2 - z_1,$$

где индексы 1 и 2 относятся к начальной и конечной точкам траектории.

Модуль перемещения равен длине отрезка прямой, соединяющей начальную и конечную точки траектории частицы:

$$\Delta\vec{r} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}.$$

Путь s – это физическая скалярная величина равная длине участка траектории движущейся материальной точки, расположенного между ее начальным и конечным положениями в определенной системе отсчета.

! При прямолинейном движении тела в одном направлении $\Delta r = s$.

1.2. Скорость

Скорость $\vec{v}$ – физическая векторная величина, введенная для количественного оценивания быстроты и направления движения тела (материальной точки), равная отношению перемещения $\Delta\vec{r}$ тела к промежутку времени Δt, за которое произошло это перемещение $\vec{v} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$.

Обычно термин «скорость» используют, когда речь идет о **мгновенной скорости**, которая определяется как производная от радиус-вектора материальной точки по времени: $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$. Мгновенная скорость всегда направлена по касательной к траектории движения.

Единицей скорости в СИ является метр на секунду (м/с). Прибор для измерения скорости – спидометр.

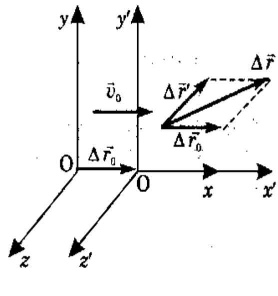
Средняя (путевая) скорость $\langle v \rangle$ – физическая скалярная величина, равная отношению пройденного пути S ко всему промежутку времени Δt, нахождения в пути: $\langle \upsilon \rangle = \frac{S}{\Delta t}$.

Средняя скорость перемещения $\langle \vec{v} \rangle$ – физическая векторная величина, равная отношению перемещения $\Delta\vec{r}$ к промежутку времени Δt, за который это перемещение было совершено: $\langle \vec{v} \rangle = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$.

1.3. Относительность движения

При решении ряда задач кинематики движение материальной точки (или тела) рассматривают одновременно по отношению к двум (или более) системам отсчета, одна из которых, называемая основной, условно считается неподвижной, а другая, определенным образом движущаяся относительно основной, – подвижной системой отсчета.

Скорость v_1 материальной точки (тела) по отношению к подвижной системе отсчета называется относительной, а ее движение – относительным. Движение всех точек подвижной системы относительно неподвижной системы отсчета называют переносным движением, а скорость той точки подвижной системы, в которой в данный момент времени находится движущаяся точка, называется переносной скоростью υ_2. Движение материальной точки (тела) по отношению к основной системе отсчета называют абсолютным, а скорость этого движения – абсолютной скоростью v.



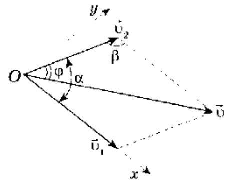
Преобразование законов движения тела при переходе от одной системы отсчета к другой осуществляется на основе принципа независимости движений, согласно которому **перемещение тела $\Delta\vec{r}$ за данный промежуток времени относительно неподвижной системы отсчета равно геометрической сумме его перемещения $\Delta\vec{r}_1$ относительно подвижной системы отсчета и перемещения $\Delta\vec{r}_0$ подвижной системы отсчета относительно неподвижной за этот промежуток времени:** $\Delta\vec{r} = \Delta\vec{r}_1 + \Delta\vec{r}_2$.

Абсолютная, относительная и переносная скорости связаны соотношением $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$.

1. Если скорости $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ направлены в одну сторону, то абсолютная скорость направлена в ту же сторону, а ее модуль равен сумме модулей относительной и переносной скоростей $v = v_1 + v_2$.

2. Если скорости $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$. направлены в противоположные стороны, то абсолютная скорость направлена в сторону большей скорости, а ее модуль, равен разности скоростей $v = |v_1 - v_2|$

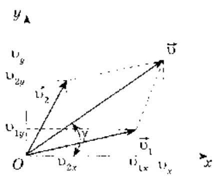
3. Если скорости $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ взаимно перпендикулярны, то абсолютная скорость будет равна диагонали прямоугольника, сторонами которого являются относительная и переносная скорости. Модуль абсолютной скорости определяется по теореме Пифагора, т. е. $\upsilon = \sqrt{\upsilon_1^2 + \upsilon_2^2}$, а ее направление задается углом φ, который определяется из формулы $\operatorname{tg}\varphi = \frac{\upsilon_2}{\upsilon_1}$. В общем случае модуль абсолютной скорости находится по теореме косинусов: $\upsilon^2 = \upsilon_1^2 + \upsilon_2^2 - 2\upsilon_1\upsilon_2\cos\beta$.



Поскольку $\beta = 180° - \alpha$, то $\upsilon = \sqrt{\upsilon_1^2 + \upsilon_2^2 + 2\upsilon_1\upsilon_2\cos\alpha}$.

Направление абсолютной скорости (угол φ между векторами $\vec{\upsilon}$ и $\vec{\upsilon}_2$) находится по теореме синусов: $\frac{\upsilon_1}{\sin\varphi} = \frac{\upsilon}{\sin\beta}$, т. е. $\varphi = \arcsin\left(\frac{\upsilon_1 \sin\alpha}{\upsilon}\right)$.

Если систему отсчета выбрать так, чтобы векторы $\vec{\upsilon}_1$ и $\vec{\upsilon}_2$ находились в одной плоскости, например в плоскости *XY*, то в проекциях на оси координат получим



$$\begin{cases} \upsilon_x = \upsilon_{1x} + \upsilon_{2x}, \\ \upsilon_y = \upsilon_{1y} + \upsilon_{2y}. \end{cases}$$

Модуль абсолютной скорости $\upsilon = \sqrt{\upsilon_x^2 + \upsilon_y^2}$.

Угол, который образует вектор $\vec{\upsilon}$ с осью *Ox*, определяется из формулы

$$\gamma = arctg\,\frac{v_y}{v_x}.$$

1.4. Равномерное движение

Равномерное движение – это движение материальной точки или поступательное движение твердого тела по прямолинейной траектории с постоянной скоростью, т. е. такое движение, при котором за любые равные промежутки времени тело совершает одинаковые перемещения. При равномерном прямолинейном движении модуль и направление скорости тела не изменяются, поэтому его ускорение равно нулю. В инерциальной системе отсчета тело движется равномерно, если равнодействующая всех сил, приложенных к нему, равна нулю, а также если на него не действуют внешние силы.

Кинематические законы равномерного прямолинейного движения в векторной форме имеют следующий вид:

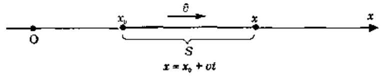
$$\begin{cases} \vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \vec{\upsilon} t, \\ \vec{\upsilon}(t) = \vec{\upsilon}_0, \\ \vec{a} = \vec{0} \end{cases}$$ или $$\begin{cases} \Delta\vec{r} = \vec{\upsilon} t, \\ \vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_0, \\ \vec{a} = \vec{0}, \end{cases}$$ где $\vec{v}_0$ – скорость материальной точки в момент времени $t_0 = 0$.

В проекциях на оси координат векторные уравнения имеют следующий вид:

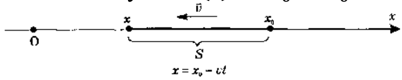
$$\begin{cases} x(t) = x_0 + \upsilon_{0x} t, \\ \upsilon_x(t) = \upsilon_{0x}, \\ a_x = 0, \end{cases} \quad \begin{cases} y(t) = y_0 + \upsilon_{0y} t, \\ \upsilon_y(t) = \upsilon_{0y}, \\ a_y = 0, \end{cases} \quad \begin{cases} z(t) = z_0 + \upsilon_{0z} t, \\ \upsilon_z(t) = \upsilon_{0z}, \\ a_z = 0. \end{cases}$$

Самая простая система отсчета для описания прямолинейного движения представляет собой тело отсчета, ось *Ox*, направленную вдоль линии движения, и часы, которые включают в момент времени, когда координата материальной точки равна x_0.

Если материальная точка движется в положительном направлении оси *OX*, ее координата в этой системе отсчета в произвольный момент времени $x(t) = x_0 + \Delta r_x$, где x_0 – начальная координата материальной точки; Δr_x – проекция перемещения на ось *Ox*. Поскольку $v_x(t) = v_0$, то $r_x = v_0 t$, поэтому $x(t) = x_0 + v_0 t$.



Если материальная точка движется в сторону, противоположную оси *Ox*, то $v_x(t) = -v_0$, $\Delta r_x = -v_0 t$. В этом случае $x(t) = x_0 - v_0 t$.



В обоих случаях координата материальной точки является линейной функцией времени. Поэтому график зависимости координаты от времени представляет собой прямую линию, вид которой определяется функцией $x = x(t)$. Зависимость проекции скорости на ось *OX* от времени представляет собой прямую, параллельную оси времени, причем, если угол между направлением скорости и осью острый, проекция положительна, а если тупой,– отрицательна

1.5. Равноускоренное движение

Ускорение *a* – физическая векторная величина, введенная для количественного оценивания изменения быстроты и направления движения материальной точки (тела) и равная отношению изменения скорости $\Delta\vec{v}$ движения материальной точки к промежутку времени Δt, за который произошло это изменение: $\vec{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$.

Единицей ускорения в СИ является метр на секунду в квадрате (м/с^2). Прибор, предназначенный для измерения ускорения, называют акселерометром.

Изменить скорость $\vec{v}$ движения материальной точки можно изменив только ее модуль; изменив только ее направление; изменив модуль и направление скорости одновременно.

Поэтому полное ускорение материальной точки обычно представляют в виде суммы двух слагаемых: $\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$, где a_n – нормальное (центростремительное) ускорение, характеризующее быстроту изменения модуля скорости, $\vec{a}_\tau$ – тангенциальное (касательное) ускорение, характеризующее быстроту изменения направления скорости.

Равноускоренное прямолинейное движение – это движение материальной точки (тела) по прямой с ускорением, модуль которого постоянный, т. е. такое прямолинейное движение, при котором за любые равные промежутки времени модуль скорости движения материальной точки изменяется на одну и ту же величину.

В данном случае нормальное ускорение $\overrightarrow{a_n} = 0$. Поэтому полное ускорение равно тангенциальному $\vec{a} = \overrightarrow{a_\tau} = \overrightarrow{const}$. По определению $\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}-\overrightarrow{v_0}}{\Delta t}$, где $\overrightarrow{v_0}$ – скорость в момент начала отсчета времени (t_0 = 0); $\vec{v}$ – скорость в момент времени t. Поэтому $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$. Эту формулу иногда называют *первым кинематическим законом* равноускоренного прямолинейного движения.

Зависимости радиуса – вектора $\vec{r}(t)$ и перемещения $\Delta\vec{r}(t)$ материальной точки, которая движется равноускоренно, от времени имеют вид

$$\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \vec{\upsilon}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}, \quad \Delta\vec{r}(t) = \vec{\upsilon}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}.$$

Поэтому кинематические законы равноускоренного прямолинейного движения в векторной форме имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \vec{\upsilon}_0 t + \dfrac{\vec{a}t^2}{2}, \\ \vec{\upsilon}(t) = \vec{\upsilon}_0 + \vec{a}t, \\ \vec{a} = \overrightarrow{\mathrm{const}} \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \Delta\vec{r}(t) = \vec{\upsilon}_0 t + \dfrac{\vec{a}t^2}{2}, \\ \vec{\upsilon}(t) = \vec{\upsilon}_0 + \vec{a}t, \\ \vec{a} = \overrightarrow{\mathrm{const}}, \end{cases}$$

В проекциях на оси координат кинематические законы равноускоренного прямолинейного движения имеют следующий вид:

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + \upsilon_{0x} t + \dfrac{a_x t^2}{2}, \\ \upsilon_x(t) = \upsilon_{0x} + a_x t, \\ a_x = \mathrm{const}, \end{cases} \quad \begin{cases} y(t) = y_0 + \upsilon_{0y} t + \dfrac{a_y t^2}{2}, \\ \upsilon_y(t) = \upsilon_{0y} + a_y t, \\ a_y = \mathrm{const}, \end{cases} \quad \begin{cases} z(t) = z_0 + \upsilon_{0z} t + \dfrac{a_z t^2}{2}, \\ \upsilon_z(t) = \upsilon_{0z} + a_z t, \\ a_z = \mathrm{const}. \end{cases}$$

Если материальная точка движется вдоль оси Ox, то $y(t) = y_0$, $v_y(t) = 0$, $a_y(t) = 0$, $z(t) = z_0$, $v_z(t) = 0$, $a_z(t) = 0$. В этом случае

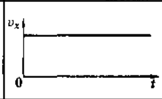
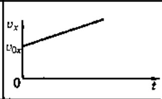
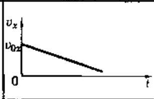
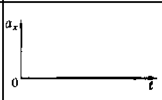
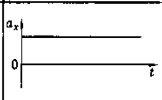
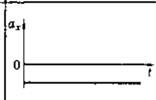
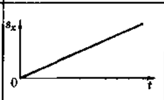
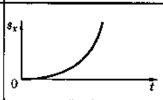
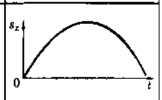
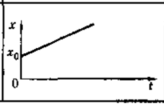
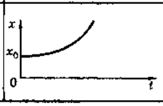
$$v_x(t) = v_{0x} + a_x t.$$

Проекция скорости на ось Ox является линейной функцией от времени, поэтому график $\upsilon_x = \upsilon_x(t)$ представляет собой прямую. Модуль перемещения на этом графике численно равен площади соответствующей трапеции.

Графическая интерпретация равномерного и равноускоренного прямолинейного движения приведена в табл. 1.

Таблица 1

Графики движений

	Равномерное движение		Равноускоренное движение		
	Формула	График	Формула	График	
				$\vec{a} \uparrow\uparrow \vec{v}_0$	$\vec{a} \uparrow\downarrow \vec{v}_0$
Скорость	$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$		$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$		
Ускорение	$\vec{a} = \vec{0}$		$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$		
Перемещение	$\vec{s} = \vec{v}t$		$\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}$		
Координата	$x = x_0 + v_x t$		$x = x_0 + v_0 t + \frac{a_x t^2}{2}$		

Основные величины, характеризующие прямолинейное равноускоренное движение и движение по окружности приведены в табл. 2.

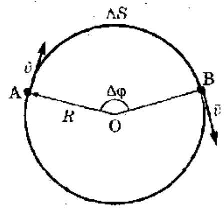
Таблица 2

Движение с ускорением

	Вид движения	
	Равноускоренное прямолинейное движение	Равномерное движение по окружности
Взаимное направление скорости и ускорения	По одной прямой (в одну или противоположные стороны)	Под прямым углом друг к другу
Постоянно ли ускорение: а) по модулю б) по направлению	а) постоянно б) постоянно	а) постоянно б) изменяется
Формула скорости	$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$	$v = \frac{2\pi R}{T}$
Формула ускорения	$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$	$a = \frac{v^2}{R} = \frac{4\pi^2}{T^2}R = 4\pi^2\nu^2 R$
Формула координаты	$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$	$x = R\sin\frac{2\pi}{T}t$ $y = R\cos\frac{2\pi}{T}t$

1.6. Равномерное движение по окружности

При вращательном движении каждая точка тела движется по окружности. *Угол поворота*, $\Delta\varphi$ – физическая скалярная величина, характеризующая движение произвольной точки тела по окружности в угловых единицах. Угол поворота и пройденный точкой по окружности путь Δs за промежуток времени Δt связаны соотношением: $\Delta s = R\Delta\varphi$, где R – радиус окружности.



Единицей угла поворота в СИ является радиан (рад).

Частота вращения, ν – физическая скалярная величина, введенная для количественного оценивания быстроты вращения твердого тела и равная (при равномерном вращении) отношению числа N оборотов тела к промежутку времени t вращения: $v\frac{N}{\Delta t}$.

Единица частоты вращения в СИ – секунда в минус первой степени ($с^{-1}$); внесистемные единицы – оборот в секунду (об/с) или оборот в минуту (об/мин).

Прибор, предназначенный для измерения частоты вращения, называется тахометром.

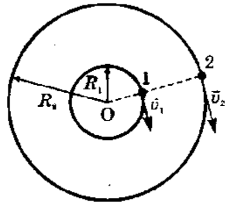
Период вращения T – промежуток времени, на протяжении которого любая точка тела делает полный оборот вокруг оси.

Из определения периода и частоты вращения следует, что они связаны соотношением $T = \frac{1}{v}$.

Угловая скорость $\vec{\omega}$ – физическая векторная величина, характеризующая быстроту вращения твердого тела и направленная по оси его вращения в ту сторону, откуда поворот тела виден происходящим в направлении противоположном движению часовой стрелки. Угловая скорость в общем случае определяется как производная от угла поворота $\varphi(t)$ по времени t: $\vec{\omega} = \frac{d\varphi}{dt}$.

Единицей угловой скорости в СИ является радиан на секунду (рад/с).

Средняя угловая скоростьт $\langle\omega\rangle$ – физическая скалярная величина, равная отношению угла поворота радиус-вектора к промежутку времени, за который этот поворот совершился, т. е. $\langle\omega\rangle = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$.



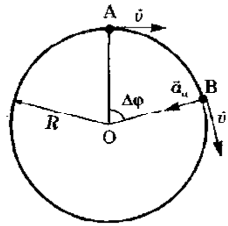
Модуль линейной скорости материальной точки при ее движении по окружности равен отношению пути (длины дуги окружности) Δs к промежутку времени Δt, за которое этот путь пройден, т. е. $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ или $\Delta s = v\Delta t$. Если угол поворота измеряется в радианах, то $\Delta\varphi = \frac{\Delta s}{R}$, где R – радиус окружности. Поэтому $\omega = \frac{v}{R}$ или $v = \omega r$.

За промежуток времени, равный периоду вращения, материальная точка проходит путь, равный длине окружности, поэтому модуль линейной скорости вращательного движения $v = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi nR$.

Модуль угловой скорости ω можно выразить через период *T* или частоту вращения *n*:

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi.$$

Линейная $\vec{v}$ и угловая $\vec{\omega}$ скорости материальной точки, движущейся по окружности радиусом $\vec{R}$, связаны соотношением $\vec{v} = (\vec{\omega} \cdot \vec{R})$ или в скалярной форме v = ω·*R*, так как векторы *R* и $\vec{\omega}$ взаимно перпендикулярны.



При равномерном движении по окружности модуль скорости материальной точки (тела) с течением времени не изменяется, а изменяется только ее направление. Поскольку скорость точки изменяется по направлению, то при равномерном движении по окружности точка имеет ускорение. Это ускорение в любой момент времени направленно по радиусу к центру окружности и называется центростремительным ускорением

Модуль центростремительного ускорения *a* определяется соотношением: $a = \frac{v^2}{R}$, где υ – модуль линейной скорости тела, *R* – радиус кривизны траектории.

Модуль центростремительного ускорения $a_ц$ можно выразить через период *T* или частоту вращения *n:*

$$a = \frac{\upsilon^2}{R} = \omega^2 R = 4\pi^2 \nu^2 R = \frac{4\pi^2 R}{T^2}.$$

! При вращении тела относительно некоторой оси угол поворота *Δφ* и угловая скорость $\vec{\omega}$ для всех точек тела будут одинаковыми. В то же время путь S и линейная скорость $\vec{\upsilon}$ будут зависеть от расстояния *R* до оси вращения.

$$\omega = \frac{\upsilon_1}{R_1} = \frac{\upsilon_2}{R_2} \Rightarrow \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

Если траектория движения тела представляет собой произвольную кривую, центростремительное ускорение в каждой точке траектории направлено по нормали к ней, или, как иногда говорят, к центру кривизны траектории и является одной из составляющих полного ускорения тела.

1.7. Примеры решения задач

Задача 1. По прямой дороге навстречу друг другу двигались легковой автомобиль со скоростью, модуль которой v_1 = 90 $\frac{км}{ч}$, и мотоциклист со скоростью, модуль которой $v_2 = 20\ \frac{м}{с}$. На переезде они встретились и продолжили равномерное движение. На каком расстоянии от переезда и друг от друга находились автомобиль и мотоцикл через промежуток времени *t* = 0,50 ч после встречи?

Дано:	**Решение**
$\upsilon_1 = 90\ \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ $\upsilon_2 = 20\ \frac{\text{м}}{\text{с}} = 72\ \frac{\text{км}}{\text{ч}}$, $t = 0{,}50$ ч. ——— $s_1 - ?,\ s_2 - ?,\ l - ?$	Легковой автомобиль и мотоцикл будем считать материальными точками, которые по условию задачи движутся по прямой дороге навстречу друг другу равномерно. При равномерном прямолинейном движении путь и модуль перемещения материальной точки совпадают, т. е. $\Delta r = s = \upsilon\Delta t$. Если отсчет времени начать в момент встречи, то $\Delta t_1 = \Delta t_2 = t$.

Следовательно, модуль перемещения (расстояние от переезда) автомобиля $\Delta r_1 = s_1 = \upsilon_1 t$, т. е. $s_1 = 90\ \frac{\text{км}}{\text{ч}} \cdot 0{,}50\ \text{ч} = 45\ \text{км}$.

Модуль перемещения (расстояние от переезда) мотоцикла $\Delta r_2 = s_2 = \upsilon_2 t$, т. е. $s_2 = 72\ \frac{\text{км}}{\text{ч}} \cdot 0{,}50\ \text{ч} = 36\ \text{км}$. По условию задачи автомобиль и мотоцикл двигались в противоположных направлениях, поэтому через время t = 0,50 ч после встречи расстояние между ними составит $l = s_1 + s_2 = 81$ км.

Ответ: s_1 = 45 км, s_2 = 36 км, l = 81 км.

Задача 2. Координаты двух теплоходов изменяются с течением времени по закону: $x_1 = A_1 + B_1 t$ и $x_2 = A_2 + B_2 t$, где A_1 = 6 км, $B_1 = 24\ \frac{\text{км}}{\text{ч}}$, A_2 = – 6 км, $B_2 = 60\ \frac{\text{км}}{\text{ч}}$. Через какой промежуток времени второй теплоход догонит первый?

Дано:	**Решение**
$x_1 = A_1 + B_1 t$, A_1 = 6 км, $B_1 = 60\ \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ $x_2 = A_2 + B_2 t$, A_2 = – 6 км, $B_2 = 60\ \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ ——— $x_{01} - ?,\ x_{02} - ?,\ \upsilon_{1x} - ?,\ \upsilon_{2x} - ?,\ t - ?$	Согласно кинематическим законам движения координата обоих теплоходов $x = A + Bt$, является линейной функцией времени. Поэтому движение обоих теплоходов является равномерным. Если отсчет времени начать в момент $t_0 = 0$, то координата первого теплохода в любой момент времени $x_1 = x_{01} + v_{1x} t$.

С учетом этого, $x_{01} = A_1 = 6$ км, $v_{1x} = B_1 = 24\frac{\text{км}}{\text{ч}}$. Координата второго теплохода в любой момент времени $x_1 = x_{01} + v_{1x} t$. Следовательно, $x_{02} = A_2 = -6$ км, $v_{2x} = B_2 = 60\frac{\text{км}}{\text{ч}}$.

В момент времени, когда второй теплоход догонит первый, их координаты будут одинаковыми, т. е. $x_1 = x_2$. Следовательно, $A_1 + B_1 t = A_2 + B_2 t$ Откуда искомый промежуток времени $\Delta t = t - t_0 = \frac{A_1 - A_2}{B_2 - B_1}$; $t = \frac{12\ \text{км}}{60\frac{\text{км}}{\text{ч}} - 24\frac{\text{км}}{\text{ч}}} = \frac{1}{3}$ ч = 20 мин.

Ответ: t = 20 мин.

Задача 3. Управляемая игрушка прошла участок пути s_1 = 3,0 м за промежуток времени Δt_1 = 20 с, а затем, двигаясь перпендикулярно этому участку, еще путь s_2 = 4,0 м за Δt_2 = 30 с. Определите среднюю скорость пути и среднюю скорость перемещения игрушки, считая оба участка пути прямолинейными.

Д а н о:	**Р е ш е н и е**
$s_1 = 3{,}0$ м, $\Delta t_1 = 20$ с, $s_2 = 4{,}0$ м, $\Delta t_2 = 30$ с. $\langle \upsilon \rangle$ – ?, $\lvert\langle \vec{\upsilon} \rangle\rvert$ – ?	Средней скоростью пути называется физическая скалярная величина, равная отношению пройденного пути s ко всему промежутку времени Δt нахождения в пути, т. е. $\langle \upsilon \rangle = \dfrac{s}{\Delta t}$.

Путь, пройденный управляемой игрушкой $s = s_1 + s_2$. Промежуток времени нахождения игрушки в пути $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$. Следовательно, средняя скорость пути $\langle v \rangle = \frac{s_1+s_2}{\Delta t_1+\Delta t_2}$. Подставив числовые значения путей и промежутков времени и выполнив вычисления, получим $\langle v \rangle = \frac{3{,}0\text{ м}+4{,}0\text{ м}}{20\text{ с}+30\text{ с}} = \frac{7{,}0\text{ м}}{50\text{ с}} = 0{,}14\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Средней скоростью перемещения называется физическая векторная величина, равная отношению перемещения $\Delta\vec{r}$ к промежутку времени Δt, за который это перемещение было совершено, т. е. $\langle \vec{\upsilon} \rangle = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$.

Модуль средней скорости перемещения – физическая скалярная величина равная отношению модуля перемещения Δr к промежутку времени Δt, за который это перемещение было совершено, т. е. $\lvert\langle \vec{\upsilon} \rangle\rvert = \Delta r/\Delta t$.

Поскольку оба участка пути прямолинейные, то модули перемещений игрушки на каждом из них равны соответствующим путей, т. е $\Delta r_1 = s_1$ = 3,0 м и $\Delta r_2 = s_2$ = 4,0 м. Если учесть, что $\Delta\vec{r}_1 \perp \Delta\vec{r}_2$, то модуль перемещения игрушки через промежуток времени $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$ нахождения в пути, можно найти по теореме Пифагора, т. е. $\Delta r = \sqrt{\Delta r_1^2 + \Delta r_2^2} = \sqrt{s_1^2 + s_2^2}$. Следовательно, модуль средней скорости перемещения $\lvert\langle \vec{\upsilon} \rangle\rvert = \dfrac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}}{\Delta t_1 + \Delta t_2}$.

Подставив числовые значения путей и промежутков времени и выполнив вычисления, получим $\lvert\langle \vec{v} \rangle\rvert = \frac{\sqrt{(3\text{ м})^2+(4\text{ м})^2}}{20\text{ с} + 30\text{ с}} = \frac{5\text{ м}}{50\text{ с}} = 0{,}10\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Ответ: $\langle \upsilon \rangle = 0{,}14\ \dfrac{\text{м}}{\text{с}}$; $\lvert\langle \vec{\upsilon} \rangle\rvert = 0{,}10\ \dfrac{\text{м}}{\text{с}}$.

Задача 4. Модуль скорости движения катера относительно воды $v_1 = 4{,}0\,\frac{\text{м}}{\text{с}}$. Какие значения может принять модуль скорости движения катера относительно берега, если модуль скорости течения воды $v_2 = 1{,}5\,\frac{\text{м}}{\text{с}}$?

Дано:	Решение
$\upsilon_1 = 4{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $\upsilon_2 = 1{,}5\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$	
υ – ?	

Приняв катер за материальную точку, рассмотрим его движение одновременно по отношению к двум системам отсчета, одну из которых условно считаем неподвижной (система отсчета «берег»), а другую, движущуюся относительно первой, считаем подвижной системой отсчета (система отсчета «вода»). Согласно закону сложения скоростей Галилея, при таком выборе систем отсчета, скорость $\vec{v}$ катера относительно берега (поверхности Земли) равна векторной сумме его скорости $\vec{v}_1$ относительно воды и скорости $\vec{v}_2$ течения воды относительно берега, т. е. $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$.

В зависимости от направления движения катера угол между векторами $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ может изменяться от нуля (направления движения катера и течения воды совпадают) до 180° (направления движения катера, и течения воды противоположные). Поэтому модуль скорости катера относительно берега может изменяться от максимального значения, $v_{max} = v_1 + v_2$ когда катер плывет по течению, до минимального значения, $v_{min} = v_1 - v_2$, когда катер плывет против течения.

Следовательно, $\upsilon_{\max} = 4{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}} + 1{,}5\ \frac{\text{м}}{\text{с}} = 5{,}5\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $\upsilon_{\min} = 4{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}} - 1{,}5\ \frac{\text{м}}{\text{с}} = 2{,}5\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Ответ: $2{,}5\ \frac{\text{м}}{\text{с}} \le \upsilon \le 5{,}5\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Задача 5. Поперек реки натянут трос. Пловец должен переправиться через реку, плывя параллельно тросу. Модуль скорости течения воды $u = 0{,}50\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Под каким углом к тросу должна быть направлена скорость движения пловца $\vec{\upsilon}$ относительно воды, если модуль скорости $\vec{v}_0$ пловца относительно берега $v = 1{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Чему равен модуль скорости $\vec{v}_0$ пловца относительно воды? Сколько времени займет переправа при ширине реки l = 97 м?

Дано:	Решение
$u = 0{,}50\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $\upsilon = 1{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, l = 97 м.	
α – ?, υ_0 – ?, Δt – ?	

Приняв пловца за материальную точку, рассмотрим его движение одновременно по отношению к двум системам отсчета, одну из которых условно считаем неподвижной (система отсчета «берег»), а другую, движущуюся относительно первой, считаем подвижной системой отсчета (система отсчета «вода»). Согласно закону сложения скоростей Галилея, при таком выборе систем отсчета скорость $\vec{v}_0$ пловца относительно поверхности Земли (берега) равна векторной сумме его скорости $\vec{v}$

относительно воды и скорости $\vec{u}$ воды относительно берега, т. е. $\vec{\upsilon}_0 = \vec{\upsilon} + \vec{u}$. Вектор $\vec{v}_0$ является диагональю параллелограмма построенного на векторах $\vec{v}$ и $\vec{u}$ как на сторонах (см. рис). Согласно условию задачи вектор $\vec{v}_0$ направлен перпендикулярно к берегу, т. е. векторы $\vec{v}_0$ и $\vec{u}$ взаимно перпендикулярны.

Поэтому модуль скорости движения пловца относительно воды можно найти, воспользовавшись теоремой Пифагора, согласно которой $v^2 = v_0^2 + u^2$. Из рисунка видно, что угол α между тросом и направлением скорости движения пловца $\vec{v}$ относительно воды – это угол между векторами $\vec{\upsilon}$ и $\vec{\upsilon}_0$. Поэтому $\sin\alpha = \frac{u}{\upsilon}$. При ширине реки l промежуток времени необходимый для переправы $\Delta t = \frac{l}{v_0}$.

$\upsilon = \sqrt{\left(1{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2 - \left(0{,}50\ \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2} = 1{,}2\ \frac{\text{м}}{\text{с}}, \sin\alpha = \frac{0{,}50\,\frac{\text{м}}{\text{с}}}{1{,}0\,\frac{\text{м}}{\text{с}}} = \frac{1}{2}$, т. е. $\alpha = 30^\circ, \Delta t = \frac{97\ \text{м}}{1{,}0\,\frac{\text{м}}{\text{с}}} = 1{,}6$ мин.

Ответ: $\alpha = 30^\circ$ $v_0 = 1{,}12\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$; Δt = 1,6 мин.

Задача 6. Проекция υ_y мгновенной скорости сигнальной ракеты, выпущенной из ракетницы вертикально вверх, изменяется со временем по закону: $\upsilon_б = A - Bt$ где $A = 200\,\frac{\text{м}}{\text{с}}$, $B = 9{,}81\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. Определите проекцию скорости ракеты через промежуток время Δt = 10,0 с после начала движения? Через какой промежуток времени ракета достигнет наивысшей точки полета?

Д а н о:
$\upsilon_y = A - Bt$,
$A = 200\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
$B = 9{,}81\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$,
t = 10,0 с.

a –?, υ_y –?, t_1 – ?

Р е ш е н и е

Проекция υ_y мгновенной скорости сигнальной ракеты является линейной функцией времени. Следовательно, движение сигнальной ракеты является равноускоренным, поэтому зависимость проекции v_y мгновенной скорости ракеты от времени имеет вид $\upsilon_y = \upsilon_{0y} + a_y(t - t_0)$ или $v_y = A + B(t - t_0)$, где $A = \upsilon_0$, $B = a_y$. Если отсчет времени начать в момент времени t_0 = 0, то в любой момент времени: проекция $\upsilon_б$ мгновенной скорости ракеты $\upsilon_y = \upsilon_{y0} + a_y t$ ($\upsilon_y = A + Bt$).

С учетом данных, приведенных в условии задачи, получим: $\upsilon_{0y} = A =$ 200 $\frac{\text{м}}{\text{с}}$, $a_y = -$ 9,81 $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. Поскольку $\upsilon_{0y} > 0$, то ракета начинает двигаться в положительном направлении оси Oy. Модуль скорости вылета ракеты

$\upsilon_0 = \upsilon_{0y} = 200\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Проекция ускорения ракеты $a_y < 0$, т. е. ускорение ракеты направлено вертикально вниз (скорость ракеты с течением времени уменьшается). Модуль ускорения ракеты $|a_y| = 9{,}81\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

Проекция скорости ракеты через промежуток времени $\Delta t = 10{,}0$ с после начала движения $\upsilon_y = 200\ \frac{\text{м}}{\text{с}} + (-9{,}81\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}) \cdot 10{,}0\ \text{с} = 102\ \text{м}$.

В момент достижения ракетой наивысшей точки полета, ее скорость обращается в нуль, т. е. при $t = t_1$, $\upsilon_y = 0$. Следовательно, $\upsilon_{y0} + a_y t_1 = 0$. Откуда

$t_1 = -\frac{v_{0y}}{a_y} = \frac{200\,\frac{\text{м}}{\text{с}}}{9{,}81\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = 20{,}4$ с.

Ответ: $v_y = 102\frac{\text{м}}{\text{с}}$, $t_1 = 20{,}4$ с.

Задача 7. Электровоз, подходя к станции со скоростью, модуль которой $v = 20\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, начинает тормозить и через время $t = 1{,}0$ мин останавливается. Определите тормозной путь электровоза. Каким будет соотношение между путем и модулем перемещения электровоза за время торможения? Определите модуль ускорения электровоза.

Дано:	Решение
$\upsilon = 20\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $t = 1{,}0$ мин, $v_1 = 0$. S – ?, a – ?	Будем считать, что электровоз, подходя к станции, движется равноускоренно прямолинейно с ускорением, направление которого противоположно направлению его движения. При движении с постоянным ускорением проекция перемещения Δr_x является квадратичной функцией времени, т. е. $\Delta r_x = \upsilon_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$, где υ_{0x} – проекция мгновенной скорости в начала отсчета времени,

a_x – проекция ускорения. Проекция скорости при движении с постоянным ускорением $\upsilon_{1x} = \upsilon_{0x} + a_x t$, где υ_{1x} – проекция мгновенной скорости в момент времени t. Если, приняв электровоз за материальную точку, в качестве тела отсчета выбрать поверхность Земли, ось Ох направить горизонтально в сторону движения электровоза, а отсчет времени начать в момент начала торможения электровоза, то при $t_0 = 0$, $\upsilon_{0x} = \upsilon_x$. Кроме того, по условию задачи $v_{1x} = 0$.

При таком выборе системы отсчета, проекции перемещения и скорости положительны и равны их модулям, причем проекция перемещения Δr_x электровоза равна тормозному пути S, а проекция ускорения отрицательна, т. е. $\Delta r_x = s, v_{0x} = v_x = v, a_x = -a$. Следовательно, $\upsilon - at = 0$, а тормозной путь

$s = vt - \frac{at^2}{2}$. С учетом этого модуль ускорения электровоза $a = \frac{v}{t}$. Подставив полученное значение a в формулу для расчета тормозного пути, получим $s = vt - \frac{at^2}{2} = \frac{vt}{2}$. $s = \frac{20\,\frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 60\text{ с}}{2} = 600$ м, $a = \frac{20\,\frac{\text{м}}{\text{с}}}{60\text{ с}} = 0{,}33\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

Ответ: S = 600 м; $a = 0{,}33\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

Задача 8. Вертолет равнозамедленно снижается вертикально с некоторой высоты. Модуль ускорения вертолета $a = 0{,}20\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. Лопасть винта, равномерно вращаясь с частотой $v = 300\ \frac{\text{об}}{\text{мин}}$, совершила за время снижения вертолета N = 120 оборотов. С какой высоты снижался вертолет?

Дано:	**Решение**
$a = 0{,}20\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$, $\nu = 300\ \frac{\text{об}}{\text{мин}} = 5{,}0\ \frac{\text{об}}{\text{с}}$ N = 120. h – ?	Частота вращения равна отношению числа оборотов, совершенных вращающимся телом к промежутку времени, в течение которого тело вращалось, т. е. $v = \frac{N}{\Delta t}$. Откуда $\Delta t = \frac{N}{v} = \frac{120}{5}\text{с} = 24\text{с}$. Если считать, что в конце снижения скорость вертолета равна нулю (вертолет «зависает»), а в момент начала снижения модуль скорости вертолета,

которая направлена вертикально вниз, v_0, том $h = v_0\Delta t - \frac{a\Delta t^2}{2}$ и $v = v_0 - a\Delta t = 0$. Откуда $v_0 = a\Delta t$.

Следовательно, $h = a\Delta t^2 - \frac{a\Delta t^2}{2} = \frac{a\Delta t^2}{2}$, т. е $h = \frac{0{,}20\frac{\text{м}}{\text{с}^2}\cdot(24\text{ с})^2}{2} = 58$ м..

Ответ: h = 58 м.

1.8. Задания для самостоятельной работы

1.8.1.Вопросы

1. Что называется материальной точкой? Почему в механике вводят такую модель?

2. Что такое система отсчета?

3.Что такое перемещение? Всегда ли модуль перемещения равен пути, пройденному материальной точкой?

4. Какое движение называется поступательным? Вращательным?

5. Что характеризует тангенциальная составляющая ускорения? нормальная составляющая ускорения? Каковы их модули?

6. Возможны ли движения, при которых отсутствует нормальное ускорение Тангенциальное ускорение? Приведите примеры.

7. Что называется угловой скоростью? Угловым ускорением? Как определяют их направления?

8. Какова связь между линейными и угловыми величинами?

9. Почему в районе таяния ледников, айсбергов, в местах интенсивного выпадения осадков и в устьях рек, впадающих в море, возникает зона «мертвой

воды», которая оказывает большое сопротивление движению судов?

10. Чем объясняется движение ледников в горах?

11. Движение воды в реках не всегда происходит от истоков к устьям. При каких условиях могут возникать обратные течения?

12. Что является причиной интенсивной конвекции, охватывающей значительную толщу морской воды и затрудняющей ее замерзание?

13. Почему на поворотах необходимо снижать скорость автомобиля?

14. Почему в безветренную погоду снежинки падают так, чтобы плоскость их была горизонтальной?

15. В каком направлении выгоднее запускать космические ракеты: с запада на восток или с востока на запад? Почему?

16. Большие единицы измерения промежутков времени – год и сутки – дала нам сама природа. Но час, минута и секунда придуманы человеком. Что лежит в основе этих единиц?

1.8.2. Задачи

1. Эскалатор метро поднимает стоящего на нем пассажира за промежуток времени $\Delta t_1 = 1{,}0$ мин. По неподвижному эскалатору пассажир поднимается за промежуток времени $\Delta t_2 = 3$ мин. В течение какого промежутка времени Δt_3 будет подниматься пассажир, идущий вверх по движущемуся *а*) вверх, *б*) вниз по эскалатору?

2. Тигр прыгает горизонтально со скоростью, модуль которой $v = 36\ \frac{\text{км}}{\text{ч}}$, с отвесной скалы высотой $h = 12$ м. На каком расстоянии от скалы по горизонтали он приземлится?

3. При движении моторной лодки по течению реки модуль ее скорости относительно берега $v_1 = 10\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, а при движении против течения – $v_2 = 60\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$ Определите модуль скорости v_0 лодки в стоячей воде.

4. Из одного пункта по взаимно перпендикулярным дорогам выехали два велосипедиста: один со скоростью, модуль которой $v_1 = 8{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, другой – со скоростью, модуль которой $v = 6{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Определите модуль скорости первого велосипедиста относительно второго.

5. Велосипедист приближается к перекрестку со скоростью, модуль которой $v_1 = 8{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. В тот момент, когда ему оставалось проехать до перекрестка путь $s = 200$ м, от перекрестка в перпендикулярном направлении выезжает второй велосипедист со скоростью, модуль которой $v_2 = 6{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Определите наименьшее расстояние l между велосипедистами.

6. В безветренную погоду капли дождя оставляют на окне вагона равномерно движущегося поезда следы, направленные под углом $\alpha = 60°$ к вертикали. Определите модуль и направление скорости v_0 капель относительно поверхности Земли, если поезд движется со скоростью, модуль которой $v = 54\ \frac{\text{км}}{\text{ч}}$.

7. Расстояние между двумя станциями метро 3,6 км. Этот путь электропоезд прошел за промежуток времени $\Delta t = 50$ мин. В течение промежутка вре-

мени $\Delta t_1 = 2{,}0$ мин поезд двигался равноускоренно, а в течение остального промежутка времени поезд тормозил с постоянным ускорением до полной остановки. Определите максимальное значение модуля скорости поезда.

8. Вагон шириной $l = 2{,}0$ м, движущийся со скоростью, модуль которой $v = 20\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, пробила пуля, летевшая горизонтально и перпендикулярно стенкам вагона со скоростью модуль которой $v = 400\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Определите смещение Δl отверстий в стенках вагона относительно друг друга.

9. В безветренную погоду капли дождя оставляют на боковом окне трамвая, движущегося равномерно со скоростью, модуль которой $v = 10\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, следы, направленные под углом $\alpha = 60°$ к вертикали. Определите скорость $\vec{v}_0$ капель относительно поверхности Земли.

10. Первый вагон поезда, начавшего равноускоренное движение из состояния покоя, прошел мимо человека, стоявшего на платформе у начала этого вагона, за промежуток времени $\Delta t_1 = 4{,}0$ с. Из скольких вагонов состоит поезд, если он прошел мимо этого человека за промежуток времени $\Delta t = 12$ с.

11. Определите промежуток времени, необходимый для загрузки кузова четырехтонного автомобиля свеклой, если модуль скорости ленты транспортера $v = 1{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, средняя масса корнеплода $m = 2{,}5$ кг, а расстояние между корнеплодами на ленте транспортера $l = 0{,}30$ м.

12. Кормоуборочный комбайн движется по полю со скоростью, модуль которой $v = 5{,}2\ \frac{\text{км}}{\text{ч}}$. Сколько кукурузы накосит комбайн за промежуток времени $\Delta t = 3{,}5$ ч непрерывной работы, если ширина захвата его жатки $L = 3{,}4$ м, а урожайность зеленой массы $\frac{m}{S} = 520\ \frac{\text{ц}}{\text{га}}$?

13. Тело равномерно движется по окружности радиусом $R = 1{,}0$ м. Определите модуль перемещения тела за промежуток времени $\Delta t = 1{,}0$ с, если период вращения тела $T = 6{,}9$ с.

14. Минутная стрелка часов в три раза длиннее секундной стрелки. Определите отношение модулей линейных скоростей концов этих стрелок.

15. Два тела одновременно начинают движение по окружности из одной точки в одном направлении. Период вращения первого тела – T_1 второго – T_2. Определите, через какой минимальный промежуток времени от начала движения первое тело догонит второе.

16. Два тела вращаются по окружностям с одинаковыми центростремительными ускорениями, причем радиус вращения первого тела в четыре раза больше радиуса вращения второго тела. Первое тело за некоторый промежуток времени совершило N_1 оборотов. Сколько оборотов N_2 за этот же промежуток времени совершит второе тело?

17. Определите среднюю скорость движения поршня в цилиндре двигателя автомобиля, если модуль скорости автомобиля $v = 72\ \frac{\text{км}}{\text{ч}}$. Ход поршня $l = 9{,}2$ см,

радиус ведущих колес R = 0,25 м, а модуль угловой скорости коленчатого вала двигателя в два раза больше модуля угловой скорости ведущих колес.

18. Диаметр велосипедного колеса D = 0,60 м. Число зубьев на ведущей звездочке в пять раз больше их числа на ведомой. Определите модуль угловой скорости шатуна велосипеда, если модуль скорости велосипедиста $v = 36\frac{\text{км}}{\text{ч}}$.

РАЗДЕЛ 2. ОСНОВЫ ДИНАМИКИ

Первый закон Ньютона. Инерциальные системы отсчета. Принцип относительности Галилея.

Масса. Сила. Сложение сил. Второй закон Ньютона. Третий закон Ньютона. Значение законов Ньютона. Принцип относительности в механике.

Сила упругости. Закон Гука. Силы трения покоя, скольжения, качения. Вязкое трение.

Закон всемирного тяготения. Сила тяжести. Ускорение свободного падения. Движение тела под действием силы тяжести Вес тела. Невесомость. Движение искусственных спутников. Первая космическая скорость.

Динамика (от греч. dynamikos – сильный, dynamis – сила) – раздел механики, в котором рассматриваются закономерности механического движения с учетом воздействия тел или частиц друг на друга, приводящего к изменению состояния их движения.

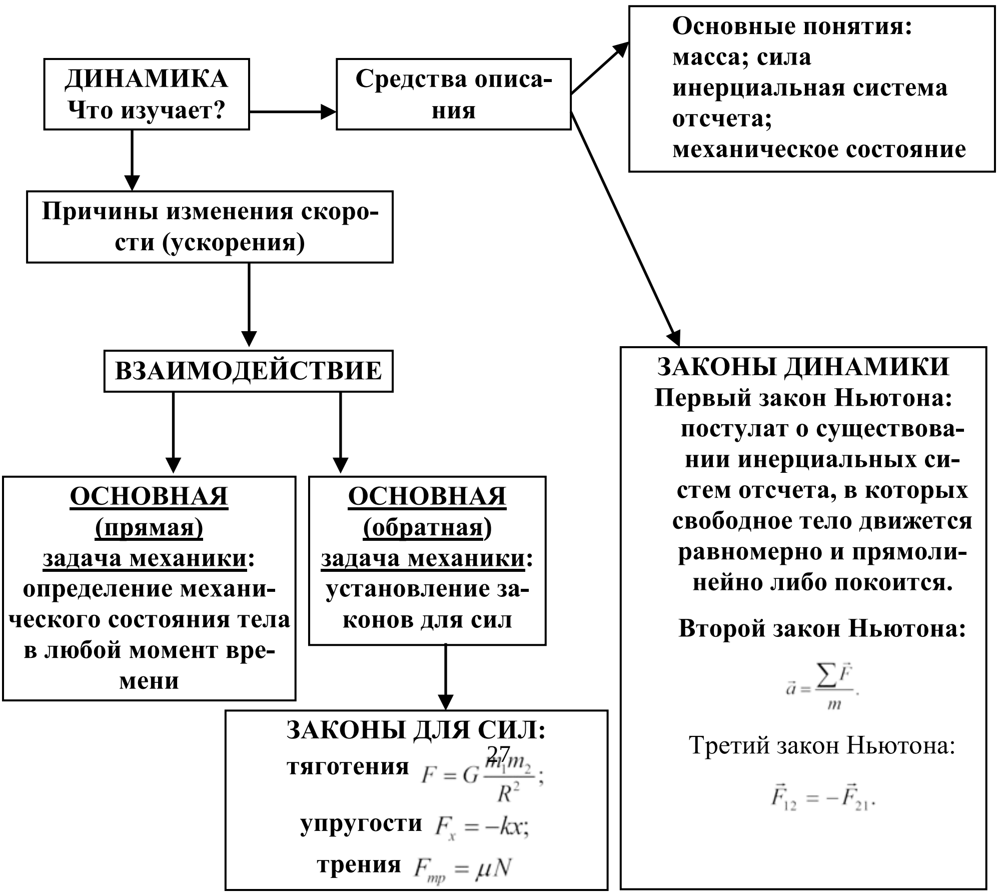


Рисунок 3.Структура и содержание динамики

Основная задача динамики (прямая) – определение законов движения материальных объектов (тел) по известным законам их взаимодействия (приложенным силам), начальным и граничным условиям. Обратная задача динамики – определение законов взаимодействия материальных объектов (тел) друг с другом по известным законам их движения.

Взаимодействие (в физике) – воздействие тел или частиц друг на друга, приводящее к изменению состояния их движения. В механике Ньютона взаимное действие тел друг на друга характеризуется силой. Более общей характеристикой взаимодействия является потенциальная энергия. Несмотря на разнообразие воздействий тел друг на друга (зависящих от взаимодействий слагающих их элементарных частиц), по современным данным в природе имеется лишь 4 типа фундаментальных взаимодействий.

Это (в порядке возрастания интенсивности): гравитационное взаимодействие, слабое взаимодействие (отвечающее за большинство распадов и многие превращения элементарных частиц), электромагнитное взаимодействие, сильное взаимодействие (обеспечивающее, в частности, связь частиц в атомных ядрах и поэтому часто называемое ядерным). Интенсивность взаимодействия определяется соответствующей константой связи. В частности, для электромагнитного взаимодействия константой связи является электрический заряд.

Инерция, инертность (от лат. inertia – бездействие), в механике – свойство тел при отсутствии внешних воздействий (или при воздействиях, взаимно уравновешивающих друг друга) сохранять неизменным состояние своего движения, а при внешних силовых воздействиях – изменять движение лишь постепенно, т. е. приобретать конечные ускорения. Мерой инерции при поступательном движении тела является его масса, а при вращательном движении вокруг неподвижной оси – момент инерции тела относительно оси вращения.

Масса m **(**от лат. massa – глыба, кусок, масса) – физическая скалярная величина, являющаяся количественной мерой инерционных и гравитационных свойств тел. Измеряется путем сравнения с мерами массы (взвешивание) или другими средствами измерения. Единица массы в СИ – килограмм (кг), является в СИ основной. 1 кг – это масса эталона, который представляет собой цилиндр высотой и диаметром 39 мм, изготовленный из сплава платины (90 %) и иридия (10 %).

Понятие «масса» было введено И. Ньютоном в основной закон динамики и в определение импульса материальной точки в качестве постоянного коэффициента.

В классической механике масса обладает следующими основными свойствами:

1. Масса тела является мерой количества вещества, количества материи.

2. Масса системы тел равна сумме масс тел, входящих в эту систему.

3. Масса замкнутой физической системы сохраняется.

4. Масса тела не изменяется при переходе от одной системы отсчета к другой, в частности, она одинакова в различных инерциальных системах отсчета.

5. Масса тела является мерой его инертности.

6. Массы тел являются источником их гравитационного взаимодействия друг с другом.

Тот факт, что масса тела является мерой его инертности, следует из второго закона Ньютона, в соответствии с которым $\vec{F} = m\vec{a}$, или $\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t$, где $\vec{p} = m\vec{\upsilon}$ – импульс тела. Поэтому в формуле связывающей импульс тела и его скорость, масса тела так же выступает как мера инертности. Масса входит и в формулу для кинетической энергии тела $E = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m}$. В этом соотношении масса снова выступает как мера инертности.

В соответствии с законом всемирного тяготения, в классической механике сила тяготения между двумя материальными точками (телами) массами m_1 и m_2, находящимися на расстоянии r друг от друга, определяется выражением $F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$. Здесь масса является мерой гравитационного взаимодействия тел.

Многочисленные экспериментальные факты свидетельствуют о том, что инертная и гравитационная массы тел равны. Массы некоторых объектов природы и техники приведены в табл. 3.

Таблица 3

Массы некоторых объектов природы и техники

Объекты природы и техники	Численное значение, кг	Объекты природы и техники	Численное значение, кг
Вселенная	10^{53}	Космическая станция	10^{4}
Наша галактика	$2{,}2\cdot10^{41}$	Автомобиль	10^{3}
Солнце	$2\cdot10^{30}$	Человек	10^{2}
Земля	$6\cdot10^{24}$	Колибри (самая маленькая птица)	10^{-3}
Луна	$7{,}4\cdot10^{22}$		
Атмосфера Земли	$5\cdot10^{18}$	Капля воды	10^{-5}
Плотина Братской ГЭС	10^{10}	Муха	10^{-6}
Пирамида Хеопса	$6\cdot10^{9}$	Снежинка	10^{-7}
Главное здание МГУ	$5\cdot10^{8}$	Бактериальная клетка	$5\cdot10^{-12}$
Останкинская телевизионная башня	$5{,}5\cdot10^{7}$	Молекула пенициллина	10^{-17}
		Молекула воды	$3\cdot10^{-20}$
Синхрофазотрон	10^{7}	Вирус гриппа	$6\cdot10^{-19}$
Ракета	10^{6}	Ядро урана	$4\cdot10^{-20}$
Самый большой из китов	$1{,}5\cdot10^{5}$	Атом водорода	$1{,}7\cdot10^{-27}$
Самолет	10^{5}	Электрон	$9{,}1\cdot10^{-31}$

Сила $\vec{F}$ – физическая векторная величина, введенная для количественного оценивания интенсивности взаимодействия тел, а также тел и полей, и равная для каждого тела произведению его массы m и ускорения $\vec{a}$:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}\,.$$

Сила, действующая на тело, является количественной мерой ускорения или деформации этого тела при взаимодействии с другими материальными объектами (телами или полями). В первом случае говорят о динамическом действии силы, а во втором – о статическом.

Сила, действующая на материальную точку, является количественной мерой только ускорения этой точки. Это действие может иметь место как при непосредственном контакте (давление прижатых друг к другу тел, трение), так и через посредство создаваемых телами полей (поле тяготения, электромагнитное поле).

Сила может быть постоянной (сила тяжести), а может определенным образом зависеть от времени (переменное электромагнитное поле), скорости (сила сопротивления среды) и положения в пространстве точки приложения силы (сила тяготения).

Сила, как вектор характеризуется модулем, направлением и точкой приложения. Поскольку в общем случае сила вызывает ускорение и деформацию, то оба эти действия можно использовать для ее измерения.

Статический метод измерения силы основан на уравновешивании измеряемой силы другой, заранее известной.

Динамический метод основан на законе динамики $m\vec{a} = \vec{F}$, позволяющем, если известна масса m тела и измерено ускорение $\vec{a}$ его свободного поступательного движения относительно инерциальной системы отсч ета, найти силу $\vec{F}$.

Результат действия на тело какой-нибудь силы зависит не только от ее модуля и направления, но и от точки приложения. Одна и та же сила может вызвать как поступательное, так и вращательное движения тела в зависимости от того, к какой точке тела она приложена. Прямую, вдоль которой направлена сила, называют линией действия силы. Если тело можно рассматривать как недеформируемое (абсолютно тв ердое), то силу можно считать приложенной в любой точке на линии е е действия.

За единицу силы в СИ принят 1 ньютон (1 Н). 1Н – это сила, под действием которой тело массой 1 кг движется с ускорением 1 $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

Таблица 4

Объекты взаимодействия	Численное значение, Н	Объекты взаимодействия	Численное значение, Н
Сила тяготения между Землей и Солнцем	$3{,}5 \cdot 10^{22}$	Сила удара футболиста по мячу	10^4
Сила тяготения между Землей и луной	$2 \cdot 10^{20}$	Сила удара боксера	$5 \cdot 10^3$
		Сила сжатия руки, сжимающей динамометр	$5 \cdot 10^2$
Сила тяги космических ракет	$4 \cdot 10^4$		
Сила давления при изго-	10^6	Сила притяжения электрона к ядру в атоме во-	$2 \cdot 10^{-8}$

товлении искусственных алмазов		дорода	
Сила тяги тепловоза	$6\cdot10^5$	Сила звукового давления у порога слышимости	$2\cdot10^{-9}$

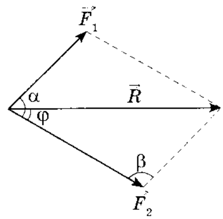
Динамометр (от греч. dynamis – сила и metreo – измеряю), силомер, – прибор для измерений силы (тяговый динамометр) или момента силы (вращательный динамометр). Модули сил, характеризующих взаимодействие некоторых объектов природы и техники, приведены в табл. 4.

2.1. Сложение сил

Согласно *принципу независимости действия сил*, если на тело одновременно действует несколько сил, то действие каждой из них можно рассматривать независимо от действия других. Поэтому одновременное действие на тело нескольких сил эквивалентно действию одной силы (*равнодействующей*), являющейся векторной суммой всех сил, приложенных к телу.

Сила, численно равная равнодействующей и направленная в противоположную сторону, называется *уравновешивающей*.

Определение равнодействующей нескольких сил называют *сложением сил*. Равнодействующая $\vec{R}$ двух сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, приложенных к одной точке тела и направленных под углом α друг к другу, является диагональю параллелограмма, построенного на этих силах как на сторонах (см. рис.). Она приложена к той же точке, что и силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ (правило параллелограмма).



Модуль равнодействующей определяется по теореме косинусов, т. е. $R^2 = F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2\cos\beta$. Поскольку $\beta = \pi - \alpha$, то модуль равнодействующей

$$R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2\cos\alpha}\ .$$

Направление равнодействующей можно задать углом φ, который определяется по теореме синусов, в соответствии с которой $\frac{F_1}{\sin\varphi} = \frac{R}{\sin(180-\alpha)}$, откуда $\varphi = arcsin\left[\frac{F_1\alpha}{R}\right]$.

Если силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ направлены перпендикулярно друг к другу, т. е. $\alpha = \frac{\pi}{2}$, то $R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$, причем $\mathrm{tg}\,\varphi = \frac{F_1}{F}$.

Если силы приложены к одной точке тела и направлены в одну сторону ($\alpha = 0°$), то равнодействующая направлена в ту же сторону, а ее модуль равен сумме модулей этих сил, т. е. $R = F_1 + F_2$.

Если силы направлены в противоположные стороны ($\alpha = 180°$) то их равнодействующая направлена в сторону большей силы, а ее модуль $R = \left| F_1 - F_2 \right|$.

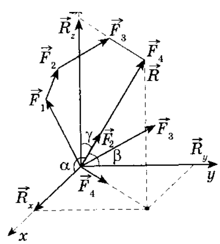
Если две силы, лежащие в одной плоскости, приложены к разным точкам тела, то для нахождения равнодействующей необходимо перенести эти силы в точку пересечения их линий действия, а затем выполнить сложение. Если точка приложения равнодействующей окажется вне тела, ее надо перенести в любую точку тела, которая находится на линии равнодействующей.

Равнодействующая нескольких сил находится либо путем последовательного применения правила параллелограмма к каждой паре сил, либо по правилу силового многоугольника, в соответствии с которым равнодействующая системы сил, приложенных к этой точке, является замыкающей векторного многоугольника, стороны которого равны и параллельны данным силам. Если графически выполнить сложение сил трудно, то модуль и направление равнодействующей можно определить, проецируя силы на оси координат. В этом случае

$$\begin{cases} R_x = F_{1x} + F_{2x} + \ldots + F_{nx}, \\ R_y = F_{1y} + F_{2y} + \ldots + F_{ny}, \\ R_z = F_{1z} + F_{2z} + \ldots + F_{nz}. \end{cases}$$

Модуль равнодействующей является диагональю параллелепипеда, построенного на составляющих R_x, R_y и R_z как на сторонах:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}\,.$$



Направление равнодействующей можно задать углами α, β и γ с осями координат, которые определяются из соотношений

$$\cos\alpha = \frac{R_x}{R},\ \cos\beta = \frac{R_y}{R},\ \cos\gamma = \frac{R_z}{R}.$$

2.2 Законы Ньютона

1-й закон Ньютона (закон инерции). Открыт в 1609 году итальянским физиком Галилео Галилеем (1564-1642).

Тело движется по инерции, т. е. равномерно и прямолинейно или находится в покое, относительно некоторых систем отсчета, называемых инерциальными, если на него не действуют другие тела или их действие скомпенсировано.

1. В формулировке первого закона Ньютона фактически содержатся два утверждения: существуют, хотя бы в идеальном представлении, некоторые привилегированные системы отсчета, которые в физике называют инерциальными; относительно инерциальных систем отсчета все тела, не взаимодействующие с другими телами (такие тела иногда называют изолированными), находятся в состоянии покоя или движутся равномерно и прямолинейно.

2. Первый закон Ньютона *определяет критерии выбора инерциальных систем отсчета*.

3. Понятие «инерциальная система отсчета» является идеальной физической моделью, т. е. научной абстракцией. Реальную систему отсчета можно считать инерциальной при условии, что при заданной точности измерений ее скорость

можно считать постоянной.

4. Так как второй и третий законы Ньютона можно сформулировать только в инерциальных системах отсчета, а сами инерциальные системы невозможно выделить без первого закона, то первый закон ни в коем случае нельзя считать следствием второго.

2-й закон Ньютона сформулирован в 1687 году английским физиком Исааком Ньютоном (1642–1727). Закон выражает количественную связь между силой, которой оценивают механическое действие на тело со стороны других тел (полей), и ускорением тела, вызванным этим действием, и гласит: **если тело, которое движется поступательно, можно считать материальной точкой, то в инерциальной системе отсчета равнодействующая всех сил F, которой оценивают механическое действие на тело со стороны других тел (или полей), равна произведению массы m и ускорения a тела, вызванного этим действием:**

$$\vec{F} = m\vec{a}.$$

Эту формулу называют *основным уравнением динамики поступательного движения*. Она является математическим выражением второго закона Ньютона.

Так как $\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$, то второй закон можно записать в виде $m\Delta\vec{v} = \vec{F}\Delta t$.

Физическая векторная величина, равная произведению массы тела и его скорости, называется **импульсом тела**, т. е. $\vec{p} = m\vec{v}$.

Физическая векторная величина, равная произведению силы и времени ее действия, называется *импульсом силы*. Поэтому второй закон Ньютона можно сформулировать следующим образом: **в инерциальной системе отсчета изменение импульса тела за промежуток времени Δt равно импульсу равнодействующей всех сил $\vec{F}\Delta t$, действующих на него в течение этого промежутка** (формулировка Ньютона).

3-й закон Ньютона. Открыт в 1687 году английским физиком Исааком Ньютоном (1642-1727). Закон выражает количественную связь между силами, используемыми для оценивания механического действия двух взаимодействующих тел друг на друга, и гласит: **если тела, находящиеся в инерциальной системе отсчета можно считать материальными точками, то силы $\vec{F}_{12}$ и $\vec{F}_{21}$, используемые для оценивания действия первого тела на второе и второго тела на первое соответственно, направлены вдоль одной прямой в противоположные стороны, а их модули равны:** $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$.

1. Согласно современным представлениям, взаимодействие тел осуществляется либо при их непосредственном контакте, либо посредством силового поля, «передающего» взаимодействие.

2. Силы при взаимодействии тел всегда возникают парами, если есть одна сила, то обязательно есть и другая, направленная в противоположную сторону.

3. Силы действуют на разные тела. Поэтому они не уравновешиваются, и не имеют равнодействующей.

4. Под действием только этих сил (часто их называют внутренними) физическая система не может прийти в движение как одно целое: центр масс системы

остается неподвижным в любой момент времени, если он покоился в момент начала отсчета времени.

5. Так как силы действия и противодействия приложены к разным телам, в качестве физической системы можно рассматривать одно из двух взаимодействующих тел и силу, действующую только на это тело, считать внешней. В этом случае силу противодействия нельзя учитывать, поскольку она приложена к другому телу. Именно для таких физических систем выполняется второй закон Ньютона (каждая из этих сил сообщает телу, к которому она приложена, ускорение обратно пропорциональное массе этого тела.).

6. Понятия «действующая сила» и «противодействующая сила» условны, природа обеих сил одинакова, иными словами взаимодействующие тела равноправны. Например, «равноправие» падающего мяча и нашей огромной планеты состоит в том, что они действуют друг на друга с равными по модулю силами. Но результат этого взаимодействия хорошо наблюдается только для мяча, потому что ускорения взаимодействующих тел обратно пропорциональны их массам.

7. Если взаимодействуют не два, а несколько тел, то в соответствии с принципом независимости действия сил третий закон Ньютона справедлив для любой пары сил, а результат взаимодействия для каждого тела зависит от того, в каких еще взаимодействиях это тело участвует.

В заключение отметим, что в третьем законе Ньютона ничего не говорится о

	Первый закон	Второй закон	Третий закон

числовых значениях сил взаимодействия. Подчеркнем, что третий закон Ньютона справедлив только для гравитационных и электромагнитных взаимодействий. Поскольку скорость передачи этих взаимодействий равна скорости света, то закон можно применять для промежутков времени,которые значительно больше тех, в течение которых устанавливается стационарное взаимодействие между телами.

Основная информация, относящаяся к законам Ньютона, приведена в табл. 5.

Таблица 5

Физическая система	Макроскопическое тело		Система двух тел
Модель	Материальная точка		Система двух материальных точек
Описываемое явление	Состояние покоя или равномерного прямолинейного движения	Движение с ускорением	Взаимодействие тел
Суть закона	Постулирует существование инерциальной системы отсчета (если $\sum \vec{F} = \vec{0}$, то $\vec{\upsilon} = \overrightarrow{const}$)	Взаимодействие определяет изменение скорости, т. е. ускорение $\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}}{m}$	Модули сил действия и противодействия равны; направления сил противоположны; силы приложены к разным телам; природа обоих сил одинакова $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$
Примеры проявления	Движение космического корабля вдали от притягивающих тел	Движение планет, падение тел на Землю, торможение и разгон автомобиля	Взаимодействие тел: Солнца и Земли, Земли и Луны, автомобиля и поверхности Земли, бильярдных шаров и др.
Границы применимости	Инерциальные системы отсчета. Макромир и мегамир. Движение со скоростями, много меньшими скорости света		

2.3. <u>Сила инерции</u>

Система отсчета, которая движется относительно инерциальной системы с ускорением $\vec{a}$, называется *неинерциальной*. В неинерциальных системах отсчета законы Ньютона не выполняются. Однако движение материальной точки в неинерциальной системе отсчета может быть описано этими законами, если кроме сил, обусловленных взаимодействием тел (тяготение, упругость, трение), ввести **силу инерции**, которая вызвана ускоренным движением самой системы отсчета:

$$\vec{F}_{\text{ин}} = -m\vec{a}.$$

Эта сила, в отличие от остальных сил, рассматриваемых в механике, зависит от выбора системы отсчета, т. е. в различных системах отсчета значения этой силы будут разными. В инерциальных системах отсчета эти силы всегда равны нулю.

Если неинерциальная система отсчета связана с телом отсчета, которое равномерно вращается вокруг оси с угловой скоростью $\vec{\omega}$, то модуль силы инерции $F_{\text{ин}} = -m\omega^2 r$. Эту силу называют центробежной силой инерции.

Для любой физической системы, которая находится в неинерциальной системе отсчета, силы инерции являются внешними, массовыми силами, аналогичными гравитационным силам, т. е. в поле сил инерции, как и в гравитационном поле, все тела движутся с одинаковым ускорением. Поэтому наблюдатель, который находится в неинерциальной системе отсчета, не может отличить силы инерции от гравитационных сил.

Физические явления, происходящие в инерциальной системе отсчета, которая находится в однородном гравитационном поле и неинерциальной системе отсчета, движущейся с постоянным (по модулю и направлению) ускорением, неразличимы. Последнее утверждение называют *принципом эквивалентности Эйнштейна*.

Поэтому все физические системы, находящиеся в неинерциальных системах отсчета, являются незамкнутыми. В таких системах отсчета не выполняются законы сохранения (что обусловлено нарушением однородности и изотропности пространства, а также однородности времени).

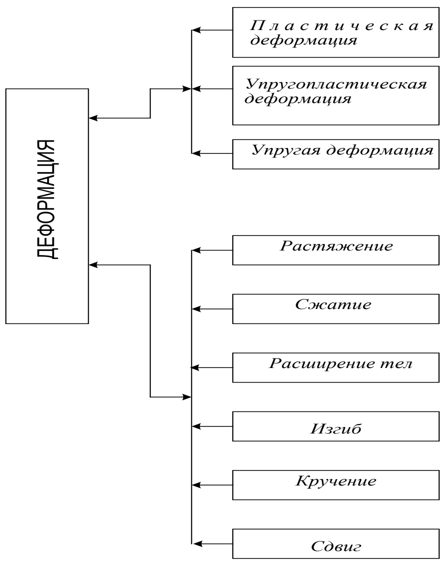
2.4.Сила упругости

Упругость – свойство тела восстанавливать свою форму и объем (твердые тела) либо только объем (жидкие и газообразные тела) после прекращения действия внешних сил или других причин (например, нагревания), вызвавших деформацию тела.

Деформация – изменение взаимного расположения множества частиц материальной среды (твердой, жидкой, газообразной), которое приводит к изменению формы и размеров тела или его частей и вызывает изменение сил взаимодействия между частицами вещества. По характеру смещения частей тела друг относительно друга различают следующие деформации: растяжение-сжатие, сдвиг, кручение и изгиб. Деформации называются однородными, если все элементы тела деформируются одинаково. К однородным деформациям относятся деформации растяжения-сжатия и сдвига. К неоднородным – относятся деформации изгиба и кручения. В отличие от твердых тел в жидкостях могут проявляться только упругие объемные деформации сжатия, исчезающие при снятии внешнего давления.

Любая деформация приводит к возникновению в теле внутренних упругих сил. Различают упругую, пластическую и упругопластическую деформации.

Деформация называется упругой, если после снятия деформирующих нагрузок тело полностью возвращается в исходное состояние. Это означает, что в деформируемом теле возникают упругие силы, строго подчиняющиеся линейному закону Гука. Закон сформулирован в 1660 году английским физиком Робертом Гуком (1635–1703) и выражает количественную связь между силой упругости, характеризующей возникающее в упругих телах (пружинах) противодействие

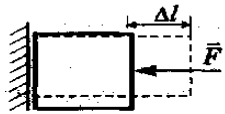


внешнему механическому воздействию и соответствующей этому воздействию деформацией (удлинением).

Сила упругости, возникающая при деформации растяжения-сжатия, прямо пропорциональна абсолютному удлинению (деформации)

$$\vec{F}_{уп} = -k\Delta\vec{l}\ ,$$

где $k = \dfrac{ES}{l_0}$ – жесткость *конструкции,* E – модуль продольной упругости вещества (модуль Юнга), S – площадь поперечного сечения, $\Delta l = \left| l - l_0 \right|$ – абсолютное удлинение стержня (пружины) (см. рис.).



Знак «–» показывает, что сила упругости направлена в сторону, противоположную внешней деформирующей силе. Закон Гука справедлив в случае, когда тело можно заменить его мысленной моделью – абсолютно упругим телом.

Закон Гука можно представить в виде: $\frac{F_{уп}}{S} = E\frac{\Delta l}{l_0}$ или $\sigma = E\varepsilon$, где $\sigma = \frac{F_{уп}}{S}$ – нормальное напряжение в поперечном сечении, $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ – относительное удлинение стержня.

Жесткость *k* – физическая скалярная величина, введенная для количественного оценивания способности упругого тела оказывать сопротивление продольному деформированию. Она зависит не только от упругих свойств вещества, но и от характеристик конструкции, изготовленной из этого вещества (например, жесткости стального стержня и стальной пружины, будут разными). Единицей жесткости в СИ является ньютон на метр (Н/м).

Модуль продольной упругости (модуль Юнга) E – физическая скалярная величина, введенная для количественного оценивания упругих свойств вещества и равная напряжению, при котором длина недеформированного стержня удваивается. Единицей модуля упругости в СИ является паскаль (Па).

При упругопластической деформации часть приобретаемой телом упругой энергии из-за отклонений упругих сил от линейного закона Гука необратимо превращается в энергию теплового движения молекул, что сопровождается нагревом тела. В этом случае после снятия деформирующей нагрузки в теле сохраняется остаточная деформация. При пластической деформации тело изменяет свою форму практически без возникновения упругих сил.

2.5. Сила трения

Трение – явление, состоящее в сопротивлении относительному перемещению соприкасающихся тел и обусловленное электромагнитным взаимодействием между частицами этих тел. Различают внешнее (сухое) и внутреннее (вязкое) трение.

Внешнее трение – механическое сопротивление, возникающее в плоскости касания двух соприкасающихся твердых тел при их относительном перемещении в отсутствии смазки между ними.

Вязкое трение возникает при движении тел в жидкости или газе.

Внешнее трение – диссипативный процесс, сопровождающийся превращением механической энергии во внутреннюю, электризацией тел, их разрушением и др. Различают внешнее *трение покоя,* трение скольжения и трение качения.

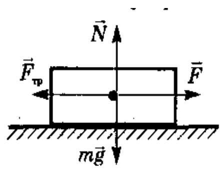
Для характеристики внешнего трения данной пары тел необходимо указать внешние условия (нагрузку, скорость, шероховатость, температуру, смазку), которые влияют на величину внешнего трения не меньше, чем природа трущихся тел.

Силой внешнего трения называют силу, возникающую при соприкосновении поверхностей двух тел и препятствующую их взаимному перемещению. Она приложена к телу вдоль поверхности соприкосновения и всегда направлена в сторону, противоположную относительной скорости движения.

Возникновение силы трения обусловлено тем, что вследствие шероховатости поверхностей, соприкасающихся друг с другом, контакт между телами имеет место только на гребнях выступов ($d \sim 1$ –50 мкм). В местах контакта поверхности внедряются одна в другую. Поэтому при движении в местах контакта возникают микродеформации (расстояние между частицами вещества уменьшается). Электромагнитные силы отталкивания, возникающие при этом, макроскопически проявляются как силы трения. Трение покоя вызывается в основном упругими деформациями микровыступов, а трение скольжения возникает в результате пластических деформаций микровыступов и их частичного разрушения.

Если относительная скорость соприкасающихся тел равна нулю, имеет место трение покоя.

Сила трения покоя может изменяться от 0 до максимального значения $F_{\text{тр.пок}}^{\max}$ в зависимости от модуля и направления приложенной вдоль линии возможного движения “смещающей” силы. Направление силы трения покоя противоположно направлению “смещающей” силы, а модули этих сил равны (см. рис.).



Модуль максимальной силы трения покоя определяется выражением $F_{\text{тр.пок}}^{\max} = \mu_0 N$, где μ_0 – **коэффициент трения покоя** – физическая безразмерная величина, являющаяся коэффициентом пропорциональности между модулем максимальной силы трения покоя $F_{\text{тр.пок}}^{\max}$ и модулем силы N – нормального давления соприкасающихся поверхностей.

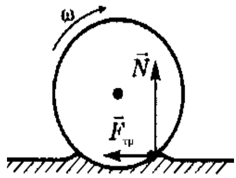
Коэффициент трения покоя μ_0 зависит от природы и качества обработки трущихся поверхностей и обычно не превышает единицы, причем чаще всего он оказывается больше коэффициента трения скольжения.

Если относительная скорость соприкасающихся тел, которые движутся поступательно, не равна нулю, имеет место трение скольжения. Эксперимент показывает, что силы трения скольжения зависят от природы вещества соприкасающихся поверхностей, степени их шероховатости, силы нормального давления и относительной скорости тел (незначительно).

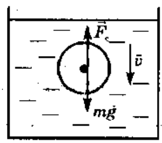
Сила трения скольжения всегда направлена в сторону, противоположную относительной скорости соприкасающихся тел, а ее модуль определяется выражением $F_{тр} = \mu N$, где μ – коэффициент трения скольжения – физическая безразмерная величина, являющаяся коэффициентом пропорциональности между модулем силы трения скольжения $\vec{F}_{тр}$ и модулем силы нормального давления N при относительном перемещении трущихся поверхностей.

Коэффициент трения скольжения практически не зависит от площади трущихся поверхностей, от относительной скорости их скольжения и обычно всегда меньше единицы.

В зависимости от значения коэффициента трения скольжения пары трущихся поверхностей делят на две группы: фрикционные пары, имеющие большой коэффициент трения скольжения ($\mu \succ 0{,}5$), и антифрикционные пары, имеющие малый коэффициент трения скольжения ($\mu \prec 0{,}2$). Примером фрикционной пары может служить пара резина – сухой асфальт (μ~0,8). Очень хорошей антифрикционной парой является пара сталь – лед (μ~0,015). При качении одного тела по поверхности другого возникает сила сопротивления движению, которую называют силой трения качения (см. рис.).



Характеристикой трения качения является коэффициент трения качения $\mu_к$, который представляет собой отношение модуля момента силы трения качения к модулю силы нормального давления N (имеет размерность длины). При качении без проскальзывания модуль силы трения качения $F_{тр.кач.} = \mu \frac{N}{R}$, где R – радиус тела, которое катится.



При движении те в жидких и газообразных средах возникает сила сопротивления движению, которую называют силой вязкого трения (см. рис.). При малых скоростях эта сила определяется выражением $\vec{F_c} = -\mu\vec{v}$, где μ_c – коэффициент вязкого трения.

! Коэффициент вязкого трения зависит от формы и размеров движущегося тела, от рода и состояния жидкости или газа.

2.6. Сила тяготения

Тяготение (гравитация) – универсальное взаимодействие между любыми материальными объектами. Если это взаимодействие относительно слабое и тела движутся с нерелятивистскими скоростями, то тяготение описывается теорией Ньютона. В случае сильных быстропеременных полей и быстрых движений тел тяготение описывается общей теорией относительности, созданной А. Эйнштейном.

Тяготение является самым слабым из 4 типов фундаментальных взаи-

модействий и в квантовой физике – описывается квантовой теорией гравитации, которая ещ е далека от завершения.

Гравитационное взаимодействие осуществляется посредством гравитационного поля.

Гравитационное поле (поле тяготения) – вид материи, посредством которого осуществляется гравитационное взаимодействие. Силовой характеристикой гравитационного поля является ускорение свободного падения, измеряемое отношением силы, с которой поле действует на помещенное в него тело, к массе этого тела ($\vec{g} = \frac{F_{гр}}{m}$).

Энергетической характеристикой гравитационного поля является гравитационный потенциал φ, измеряемый отношением потенциальной энергии тела, находящейся в данном поле, к массе этого тела ($\varphi = \frac{П}{m}$).

Любая материальная частица создает в пространстве гравитационное поле, действующее на другую частицу с силой, модуль и направление которой определяется по закону всемирного тяготения. Квантами гравитационного поля являются гипотетические частицы – гравитоны. Это взаимодействие является самым слабым и играет значительную роль только в случае больших масс.

Гравитационное взаимодействие универсально, оно существует между любыми материальными объектами, кроме того, гравитационные силы всегда являются силами притяжения, а их значения не зависят от того, в какой среде находятся взаимодействующие тела.

Закон всемирного тяготения сформулирован в 1665 году английским физиком Исааком Ньютоном (1642-1727) и выражает количественную связь между силой, с которой два тела притягивают друг друга, массами этих тел и расстоянием между ними.

Закон гласит: две любые материальные точки с массами m_1 и m_2 притягиваются по направлению друг к другу с силой $\vec{F}$, прямо пропорциональной произведению масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния *r* между ними.

Модуль силы тяготения $F_{гр} = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$, где $G = 6,6745(8) \cdot 10^{-11}\ \frac{Н \cdot м^2}{кг^2}$ – коэффициент пропорциональности, одинаковый для всех тел в природе, называемый **гравитационной постоянной**.

Гравитационная постоянная численно равна модулю силы, с которой взаимодействуют две материальные точки имеющие единичные массы и находящиеся на единичном расстоянии.

Числовое значение *G* было определено английским ученым Г. Кавендишем в 1798 году, измерившем в лаборатории силы притяжения между двумя шарами.

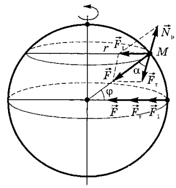
Согласно закону всемирного тяготения, силы тяготения зависят только от положения тел в данный момент времени, т. е. гравитационное взаимодействие распространяется мгновенно.

Если размерами взаимодействующих тел нельзя пренебречь, то для определения силы тяготения между ними необходимо разбить каждое из тел на такие малые объемы, которые можно было бы считать материальными точками. Для нахождения силы тяготения между телами необходимо найти все силы притяжения между этими «материальными точками» и векторно сложить их.

Расчеты показывают, что если тела представляют собой однородные шары, то формула для расчета модуля силы тяготения между ними будет такой же, как и для материальных точек, но в этом случае *r* – расстояние между центрами масс шаров.

2.7 Сила тяжести

Силой тяжести $\vec{F}_{\text{тяж}}$ называется сила, действующая на тело и сообщающая телу ускорение свободного падения $\vec{g}$. Любое тело, находящееся на поверхности Земли (вблизи нее), вращается вместе с Землей вокруг ее оси, т. е. движется по окружности, радиус которой $r = R\cos\varphi$, где R – радиус Земли, φ – широта места, в котором находится тело. Равнодействующая силы всемирного тяготения $\vec{F}$ и силы $\vec{N}_{\text{р}}$ воздействия поверхности Земли на это тело $\vec{F}_1 = \vec{F} + \vec{N}_{\text{р}}$ сообщают телу центростремительное ускорение, модуль которого $a_{\text{õñ}} = \omega^2 r$ (см. рис.), где ω – модуль угловой скорости вращения тела вокруг земной оси. Если силу тяготения $\vec{F}$ представить в виде суммы двух сил $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_{\text{тяж}}$ получим, что $F_1 = m\omega^2 r$, а $\vec{F}_{\text{тяж}} = \vec{N}_{\text{р}}$.



Следовательно, сила тяжести $\vec{F}_{\text{тяж}}$ является одной из составляющих действующей на это тело силы гравитационного притяжения к Земле $\vec{F}_{\text{тр}}$. Вторая составляющая силы тяготения сообщает телу центростремительное ускорение.

Направление силы тяжести является направлением вертикали в данном пункте земной поверхности, а перпендикулярная к этому направлению плоскость является горизонтальной плоскостью.

Вследствие относительно медленного суточного вращения Земли вокруг собственной оси, различие между силой $\vec{F}_{\text{гр}}$ гравитационного взаимодействия тела с Землей и силой тяжести $\vec{F}_{\text{тяж}} = m\vec{g}$ действующей на это тело очень мало и обычно не учитывается, т. е. $m\text{g} = \frac{mM}{r^2}$, где m – масса тела, M – масса Земли, *r* – расстояние между телом и центром Земли.

2.8. Движение тела под действием силы тяжести

2.8.1. Свободное падение тел

Свободным падением называется движение тела под действием только силы тяжести. В общем случае свободное падение является криволинейным движением.

Модуль ускорения свободного падения $g = \frac{F_{\text{тяж}}}{m} = G\frac{M}{r^2}$, где M – масса Земли, $r = R + h$ – расстояние между телом и центром Земли, h – высота тела над поверхностью Земли. Без учета вращения Земли вокруг собственной оси вектор $\vec{g}$ направлен к центру Земли. Фактически направление вектора $\vec{g}$ совпадает с направлением вертикали (к центру Земли этот вектор направлен только на полюсах и на экваторе).

Модель ускорения свободного падения вблизи поверхности Земли $g = \frac{GM}{R^2}$ изменяется от значения $g_1 = 9{,}83\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ на полюсах до $g_2 = 9{,}78\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ на экваторе и зависит от географической широты места и плотности геологических пород, которые залегают в данном месте земной коры.

Стандартное значение ускорения свободного падения на уровне Мирового океана $g_0 = 9{,}80665\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. По мере удаления от уровня океана, причем как вверх, так и вглубь Земли, ускорение свободного падения уменьшается. Это обусловлено изменением силы тяготения.

Если тело поднято на высоту h над поверхностью Земли, то $g = G\frac{mM}{(R_З+h)^2}$, т. е. ускорение свободного падения уменьшается по мере поднятия тела над поверхностью Земли и на бесконечно большом удалении от нее снижается до нуля.

По мере опускания в глубь Земли g линейно уменьшается и в ее центре обращается в нуль.

В данной точке поверхности Земли ускорение свободного падения одинаково для всех тел, независимо от их массы. Реально наблюдаемая кажущаяся зависимость условий падения тел от их массы связана с тем, что в атмосфере падение не является свободным. На него оказывают влияние силы вязкого трения со стороны воздуха, тормозящие падение.

Поскольку в данном месте земной поверхности модуль и направление ускорения свободного падения постоянны, то кинематические законы свободного падения имеют вид:

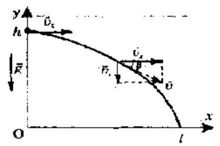
$$\begin{cases} \vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \vec{\upsilon}_0 t + \dfrac{\vec{g}t^2}{2}, \\ \vec{\upsilon}(t) = \vec{\upsilon}_0 + \vec{g}t, \\ \vec{g} = \overrightarrow{\text{const}} \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \Delta\vec{r} = \vec{\upsilon}_0 t + \dfrac{\vec{g}t^2}{2}, \\ \vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_0 + \vec{g}t, \\ \vec{g} = \overrightarrow{\text{const}}. \end{cases}$$

В проекциях на оси координат кинематические законы свободного падения имеют вид:

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + \upsilon_{0x}t + \dfrac{g_x t^2}{2}, \\ \upsilon_x = \upsilon_{0x} + g_x t, \end{cases} \quad \begin{cases} y(t) = y_0 + \upsilon_{0y}t + \dfrac{g_y t^2}{2}, \\ \upsilon_y = \upsilon_{0y} + g_y t, \end{cases} \quad \begin{cases} z(t) = z_0 + \upsilon_{0z} + \dfrac{g_z t^2}{2}, \\ \upsilon_z = \upsilon_{0z} + g_z t. \end{cases}$$

2.8.2. Движение тела, брошенного горизонтально

На тело, брошенное горизонтально со скоростью $\vec{v}_0$ в отсутствие силы сопротивления движению, действует только сила тяжести направленная вертикально вниз. В этом случае движение тела, брошенного горизонтально, является плоским (двухмерным) видом свободного падения. Перемещение тела



$$\begin{cases} \Delta\vec{r} = \vec{\upsilon}_0 t + \dfrac{\vec{g}t^2}{2} \end{cases}$$

Если тело движется в плоскости xOy (см. рис.), то координаты x и y тела в момент времени t: $x(t) = v_0 t$, $y = h - \frac{gt^2}{2}$.

Проекции скорости v_x и v_y в момент времени t: $v_x = v_0$, $v_y = -gt$.

Модуль скорости v в момент времени t: $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 + g^2t^2}$

Уравнение траектории движения: $y = h - \frac{g}{2v_0^2}x^2$

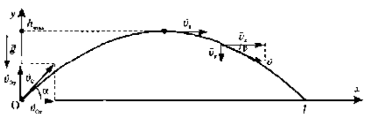
Промежуток времени полета тела: $t_{дв} = \sqrt{\frac{2h}{g}}$

Дальность полета тела: $l = v_0 t_{дв} = v_0\sqrt{\frac{2h}{g}}$

Тангенс угла β между скоростью $\vec{v}$ тела и горизонтом: $tg\beta = \left|\frac{v_y}{v_x}\right| = \frac{gt}{v_0}$

2.8.3. Движение тела, брошенного под углом к горизонту

Движение тела, брошенного под углом к горизонту, является плоским (двухмерным) видом свободного падения.



Перемещение тела: $\begin{cases} \Delta\vec{r} = \vec{\upsilon}_0 t + \dfrac{\vec{g}t^2}{2} \end{cases}$

Если тело движется в плоскости xOy (см. рис.), то в момент времени t: координаты x и y тела: $x(t) = (\upsilon_0 \cos\alpha)t$, $y = (\upsilon_0 \sin\alpha)t - \dfrac{gt^2}{2}$;

Уравнение траектории движения тела $y = (tg\alpha)\cdot x - \frac{g}{2v_0^2\cos^2\alpha}x^2$. Траектория движения тела представляет параболу.

Проекции скорости v_x и v_y тела на оси координат: $v_x = v_0\cos\alpha$, $v_y = v_0\sin\alpha - gt$. Модуль скорости v в момент времени t: $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} =$
$= \sqrt{v_0^2\cos^2\alpha + (v_0\sin\alpha - gt)^2}$.

Промежуток времени подъема тела на максимальную высоту: $t_п = \frac{v_0\sin\alpha}{g}$

(в наивысшей точке траектории проекция скорости υ_y = 0.)

Промежуток времени полета тела: $t_{дв} = \frac{2v_0 \sin\alpha}{g}$.

(промежуток времени *полета тела в два раза больше* **промежутка** *времени подъема тела на максимальную высоту.)*

Максимальная высота подъема: $h_{max} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{2g}$.

Дальность полета тела по горизонтали: $l = (v_0 \cos\alpha) t_{дв} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$.

(при заданной начальной скорости максимальная дальность полета достигается при угле бросания α= 45°).

Тангенс угла β между скоростью $\vec{v}$ тела и горизонтом: $tg\beta = \left|\frac{v_y}{v_x}\right| = \frac{|v_0 \sin\alpha - gt|}{v_0 \cos\alpha}$.

2.9. Вес тела

Вес $\vec{P}$ тела – сила, с которой любое тело, находящееся в поле силы тяготения, создаваемом каким-либо небесным телом, например, Землей, Солнцем и др., действует на опору или подвес, которые препятствуют свободному падению тела. Сила веса противоположна по направлению силе реакции опоры или подвеса. Модули этих сил согласно третьему закону Ньютона, равны. Поэтому для определения веса тела в конкретном случае необходимо определить силу реакции опоры (силу упругости подвеса), используя второй закон Ньютона.

В отличие от силы тяжести, обусловленной гравитационным взаимодействием и приложенной к телу, вес тела – это сила упругости, которая приложена к опоре (подвесу) и обусловлена электромагнитным взаимодействием.

В частном случае, когда опора (подвес) покоится или равномерно движется относительно какой-либо инерциальной системы отсчета, вес $\vec{P}$ тела по направлению совпадает с силой тяжести $\vec{F}_{тяж} = m\vec{g}$, а модули этих сил одинаковые, т. е. $P = mg$.

Если тело вместе с опорой движется с ускорением $\vec{a}$ относительно инерциальной системы отсчета (связанной, например, с поверхностью Земли), то

$$\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a}) . \; P = m(g \pm a) .$$

При движении тела по вертикали с ускорением $\vec{a} < \vec{g}$, направленным вниз, модуль веса тела $P = m(g - a)$ меньше чем модуль силы тяжести, действующей на это тело.

Невесомость – состояние движения механической системы (тело – опора, или тело – подвес), при котором действующее на систему внешнее поле тяготения не вызывает взаимного давления одной части системы на другую и их деформации. В состоянии *невесомости* вес тела равен нулю. При движении по вертикали это соответствует случаю, когда тело вместе с опорой движется вертикально вниз с ускорением $\vec{a} = \vec{g}$ (свободно падает).

Перегрузка – состояние движения тела, при котором его вес больше силы тяжести. При движении по вертикали это соответствует случаю, когда тело вместе с опорой движется с ускорением, направленным вверх. В этом случае $P = m(a+g)$ (см. табл. 6).

Основные сведения о силах, рассматриваемых в механике, и их особенностях приведены в табл. 6 и 7.

Таблица 6

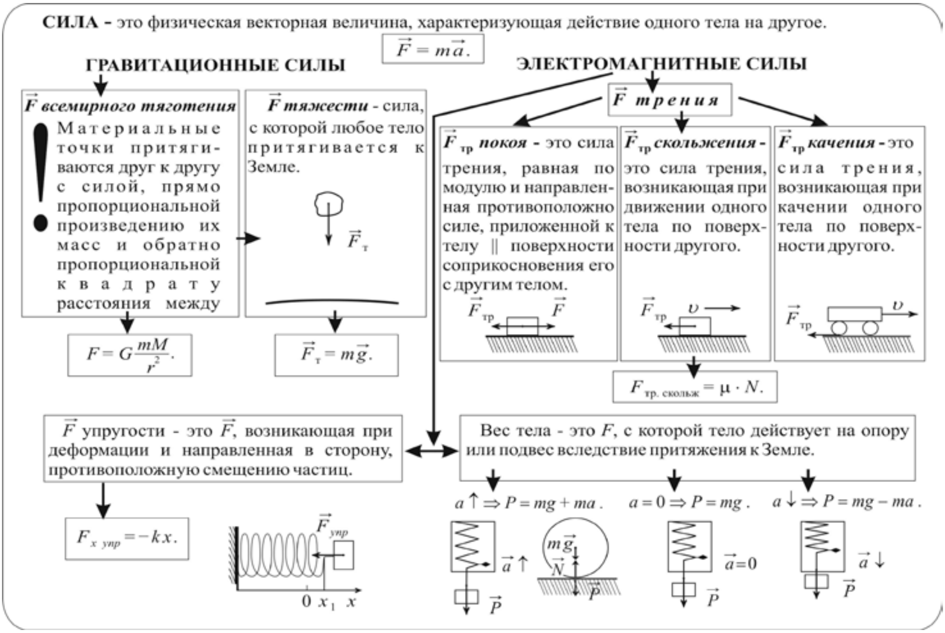


Таблица 7

Название силы	Природа силы	Формула	Направление	От чего зависит	Инвариантность относительно ИСО
Сила тяготения (тяжести)	Гравитационная	$F_T = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$ $F_T = mg$	Вдоль прямой, которая соединяет взаимодействующие материальные точки	$f(m_1 m_2, r)$	нет
Сила упругости	Электромагнитная	$\vec{F} = -k\Delta\vec{L}$ $F_x = -k\Delta x$	Противоположно направлению перемещения частиц при деформации	$f(x)$	нет
Сила трения а) сухого б) жидкого	Электромагнитная	$F_{тр} = \mu N$ $F_c = \alpha\upsilon$	Противоположно направлению $\vec{\upsilon}_{отн}$	$f(\upsilon_{отн})$	нет

		$F_c = \beta \upsilon^2$			

2.10. <u>Примеры решения задач</u>

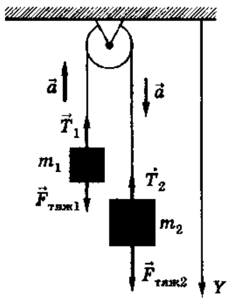
Задача 1. Две гири массами $m_1 = 2{,}0$ кг и $m_2 = 1{,}0$ кг подвешены на концах невесомой нерастяжимой нити, перекинутой через невесомый неподвижный блок. Каждая гиря прошла путь s = 0,45 м. Определите модули ускорения и скорости движения гирь в конце пути.

Д а н о:
$m_1 = 1{,}0$ кг,
$m_2 = 1{,}0$ кг,
$s = 0{,}45$ м,
$g = 10\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$

a – ?, υ – ?

Р е ш е н и е

Систему отсчета свяжем с поверхностью, Земли и будем считать ее инерциальной. Ось *OY* направим вертикально вниз в направлении движения гири массой m_2. Каждую из гирь будем считать материальной точкой. При таком выборе системы отсчета, ускорение $\vec{a}_2$ второй гири совпадает с направлением оси *Oy*, а направление ускорения $\vec{a_1}$ первой гири, противоположно направлению этой оси (см. рис.).



Количественными характеристиками воздействия на рассматриваемые тела со стороны внешних по отношению к ним тел и полей являются соответствующие этим воздействиям силы: направленные вертикально вверх силы $\vec{T_1}$ и $\vec{T_2}$ упругости, являющиеся количественными характеристиками воздействия на каждую гирю со стороны нити и силы тяжести $F_{тяж.1} = m_1\vec{g}$ и $F_{тяж.2} = m_2\vec{g}$ направленные вертикально вниз, и являющиеся количественными характеристиками воздействия на гири гравитационного поля Земли. Воздействие на гири со стороны воздуха не учитываем.

Согласно второму закону Ньютона: $m_1\vec{a}_1 = \vec{T}_1 + m_1\vec{g}$, $m_2\vec{a}_2 = \vec{T}_2 + m_2\vec{g}$.

Так как нить невесомая и нерастяжимая, то модуль силы $\vec{T}$ упругости во всех ее сечениях один и тот же, т. е. $T_1 = T_2 = T$, поэтому модули ускорений обеих гирь одинаковые, т. е. $a_1 = a_2 = a$. Проецируя с учетом этого векторы, изображающие соответствующие физические величины на ось *OY*, получим $m_1 a = -T + m_1 g$, $m_2 a = -T + m_2 g$. Откуда модули ускорения обеих гирь $a = \dfrac{g(m_2 - m_1)}{m_1 + m_2}$.

Подставив числовые значения физических величин и выполнив вычисления, получим $a = \frac{(1{,}5\ \text{кг} - 0{,}50\ \text{кг}) \cdot 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}}{1{,}5\ \text{кг} + 0{,}50\ \text{кг}} = 2{,}5\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

Модули мгновенных скоростей каждой гири во время движения одинаковые, а их направления противоположные. Поэтому для нахождения модуля скорости в конце пути примем во внимание, что вторая гиря движется с постоянным ускорением, без начальной скорости, в положительном направлении оси Oy, поэтому проекция ее ускорения $a_y = a$ а проекция перемещения равна пути, т. е. $\Delta r_{2y} = s_2 = s = \frac{a\Delta t^2}{2}$, откуда $a = \frac{2s}{\Delta t^2}$. Проекция скорости второй гири при движении с постоянным ускорением без начальной скорости $v_{2y} = a_{2y}, \Delta t = a\Delta t$.

Следовательно, модуль скорости второй гири в конце пути $v = \sqrt{2as}$.

Подставив числовые значения физических величин и выполнив вычисления, получим $v = \sqrt{2 \cdot 2{,}5\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 0{,}45\ \text{м}} = 1{,}5\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Ответ: $a_1 = a_2 = 2{,}5\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$; $v_1 = v_2 = 1{,}5\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Задача 2. Два тела массами $m_1 = m_2 = m = 0{,}2$ кг, на одном из которых лежит перегрузок массой $\Delta m = 0{,}05$ кг, связаны невесомой нерастяжимой нитью, переброшенной через недвижимый блок. Определите ускорение тел, силу давления перегруза на тело и силу давления на ось блока.

Дано:
$m_1 = m_2 = m = 0{,}2$ кг, $\Delta m = 0{,}05$кг
$a - ?\ F - ?\ F' - ?$

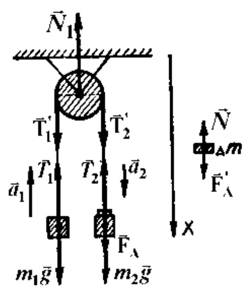
Решение

Систему отсчета свяжем с лабораторией и будем считать ее инерциальной. Начало координат выберем в точке, совпадающей с осью блока, ось OX направим вертикально вниз.

В качестве физических систем будем поочер едно рассматривать: первое тело, второе тело, перегрузок и блок. Причем, тела и перегрузок примем за материальные точки, а блок будем считать абсолютно твердым телом.

Взаимодействием с воздухом, массой блока, массой нити и ее деформацией, а также трением в оси блока, пренебрегаем.

Для решения задачи воспользуемся законами динамики (вторым законом Ньютона и законами для частных сил). На движущиеся тела m_1, m_2 и Δm воздействует гравитационное поле Земли, т. е. на них действуют силы тяжести $m_1\vec{g}$, $m_2\vec{g}$ и $\Delta m\vec{g}$, направленные вертикально вниз; воздействие нити на тела m_1 и m_2 дает силы упругости $\vec{T}_1$ и $\vec{T}_2$, направленные вертикально вверх; кроме того, на тело m_2 возаимодействует с перегрузком Δm, что дает силу давления перегрузка на это тело $\vec{F}$ и силу реакции $\vec{N}$, действующую со стороны этого тела на перегрузок (см. рис.).



Согласно второму закону Ньютона, для каждого из движущихся тел получим:

$$\begin{cases} m_1\vec{a}_1 = m_1\vec{g} + \vec{T}_1, \\ m_2\vec{a}_2 = m_2\vec{g} + \vec{T}_2 + \vec{F}, \\ \Delta m\vec{a}_2 = \Delta m\vec{g} + \vec{N}. \end{cases}$$

Если спроецировать векторы, изображающие физические величины, на ось OX, получим:

$$\begin{cases} -m_1a_1 = m_1g - T_1, \\ m_2a_2 = m_2g - T_2 + F, \\ \Delta ma_2 = \Delta mg - N. \end{cases}$$

Поскольку нить невесомая и нерастяжимая, то $T_1 = T_2 = T$ и $a_1 = a_2 = a$.

Согласно третьему закону Ньютона, $F = N$. По условию задачи $m_1 = m_2 = m$. С учетом этого динамические законы движения тел можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} ma = T - mg, \text{(первое тело)} \\ ma = mg - T + F, \text{(второе тело)} \\ \Delta ma = \Delta mg - N, \text{(перегрузок)} \\ F = N. \end{cases}$$

Если решить эту систему уравнений относительно неизвестных, получим: $a = \dfrac{\Delta mg}{2m + \Delta m}$; $F = \dfrac{2\Delta mmg}{2m + \Delta m}$; $T = \dfrac{2mg(\Delta m + m)}{2m + \Delta m}$.

Для нахождения модуля силы давления на ось блока рассмотрим силы, действующие на него. Взаимодействие блока с нитью да ет две силы упругости $\vec{T}_1'$ и $\vec{T}_2'$, направленные вертикально вниз. С уч етом невесомости и нерастяжимости нити $T_1' = T_2' = T = \dfrac{2mg(m + \Delta m)}{2m + \Delta m}$.

Кроме того, на блок действует сила реакции оси $\vec{N}'$, на которой этот блок закрепл ен. Таким образом $\vec{N}' + \vec{T}_1' + \vec{T}_2' = \vec{0}$, откуда $N = T_1' + T_2' = 2T$.

Согласно третьему закону Ньютона, модули силы давления F' на ось блока и силы реакции оси N' равны, т. е. $F' = \dfrac{4(m + \Delta m)mg}{2m + \Delta m}$.

Подставив числовые значения физических величин и выполнив вычисления, получим: $a = 1{,}1\dfrac{\text{м}}{\text{с}^2}$; $F = 0{,}44$ Н; $F' = 18{,}8$ Н.

Ответ: $a = 1{,}1\dfrac{\text{м}}{\text{с}^2}$; $F = 0{,}44$ Н; $F' = 18{,}8$ Н.

Задача 3. Пружина имеет жесткость $k = 150\,\frac{\text{Н}}{\text{м}}$. Какой будет жесткость системы из двух таких пружин, соединенных: а) последовательно; б) параллельно?

Д а н о:	**Р е ш е н и е**
$k_1 = k_2 = k = 150\ \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.	Из определения следует, что жесткость пружины численно равна модулю деформирующей силы, под действием которой абсолютное удлинение $k = \frac{F_{\text{упр}}}{\Delta l}$ равно единице.
$k_{\text{посл}}$ – ?, $k_{\text{пар}}$ – ?	

Для нахождения жесткости системы из двух пружин, соединенных последовательно, закрепим конец одной из двух соединенных пружин, а за свободный конец другой будем тянуть с силой, модуль которой F, направленной вдоль общей продольной оси обеих пружин.

Если пренебречь силой тяжести, действующей на пружины, то модули сил упругости, возникающих в каждой пружине, одинаковые и равны модулю деформирующей силы, т. е. $F_{\text{упр}} = k_1\Delta l_1 = k_2\Delta l_2$.

С учетом этого $\Delta l_1 = \frac{F_{\text{упр}}}{k_1}$ и $\Delta l_2 = \frac{F_{\text{упр}}}{k_2}$.

Под действием той же деформирующей силы, абсолютное удлинение пружины, заменяющей систему из двух пружин, $\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2 = \frac{F_{1\text{упр}}k_2 + F_{2\text{упр}}k_1}{k_1k_2} = \frac{F_{\text{упр}}(k_1 + k_2)}{k_1k_2}$. С учетом этого $k_{\text{посл}} = \frac{k_1k_2}{k_1 + k_2}$. Поскольку $k_1 = k_2 = k$, то $k_{\text{посл}} = \frac{k}{2}$.

Для нахождения жесткости системы из двух пружин, соединенных параллельно, закрепим одни концы обеих пружин, а за другие их концы будем тянуть с силой $\vec{F}$, направленной вдоль продольных осей этих пружин так, чтобы абсолютное удлинение каждой из пружин составило Δl.

Так как жесткости пружин различны, то силы упругости $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, возникающие в каждой из них, также разные. В состоянии равновесия $F_{\text{упр}} = F_{1\text{упр}} + F_{2\text{упр}}$, где $F_{\text{упр}} = k\Delta l$, $F_{1\text{упр}} = k_1\Delta l$ и $F_{2\text{упр}} = k_2\Delta l$. Следовательно, жесткость системы, состоящей из двух пружин, соединенных параллельно $k_{\text{пар}} = \frac{F}{x} = \frac{k_1\Delta l + k_2\Delta l}{\Delta l} = k_1 + k_2$.

Поскольку $k_1 = k_2 = k$, то $k_{\text{пар}} = 2k$.

Ответ: $k_{\text{посл}} = 75\ \frac{\text{Н}}{\text{м}}$; $k_{\text{пар}} = 300\ \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

Задача 4. На горизонтальном прямолинейном участке шоссе автомобиль, модуль скорости которого $v_0 = 72\frac{\text{км}}{\text{ч}}$, тормозит до остановки. Определите тормозной путь автомобиля и промежуток времени, в течение которого длилось торможение, если коэффициент трения $\mu = 0{,}50$.

Д а н о:

$\upsilon_0 = 72\ \frac{\text{км}}{\text{ч}} = \ 20\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$,

$\upsilon = 0$,

$\mu = 0{,}50$,

$g = 10\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

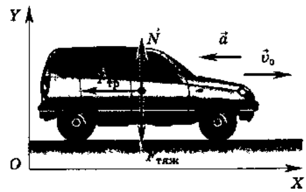
$\Delta t = ?\ \ s = ?$

Р е ш е н и е

Систему отсч ета свяжем с поверхностью Земли и будем считать е е инерциальной. Начало координат выберем в точке, совпадающей с положением центра масс автомобиля в момент времени $t_0 = 0$, что соответствует скорости $\upsilon_0 = \upsilon_1 = 20\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, ось OX направим вдоль движения, ось Oy – вертикально вверх.

Допустим, что автомобиль можно принять за материальную точку. Дорога, воздух и гравитационное поле Земли по отношению к автомобилю являются внешними объектами. Воздействие внешних объектов на автомобиль можно описать, введя соответствующие силы. Дорогу будем считать абсолютно тв ердым телом (ее деформацией под действием автомобиля пренебрегаем, но упругие силы, возникающие при взаимодействии, необходимо учесть). На всем протяжении движения гравитационое поле Земли будем считать однородным и примем $g = 10\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. Выталкивающую силу и силу сопротивления, действующие на автомобиль со стороны воздуха, зависимость коэффициента трения от скорости движения автомобиля, а также нагревание тел во время движения целесообразно не учитывать.

Анализ физической ситуации показвает, что на автомобиль действуют: сила тяжести $\vec{F}_{\text{тяж}} = m\vec{g}$, направленная вертикально вниз и обусловленная возодействием гравитационного поля Земли; сила нормальной реакции дороги $\vec{N}$, направленная вертикально вверх, и сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$, направленная в сторону, противоположную движению, обусловленые воздействием покрытия дороги (см. рис.).



Согласно второму закону Ньютона: $m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр}}$. Если спроецировать векторные величины на оси OX и OY, получим $-ma = -F_{\text{тр}}$ и $0 = N - mg$, т. е. $N = mg$. Поскольку $F_{\text{тр}} = \mu N = \mu mg$, то $ma = F_{\text{тр}} = \mu mg$. Откуда $a = \mu g$. Поскольку $a = const$, то движение автомобиля является равноускоренным. Поэтому кинематические законы его движения имеют вид:

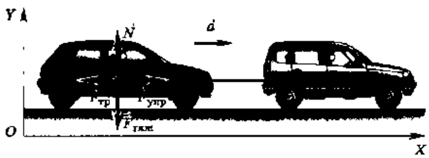
$\begin{cases} \Delta\vec{r} = \vec{\upsilon}_0 t + \dfrac{\vec{a}\Delta t^2}{2} \\ \vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_0 + \vec{a}\Delta t \end{cases}$, или в скалярной форме $\begin{cases} x = \upsilon_0\Delta t - \dfrac{a\Delta t^2}{2} \\ \upsilon = \upsilon_0 - a\Delta t. \end{cases}$. С уч етом того, что $a = \mu g$, $\upsilon = 0$, получим: $0 = \upsilon_0 - \mu g\Delta t$. Откуда продолжительность торможения автомобиля $\Delta t = \dfrac{\upsilon_0}{\mu g}$. Тормозной путь автомобиля $s = \upsilon_0 \dfrac{\upsilon_0}{\mu g} = \dfrac{\mu g}{2} \cdot \left(\dfrac{\upsilon_0}{\mu g} \right)^2 = \dfrac{\upsilon_0^2}{2\mu g}$.

$$\Delta t = \frac{20 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{0{,}50 \cdot 10 \ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = 4{,}0 \text{ с}. \quad s = \frac{\left(20 \frac{\text{м}}{\text{с}} \right)^2}{2 \cdot 0{,}50 \cdot 10 \ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = 40 \text{ м}.$$

Ответ: $\Delta t = 4{,}0$ с; $s = 40$ м.

Задача 5. Определите абсолютное удлинение троса жесткостью $k = 75 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$ при буксировке легкового автомобиля массой $m = 1{,}0$ т, с ускорением, модуль которого $a = 1{,}0 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ если коэффициент сопротивления движению $\mu = 0{,}20$.

Д а н о:	**Р е ш е н и е**
$k = 75 \dfrac{\text{кН}}{\text{м}} = 7{,}5 \cdot 10^4 \dfrac{\text{Н}}{\text{м}}$, $m = 1{,}0 \text{ т} = 1{,}0 \cdot 10^3 \text{кг}$, $a = 1{,}0 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$, μ = 0,20. $\Delta l = ?$	Систему отсч ета свяжем с поверхностью Земли и будем считать ее инерциальной. Начало координат выберем в точке, совпадающей с положением центра масс автомобиля в момент времени $t_0 = 0$, ось *Ox* направим вдоль движения, ось *Oy* – вертикально вверх. Анализ физической ситуации показвает, что на автомобиль действуют: сила тяжести $\vec{F}_{\text{тяж}} = m\vec{g}$, направленная вертикально вниз и обусловленная возодействием гравитационного поля Земли; сила нормальной реакции дороги $\vec{N}$, направленная вертикально



вверх, сила упругости троса $\vec{F}_{\text{упр}}$ и сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$, направленная в сторону, противоположную движению, обусловленые воздействием покрытия дороги (см. рис.).

Согласно второму закону Ньютона: $m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{упр}} + \vec{F}_{\text{тр}}$. Если спроецировать векторные величины на оси *OX* и *OУ*, получим $ma = F_{\text{упр}} - F_{\text{тр}}$ и $0 = N - mg$, т. е. $N = mg$. Поскольку $F_{\text{тр}} = \mu N = \mu mg$, а $F_{\text{упр}} = k\Delta l$, то $ma = k\Delta l - \mu mg$. Откуда $\Delta l = \dfrac{m(a + \mu g)}{k}$.

$$\Delta l = \frac{1{,}0 \cdot 10^3 \text{кг}(1{,}0 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} + 0{,}20 \cdot 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2})}{7{,}5 \cdot 10^4 \ \frac{\text{Н}}{\text{м}}} = 4{,}0 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 4{,}0 \text{ мм}.$$

Ответ: $\Delta l = 4{,}0$ мм.

Задача 6. На краю диска радиусом $R = 40$ см, вращающегося равномерно с частотой $\nu = 0{,}5$ с$^{-1}$, лежит шайба. Определите минимальный коэффициент трения шайбы о диск, при котором шайба еще не соскальзывает с диска.

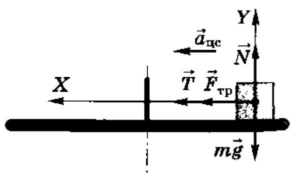
Д а н о:
$R = 40$ см = 0,40 м,
$\nu = 0{,}5$ с$^{-1}$.

μ – ?

Р е ш е н и е

Систему отсч ета свяжем с осью вращения диска, предполагая, что она находится в состоянии покоя относительно поверхности Земли и будем считать е е инерциальной.

Начало координат выберем в точке, совпадающей с положением центра масс шайбы, ось *Ox* направим вдоль радиуса к центру окружности, ось *OY* – вертикально вверх. Шайбу примем за материальную точку. Для решения задачи применим законы кинематики движения материальной точки по окружности с постоянной по модулю скоростью и законы динамики. Анализ физической ситуации показвает, что на шайбу действуют: сила тяжести $m\vec{g}$, направленная вертикально вниз и обусловленная воздействием на нее гравитационного поля Земли; сила $\vec{N}$ нормальной реакции диска, направленная вертикально вверх, и сила трения покоя $\vec{F}_{\text{тр. п}}$, направленная вдоль радиуса к центру окружности в каждой точке траектории, обусловленые воздействием на шайбу со стороны диска (см. рис.).



В инерциальной системе отсчета, связанной с неподвижной относительно поверхности Земли осью вращения диска, шайба вращается с центростремительным ускорением модуль которого $a_{\text{цс.}} = 4\pi^2\nu^2 R$. По второму закону Ньютона $m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр.п}}$. По условию шайба «удерживается» на наибольшем расстоянии от оси вращения, т. е. находится на грани скольжения, поэтому сила трения покоя максимальна, а ее модуль $F_{\text{тр.п}} = F_{\text{тр.п}}^{\max} = \mu N$. Проецируя векторы, изображающие силы на оси *OX* и *OY*, получим $ma = F_{\text{тр.п}}^{\max}$ и $N - mg = 0$. Из этих уравнений следует, что сила трения покоя направлена к центру вращения, т. е. $\vec{F}_{\text{тр. п.}} \uparrow\uparrow \vec{a}_{\text{цс.}}$, а ее модуль $F_{\text{тр.п}} = F_{\text{тр.п}}^{\max} = \mu mg$. Откуда $\mu = \frac{F_{\text{тр.п}}^{\max}}{mg} = \frac{ma}{mg} = \frac{4\pi^2\nu^2 R}{g}$.

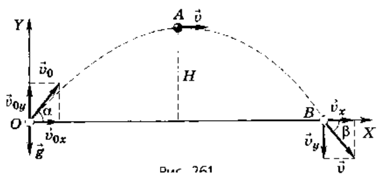
После подстановки числовых значений получим $\mu = 0,4$.

Ответ: $\mu_{\min} = 0,4$.

Задача 7. Тело брошено с поверхности Земли под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту с начальной скоростью, модуль которой равен $\upsilon_0 = 20\frac{\text{м}}{\text{с}}$. Определите максимальную высоту подъема h, дальность полета по горизонтали l и модуль скорости тела в момент его падения на поверхность Земли.

Дано:	**Решение**
$\alpha = 30^\circ$, $\upsilon_0 = 20\frac{\text{м}}{\text{с}}$.	Кинематические законы движения тела, брошенного под углом к горизонту, которое будем считать материальной точкой, без учета взаимодействия с воздухом, имеют вид: $\begin{cases} \Delta\vec{r} = \overrightarrow{v_0} + \frac{\vec{g}t^2}{2} \\ \vec{v} = \overrightarrow{v_0} + \vec{g}t \end{cases}$.
$h = ?$, l – ?	Систему отсчета свяжем с поверхностью Земли,

ось *OX* направим горизонтально, ось *OУ* – вертикально вверх, начало координат выберем в точке бросания, а отсчет времени начнем в момент бросания (см рис.).



Тогда проекции скорости тела на оси координат: $\upsilon_x = \upsilon_0 \cos\alpha$ $\upsilon_y = \upsilon_0 \sin\alpha - gt$, а проекции перемещения равны его координатам в момент времени t, т. е. $x = (\upsilon_0 \cos\alpha)t$, $y = (v_0 \sin\alpha)t - \frac{gt^2}{2}$.

В верхней точке траектории $v_y = v_0 \sin\alpha - gt_{\text{п}} = 0$, $y = h_{max} = (v_0 \sin\alpha)\, t_{\text{п}} - \frac{gt_{\text{п}}^2}{2}$, где $t_{\text{п}}$– промежуток времени, в течение которого тело поднималось на максимальную высоту. Следовательно, $t_{\text{п}} = \frac{v_0 \sin\alpha}{g}$. Тогда $h_{max} = \frac{v_0^2 \sin^2\alpha}{2g}$.

В момент падения на поверхность Земли (точка B на рис.), координаты тела: $x=l$, $y = 0$. С учетом этого $l = v_0 t_{\text{дв}} \cos\alpha$, $(v_0 \sin\alpha)t_{\text{дв}} - \frac{gt_{\text{дв}}^2}{2} = 0$. Откуда $t_{\text{дв}} = \frac{2v_0 \sin\alpha}{g}$. Следовательно, дальность полета тела по горизонтали

$$l = v_0 \cos\alpha \left(\frac{2v_0 \sin\alpha}{g}\right) == \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

Модуль скорости тела в момент падения $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$. Если учесть, что в этот момент времени $\upsilon_x = \upsilon_0 \cos\alpha$, а $\upsilon_y = \upsilon_0 \sin\alpha - gt_{\text{дв}} = \upsilon_0 \sin\alpha - g\frac{\upsilon_0 \sin\alpha}{2g} = -\upsilon_0 \sin\alpha$, получим $v = \sqrt{v_0^2}$ $\upsilon = \sqrt{\upsilon_0^2\left(\sin^2\alpha + \cos^2\alpha\right)} = \upsilon_0$.

Численно $h_{max} = \frac{(20\,\frac{\text{м}}{\text{с}})^2\cdot\frac{1}{4}}{2\cdot 10\frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = 5{,}0$ м, $l = \frac{(20\,\frac{\text{м}}{\text{с}})^2\cdot\frac{\sqrt{3}}{2}}{10\frac{\text{м}}{c}} = 34{,}6$ м $= 35$ м.

Ответ: $h_{\max} = 5{,}0$ м. $l = 35$ м., $\upsilon = 20\frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Задача 8. Тело брошено под углом $\alpha = 60^{\circ}$ к горизонту со скоростью, модуль которой $v_0 = 10\,\frac{\text{м}}{\text{с}}$. Определите угол β, под которым тело будет видно из точки броска за промежуток времени $\Delta t = 1{,}0$ с до момента падения

Дано:
$\alpha = 60^{\circ}$,
$\upsilon_0 = 10\frac{\text{м}}{\text{с}}$,
$\Delta t = 1{,}0$ с.

$F_{\text{тр}} = ?$

Решение

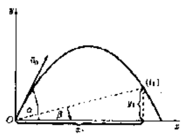
Кинематические законы движения тела, брошенного под углом к горизонту, которое будем считать материальной точкой, без учета взаимодействия с воздухом, имеют вид: вид: $\begin{cases} \Delta\vec{r} = \vec{\upsilon}_0 t + \dfrac{\vec{g}t^2}{2}. \\ \vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_0 + \vec{g}t \end{cases}$

Систему отсчета свяжем с поверхностью Земли, ось OX направим горизонтально, ось $OУ$ – вертикально вверх, начало координат выберем в точке бросания, а отсчет времени начнем в момент бросания (см рис.).

Тогда проекции скорости тела на оси координат: $v_x = v_0\cos\alpha$, $v_y = v_0\sin\alpha - \text{g}t$, а проекции перемещения равны его координатам в момент времени t, т. е. $x = (v_0\cos\alpha)t$, $y = (v_0\cos\alpha)t - \frac{\text{g}t^2}{2}$.

Координаты искомой точки траектории $x_1 = (v_0\cos\alpha)t_1 = (v_0 cos\alpha)(t_{\text{дв}} - \Delta t)$.

$y_1 = (\upsilon_0\sin\alpha)t_1 - \dfrac{gt_1^2}{2} = (\upsilon_0\sin\alpha)(t_{\text{дв}} - \Delta t) - \dfrac{g(t_{\text{дв}} - \Delta t)^2}{2}$, где $t_1 = t_{\text{дв}} - \Delta t$– промежуток времени, через который тело попало искомую точку траектории.



Если учесть, что в момент падения на поверхность Земли y_1 = 0, получим $(\upsilon_0\sin\alpha)t_{\text{дв}} - \dfrac{gt_{\text{дв}}^2}{2} = 0$. Откуда $t_{\text{дв}} = \dfrac{2\upsilon_0\sin\alpha}{g}$. Из рисунка видно, что $tg\beta = \frac{y_1}{x_1} =$

$\frac{v_0\sin\alpha\cdot t_1 - \frac{gt_1^2}{2}}{v_0\cos\alpha\cdot t_1}$, т. е. $tg\beta = tg\alpha - \frac{g}{2v_0\cos\alpha}\left(\frac{2v_0\sin\alpha}{g} - \Delta t\right) = \frac{g\Delta t}{2v_0\cos\alpha}$.

Численно $\text{tg}\beta = \frac{10\frac{\text{м}}{\text{с}^2}\cdot 1{,}0\text{с}}{2\cdot 10\frac{\text{м}}{\text{с}}\cdot\frac{1}{2}} = 1$. Следовательно, $\beta = 45^{\circ}$.

Ответ: $\beta = 45^{\circ}$.

Задача 9. Определите ускорение, вызванное силой тяготения, на высоте

$h = 2R_З$ от поверхности Земли, если на поверхности Земли $g = 9{,}81\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

Д а н о:	**Р е ш е н и е**
$h = 2R_З$, $g = 9{,}81\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$	Согласно закону всемирного тяготения, модуль силы притяжения тела массой m, которое можно считать материальной точкой, к Земле $F = G\frac{mM}{r^2}$, где G –
g' – ?	гравитационная постоянная, M – масса Земли, r – расстояние между центром Земли и телом.

Если тело поднято на высоту h над поверхностью Земли, то $F = G\frac{mM}{(R+h)^2}$, где R – радиус Земли. Поскольку модуль силы тяжести mg, действующей на тело массой m, в гравитационном поле Земли незначительно отличается от модуля силы всемирного тяготения между телом и Землей, то этим различием можно пренебречь. Тогда $mg = G\frac{mM}{(R+h)^2}$. Откуда ускорение, вызванное силой тяготения, $g' = G\frac{M}{\left(R_З + h\right)^2}$. По условию задачи $h = 2R_З$, поэтому $g' = G\frac{M}{\left(R + 2R\right)^2} = G\frac{M}{9R^2} = \frac{g}{9}$. Следовательно, $g' = \frac{1}{9}\cdot 9{,}81\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 1{,}09\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

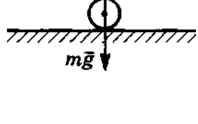
Ответ: $g' = 1{,}09\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

Задача 10. В кабине подъемника лежит груз. Когда кабина неподвижна, вес груза P = 2,0 кН. В движущейся с постоянным ускорением кабине вес груза больше на $\Delta P =$ 200 Н. Определите модуль и направление ускорения кабины подъемника.

Д а н о:	**Р е ш е н и е**
$P = 2{,}0$ кН$=2{,}0\cdot 10^3$Н, $\Delta P = 200$ Н.	Систему отсч ета свяжем с поверхностью Земли и будем считать е е инерциальной. Начало координат выберем в центре груза, который
a –?	можно принять за материальную точку, ось OY

направим вертикально вверх. Пол кабины подъемника, гравитационное поле Земли и воздух по отношению к грузу являются внешними объектами.

Воздействие внешних объектов на груз можно описать, введя соответствующие силы.



Если пренебречь воздействием воздуха, то на груз действуют: сила тяжести $m\vec{g}$, направленная вертикально вниз и обусловленная воздействием гравитационного поля Земли; сила нормальной реакции пола кабины $\vec{N}$, направленная вертикально вверх, обусловленые воздействием пола на груз (см. рис.).

Согласно второму закону Ньютона: $m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N}$. По третьему закону Ньютона модуль силы нормальной реакции пола равен модулю силы веса груза, а направления этих сил противоположные, т. е. $\vec{N} = -\vec{P}'$. Следовательно, $m\vec{a} = m\vec{g} - \vec{P}'$.

Если спроецировать векторные величины на ось Oy , получим $ma_y = P' - m\text{g}$. Когда кабина подъемника неподвижна, то $a_y = 0$, т. е. $P' - m\text{g} = 0$ и модуль силы веса груза равен модулю силы тяжести $P' = P = m\text{g}$, откуда масса груза $m = \frac{P}{\text{g}}$.

В движущейся с постоянным ускорением кабине модуль силы веса груза $P' = P + \Delta P$. Поэтому $ma_y = P' - m\text{g} = P + \Delta P - P = \Delta P$. Следовательно, $ma_y = \frac{P}{g} a_y = \Delta P$, откуда искомая проекция ускорения $a_y = \frac{\Delta P \text{g}}{P}$.

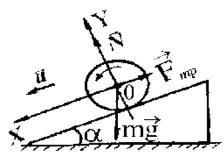
Подставив значения физических величин в формулу для расчета a_y, получим $a_y = \frac{200\ \text{Н} \cdot 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{2\ 000\ \text{Н}} = 1{,}0 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. Поскольку проекция ускорения на ось Oy, направленную вертикально вверх, положительна, то ускорение кабины подъемника направлено вверх, а его модуль $a = 1{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

Ответ: ускорение кабины подъемника направлено вертикально вверх, а его модуль $a = 1{,}0 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

Задача 11. Сплошной цилиндр радиусом R и массой m скатывается по наклонной плоскости, которая образует угол α с горизонтом. Определите ускорение центра масс цилиндра и коэффициент трения качения.

Д а н о:	**Р е ш е н и е**
R, m, α.	Инерциальную систему отсчета свяжем с поверхностью Земли. Начало координат выберем в точке, совпадающей с центром масс цилиндра, сь OX направим параллельно наклонной плоскости в сторону
a = ? λ = ?	

движения, ось OY – перпендикулярно ей, ось OZ – перпендикулярно плоскости рисунка.



На движущийся цилиндр в выбранной системе отсчета действуют сила тяжести $m\vec{g}$, направленная вертикально вниз и обусловленная его взаимодействием с гравитационным полем Земли; сила реакции плоскости $\vec{N}$, направленная перпендикулярно к ней, и сила трения качения $\vec{F}_{\text{тр}}$ обусловленные взаимодействием цилиндра, а с наклонной плоскостью (см. рис.).

Динамический закон поступательного движения центра масс цилиндра имеет вид $m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{N}$.

Уравнение вращательного движения цилиндра относительно оси, проходящей через начало координат, имеет такой вид:

$$\vec{M}_0\left(\vec{F}_{\text{тр}}\right)+\vec{M}_0\left(m\vec{g}\right)+\vec{M}_0\left(\vec{N}\right)=I\vec{\varepsilon}\cdot$$

Если спроецировать векторные величины, входящие в первое уравнение, на оси OX и OY, а входящие в третье, на ось OZ, получим:

$$\begin{cases} ma = mg\sin\alpha - F_{\text{тр}}, \\ 0 = N - mg\cos\alpha, \\ F_{\text{тр}}R = I\varepsilon. \end{cases}$$

С учетом того, что $F_{\text{тр}} = \frac{kN}{R}$, $I=\frac{1}{2}mR^2$ и $\varepsilon=\frac{a}{R}$, получим:

$$\begin{cases} ma = mg\sin\alpha - F_{\text{тр}}, & I=\frac{1}{2}mR^2, \\ N = mg\cos\alpha, & F_{\text{тр}}=\frac{\lambda N}{R}, \\ F_{\text{тр}}R = I\varepsilon; & \varepsilon = a/R. \end{cases}$$

Решение последней системы относительно a и λ дает:

$$a=\frac{2}{3}g\sin\alpha,\ \lambda=\frac{1}{3}R\,\mathrm{tg}\,\alpha\cdot$$

Ответ: $a=\frac{2}{3}g\sin\alpha,\ \lambda=\frac{1}{3}R\,\mathrm{tg}\,\alpha$**.**

Задача 12. Определите приливную силу трения, действующую на Землю, если известно, что за 100 лет продолжительность суток возрастает на 1мс.

Д а н о:
$R=6400$ км,
$\rho=5{,}5\cdot10^3\,\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$,
$\Delta t=100$ лет,
$\Delta T=1{,}0\cdot10^{-3}$с.

$F_{\text{тр}}=?$

Р е ш е н и е

Инерциальную систему отсчета свяжем с центром Земли, начало координат выберем в точке, совпадающей с центром Земли, ось OZ направим вдоль оси вращения Земли. В качестве физической системы рассмотрим Землю, причем будем считать ее абсолютно твердым однородным шаром. Допустим, что изменение продолжительности суток вызвано только действием приливных сил трения, которые обусловлены взаимодействием Земли с Луной. Кроме того, будем считать, что эти силы направлены вдоль экватора. Поскольку выделенная физическая система незамкнута, ее можно описать законами динамики вращательного движения.

В соответствии с основным уравнением динамики вращательного движения получим: $I\Delta\vec{\omega}=\vec{M}_0\left(\vec{F}_{\text{тр}}\right)\Delta t$ или в скалярной форме $I\Delta\omega=F_{\text{тр}}R\Delta t$, где R – радиус Земли.

С учетом того, что момент инерции Земли $I = \frac{2}{5}MR^2$, ее масса $M = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho$, а изменение угловой скорости вращения Земли вокруг собственной оси $\Delta\omega = \frac{2\pi}{T} - \frac{2\pi}{T-\Delta T} \approx \frac{2\pi\Delta T}{T^2}$ (поскольку $\Delta T << T$, где T – период вращения Земли вокруг оси, $T = 24$ часа), получим окончательно:

$$F_{\text{тр}} \approx \frac{16\pi^2 R^4 \rho \Delta T}{15 T^2 \Delta t}.$$

Численно: $F_{\text{тр}} = 6$ ГН.

Ответ: $F_{\text{тр}} = 6$ ГН.

2.11. Задания для самостоятельной работы

2.11.1. Вопросы

1. Какое физическое явление наблюдается при вымолачивании зерна барабаном комбайна?

2. Почему после встряхивания неполного ведра с картофелем крупные плоды оказываются наверху?

3. Как объяснить опускание столбика ртути медицинского термометра при его встряхивании?

4. В каком случае резец токарного станка деформируется больше, когда он выдвинут из суппорта на большую или меньшую длину?

5. Чем объяснить, что при буксовании колес тепловоза или автомобиля сила тяги значительно падает?

6. Чем крупнее дробь, тем дальше она летит при выстреле. Почему?

7. Каким образом некоторые бобовые растения используют свойства инерции для разбрасывания своих семян?

8. Почему при прополке не следует слишком резко выдергивать сорняки из земли даже в том случае, когда они слабо удерживаются в почве?

9. Какие физические законы используются при сортировке зерен веялкой?

10. Во время урагана сосны ломаются гораздо чаще, чем ели. Назовите одну из главных причин этого явления.

11. Почему мелкие рыбы движутся стаями?

12. Чем объясняется движение ледников в горах?

13. Почему телеграфные и телефонные провода при подвешивании не натягивают туго?

14. Почему при выстреле пуля оставляет в стекле отверстие, а брошенная рукой разбивает его на куски?

15. Почему в течение суток бывают два прилива и два отлива в одной и той же географической точке земного шара?

16. Почему наиболее сильные приливы в морях и океанах бывают в полнолуние и новолуние?

17. По сухой или мокрой дороге больше сила тяги автомобиля?

18. Почему при резком торможении передняя часть автомобиля опускается вниз?

19. Почему корнеплоды (свекла, морковь и др.) из черноземной и песчаной почв выдергиваются легко, а из влажной глинистой тяжело?

20. Назовите экспериментальные методы определения гравитационной постоянной G? Каков ее физический смысл?

21. Что такое вес тела? В чем отличие веса тела от силы тяжести?

22. Как объяснить возникновение невесомости при свободном падении?

23. Какое поле тяготения называется однородным? Центральным?

24. Какие траектории движения имеют спутники, получившие первую и вторую космические скорости?

25. Как вычисляются первая и вторая космические скорости?

26. Что такое силы инерции? Чем они отличаются от сил, действующих в инерциальных системах отсчета?

27. Для очистки воздуха используются инерционные газовые фильтры, в которых происходит резкое изменение направление движения воздушного потока. Объясните принцип работы такого устройства.

28. Как направлена центробежная сила инерции? Когда она проявляется? От чего зависит?

29. В северном полушарии производится выстрел вдоль меридиана на север. Как скажется на движении снаряда суточное вращение Земли?

30. Почему на железной дороге один рельс истирается изнутри заметно больше другого: в северном полушарии – правый, в южном – левый?

2.11.2. Задачи

1. Тело массой $m = 200$ г падает вертикально вниз с ускорением, модуль которого $a = 8{,}0\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. Определите среднее значение силы $\langle F_{\text{с}} \rangle$ сопротивления воздуха.

2. Как изменится тормозной путь автомобиля при увеличении модуля его скорости в два раза, если сопротивление движению считать постоянным?

3. На материальную точку массой $m = 1{,}0$ кг действуют две постоянные взаимно перпендикулярные силы. Модули ускорения, сообщаемые точке каждой силой в отдельности, $a_1 = 3{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ и $a_2 = 4{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. Определите модуль результирующей силы F, действующей на материальную точку.

4. К невесомой нерастяжимой нити подвешен груз массой $m = 1{,}0$ кг. Точка подвеса нити движется равноускоренно вниз с ускорением, модуль которого $a = 4{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. Определите модуль силы $F_{\text{н}}$ натяжения нити.

5. Шар массой $m = 400$ г равномерно вращают в вертикальной плоскости на невесомой нерастяжимой нити длиной $l = 80$ см с линейной скоростью, модуль которой $\upsilon = 3{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Определите разность модулей силы $\Delta F_{\text{н}}$ натяжения нити в нижней и верхней точках траектории.

6. На одну секцию тепловоза ТЭ 3 массой $m = 126$ т действует тормозящая сила, модуль которой $F_{с} = 126$ кН. Определите модуль скорости тепловоза в начале торможения, если его тормозной путь $s = 50$ м.

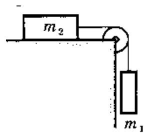
7. Под действием постоянной силы $\vec{F}$, направленной под углом α к горизонту (вверх, вниз), брусок массой m движется равномерно по горизонтальной поверхности. Определите модуль этой силы, если коэффициент трения скольжения μ.

8. Поезд, состоящий из 5 одинаковых вагонов, равномерно движется по горизонтальному участку железной дороги под действием силы тяги, модуль которой $F = 1{,}0$ кН, развиваемой тепловозом. Определите модуль силы $F_{н}$ натяжения сцепки между третьим и четвертым вагонами.

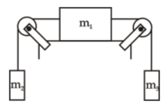
9. Под действием силы, модуль которой $F = 1{,}5$ кН, направленной вдоль наклонной плоскости, образующей угол α=30° с горизонтом, тело массой $m = 200$ кг равномерно поднимается вверх по плоскости. Определите модуль ускорения a, с которым тело будет соскальзывать с наклонной плоскости, если его отпустить?

10. Веревка выдерживает груз массой $m_1 = 80$ кг при вертикальном подъеме с некоторым ускорением и груз $m_1 = 120$ кг при движении вниз, с ускорением, модуль которого такой же. Определите максимальное значение массы $m_{\max}$ груза при его равномерном подъеме на этой веревке.

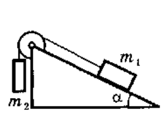
11. Две невесомые пружины соединили последовательно и растянули. При этом удлинение пружины жесткостью $k_1 = 0{,}10\ \frac{кН}{м}$ составило $\Delta l_1 = 2{,}0$ см. Определите абсолютную деформацию Δl_2 второй пружины, если ее жесткость $k_2 = 0{,}50\ \frac{кН}{м}$.



12. Брусок массой m_1 связан нерастяжимой невесомой нитью, перекинутой через легкий блок, закрепленный на краю стола с грузом, масса которого m_2 больше (рис.). Определите модуль ускорения a бруска при его движении по гладкой горизонтальной поверхности стола.



13. Определите модуль ускорения бруска массой m_1, находящегося на гладкой горизонтальной поверхности (рис.), если грузы, массы которых m_2 и m_3 связаны с ним невесомыми нерастяжимыми нитями, перекинутыми через легкие блоки. Решите задачу, считая, что $m_3 > m_2$.



14. Два бруска массами m_1 и m_2 связаны легкой нерастяжимой нитью, перекинутой через неподвижный блок, закрепленный в вершине наклонной плоскости, образующей угол α с горизонтом (рис.). При каком значении массы m_2 тело массой m_1 будет двигаться вверх по наклонной плоскости с ускорением, модуль которого a, если коэффициент трения μ.

15. Шарик массой m, прикрепленный к нити (рис.) равномерно вращается в горизонтальной плоскости (конический маятник). Определите модуль угловой скорости шарика, если расстояние от точки подвеса до горизонтальной плоскости h.

16. Определите максимальное значение модуля скорости v велосипедиста, который движется по горизонтальной поверхности, описывая дугу радиусом R, если коэффициент трения резины о дорогу μ.

17. Две планеты вращаются вокруг звезды по круговым орбитам. Во сколько раз различаются радиусы их орбит R_1 и R_2, если период вращения второй планеты $T_2 = nT_1$.

18. Определите плотность планеты, период обращения которой вокруг оси T = 6,0 ч, если вес тела на экваторе этой планеты на δ = 10 % меньше его веса на полюсе.

19. В исключительном случае человек с места может прыгнуть на высоту H = 0,88 м над землей. Определите среднее значение силы $\langle F \rangle$воздействия человека массой m = 75 кг на поверхность Земли при выполнении такого прыжка, если считать, что перед прыжком человек присел на h = 0,20 м.

20. Определите модуль силы, приводящей во вращение рабочее колесо турбины гидроэлектростанции, если модуль скорости потока воды $v = 75\,\frac{\text{м}}{\text{с}}$, а площадь сечения потока воды $S = 25\text{м}^2$.

21. Чтобы вытащить автомобиль, застрявший в грязи, шофер привязал один конец троса к автомобилю, а другой – к стоящему впереди придорожному дереву, предварительно натянув трос. Затем он подошел к середине троса и стал оттягивать его с силой, модуль которой $F = 500$ Н, направленной перпендикулярно тросу. Расстояние между автомобилем и деревом L= 52 м. Определите модуль силы натяжения троса в момент, когда шофер продвинулся вперед, на расстояние l = 0,50 м.

22. Тягач тянет груженные лесом сани по ледяной дороге с постоянной скоростью, модуль которой $v = 15\,\frac{\text{км}}{\text{ч}}$. Определите модуль скорости, с которой тягач мог бы тянуть такие сани при вывозке леса летом по песчаной дороге, если мощность, развиваемая двигателем, в обоих случаях одинакова. Коэффициент трения по ледяной дороге μ = 0,01, а по песчаной дороге μ = 0,15.

23. На участке дороги, где установлен знак ограничения скорости $v = 30\,\frac{\text{км}}{\text{ч}}$, водитель применил аварийное торможение. Нарушал ли водитель правила движения, если коэффициент трения μ = 0,6, а тормозной путь s = 12 м.

24.Стационарным искусственным спутником Земли называется спутник, находящийся постоянно над одной и той же точкой экватора. Определить расстояние такого спутника до центра Земли.

25. Шоссе имеет вираж с наклоном α = 10° к горизонту при радиусе закругления дороги R = 100 м. Определите максимальное значение модуля скорости, на которую рассчитан вираж?

26. Дальность полета тела, брошенного в горизонтальном направлении, равна половине высоты, с которой брошено тело. Определите угол α, который образует с горизонтом скорости тела при его падении на поверхность Земли

27. Тело брошено под углом α = 60° к горизонту. Во сколько раз максимальная дальность полета $L_{\max}$ тела по горизонтали больше максимальной высоты $H_{\max}$ его подъема?

РАЗДЕЛ 3. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

Импульс тела. Импульс силы. Закон сохранения импульса. Реактивное движение.

Механическая работа. Мощность. Работа силы тяжести, силы упругости, силы трения. Кинетическая и потенциальная энергии. Закон сохранения энергии в механике.

В области механических явлений действуют три закона сохранения: закон сохранения импульса, закон сохранения момента импульса, который вы будете изучать в университете, поскольку в общеобразовательной школе он не изучается и закон сохранения полной механической энергии, которые выполняются для определенных видов физических систем.

Физической (механической) системой называют тело или несколько тел, рассматриваемых в конкретной задаче. В зависимости от наличия (или отсутствия) взаимодействий физической системы с материальными объектами (телами и полями), не входящими в нее, различают три вида физических систем: замкнутые, изолированные и незамкнутые.

В общем случае *замкнутой* называется физическая система, которая не взаимодействует (не обменивается энергией и массой) с материальными объектами, не входящими в нее.

Изолированной называется физическая система, которая взаимодействует с материальными объектами, не входящими в нее, но эти взаимодействия скомпенсированы.

Замкнутость физической системы означает отсутствие внешних сил, а изолированность – равенство нулю равнодействующей этих сил.

В механике, как правило, замкнутой называют физическую систему, на которую не действуют внешние силы или действие этих сил скомпенсировано. Понятие "замкнутая физическая система" является идеальной моделью реальных физических систем.

Незамкнутой (открытой) является физическая система, которая взаимодействует с телами и полями, не входящими в нее, причем эти взаимодействия не скомпенсированы.

Внешними силами называют силы, характеризующие взаимодействия физической системы или отдельных тел, входящих в ее состав, с материальными объектами, которые находятся вне системы.

Внутренними принято называть силы, с которыми составные части физической системы взаимодействуют между собой.

Силы, значение которых зависит только от координат взаимодействующих тел, называют *консервативными*. К ним относятся: сила тяжести, сила упругости, сила электростатического взаимодействия. Силы, значение которых зависит от относительной скорости взаимодействующих тел, называют *неконсервативными* (диссипативными). Примером неконсервативной силы является сила трения. Если внутренние и внешние силы, действующие на систему, являются консервативными, то физическая система также называется консервативной. При наличии диссипативных сил физическая система называется неконсервативной. Консервативная физическая система может быть как замкнутой, так и открытой.

3.1. Импульс. Закон сохранения импульса

Импульс (количество движения) тела $\vec{p}$ – физическая векторная величина, характеризующая его механическое состояние при поступательном движении и при скоростях движения малых по сравнению со скоростью света ($c = 3 \cdot 10^8\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$), равная произведению массы тела и его скорости: $\vec{p} = m\vec{\upsilon}$. При релятивистских скоростях движения импульс тела $\vec{p} = m\vec{\upsilon}\left(1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}\right)^{-1/2}$.

Направление импульса совпадает с направлением скорости тела. Единица импульса в СИ – $1\,\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$.

Импульсом физической системы называется сумма импульсов тел, входящих в эту систему. Импульс физической системы, состоящей из n тел: $\vec{p} = \sum_{i=1}^{n} m_i\vec{\upsilon}_i$, или $\vec{p} = m_1\vec{\upsilon}_1 + m_2\vec{\upsilon}_2 + m_3\vec{\upsilon}_3 + ... + m_n\vec{\upsilon}_n$.

В релятивистском случае $\vec{p} = \gamma m\vec{\upsilon}$, где $\gamma = \left(1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$, c – скорость света в вакууме

Значение импульса тела (физической системы) зависит от выбора системы отсчета, т. е. импульс является относительной величиной.

Закон сохранения импульса выражает неизменность во времени импульса замкнутой физической (механической) системы.

Закон гласит: **полный импульс замкнутой физической системы, которая находится в инерциальной системе отсчета, сохраняется при любых взаимодействиях, происходящих внутри этой системы.** Другими словами, в инерциальной системе отсчета векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую физическую систему, остается постоянной при любых взаимодействиях тел этой системы между собой

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 + ...\vec{p}_n = m_1\vec{\upsilon}_1 + m_2\vec{\upsilon}_2 + m_3\vec{\upsilon}_3 + ... + m_n\vec{\upsilon}_n = con\vec{st}$$

Последняя формула является математическим выражением закона сохранения импульса

Несмотря на относительность значения импульса, закон сохранения импульса выполняется для замкнутых физических систем, которые находятся в любой инерциальной системе отсчета и при любых скоростях движения, причем при $\upsilon \to c$ необходимо использовать релятивистское выражение для импульса.

В случае незамкнутой физической системы полный импульс тел системы не сохраняется. Однако если в системе существует направление, вдоль которого внешние силы не действуют или их действие скомпенсировано, то сохраняется проекция полного импульса на это направление. Кроме того, если время взаимодействия очень мало (взрыв, удар, выстрел), то за это время даже в случае незамкнутой системы внешние силы незначительно изменяют импульсы взаимодействующих тел. Поэтому для практических расчетов и в этом случае также можно применять закон сохранения импульса.

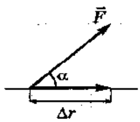
! Закон сохранения импульса является фундаментальным законом природы.

3.2. Работа

Работа – физическая скалярная величина, являющаяся количественной мерой процессов превращения одного вида движения в другое или процессов передачи движения от одного тела (системы тел) другому телу (системе тел).

Главным общим свойством всех видов работы является то, что она всегда проявляется в процессах превращения энергии и непосредственно зависит от особенностей конкретного процесса. Работа не совершается, если тело или система не участвуют в процессе, связанном с преобразованием энергии.

В механике работа всегда совершается в процессе воздействия на тело (частицу, систему) какой-либо силы, результатом, которого оказывается пространственное перемещение тела (точки приложения силы).



Работа постоянной силы при прямолинейном движении определяется как произведение модуля силы $|\vec{F}|$ на модуль элементарного перемещения $|\Delta\vec{r}|$ и на косинус угла α между ними: $A = |\vec{F}| \cdot |\Delta\vec{r}| \cdot \cos\alpha = F\Delta r \cos\alpha$.

Если угол между силой и перемещением острый, то при перемещении тела сила совершает положительную работу. Если же угол между ними тупой, то сила совершает отрицательную работу. Физически это означает, что рассматриваемая сила сопротивляется перемещению тела, а его реальное движение обеспечивают другие силы, которые при этом совершают положительную работу. Если сила перпендикулярна перемещению, то она не совершает работу. Действие силы в этом случае проявляется в сообщении телу центростремительного ускорения и, следовательно, может привести лишь к искривлению его траектории.

Работа силы тяжести $A = mg(h_1 - h_2)$ не зависит от длины и формы пути и всегда равна произведению модуля силы тяжести и разности высот, соответствующих начальному и конечному положениям.

При движении тела вниз сила тяжести совершает положительную работу, а при движении вверх – отрицательную. При перемещении тела по замкнутой траектории работа силы тяжести равна нулю.

Работа силы упругости $A = -\left(\frac{k\Delta l_2^2}{2} - \frac{k\Delta l_1^2}{2}\right) = \frac{k\Delta l_1^2}{2} - \frac{k\Delta l_2^2}{2}$, равна половине произведения жесткости упругого тела и разности квадратов его абсолютных деформаций в начальном и конечном состояниях. Если при движении тела под действием силы упругости оно возвращается в исходное положение, полная работа силы упругости равна нулю.

Работа силы трения скольжения. Так как сила трения скольжения направлена в сторону, противоположную перемещению тела, то работа, которую она совершает, отрицательная:

$$A = F_{\text{тр}} s \cos 180^{\circ} = -F_{\text{тр}} s \cdot$$

! Работа результирующей силы равна алгебраической сумме работ всех сил, действующих на тело.

! Единица работы в СИ – джоуль $[A]$ – 1 Дж.

Основные сведения о работе сил, рассматриваемых в механике, и ее особенностях приведены в табл. 8.

Таблица 8

Сила, совершающая работу	Формула для расчета работы	Особенности данного вида работы
Сила тяжести $\vec{F} = m\vec{g}$	$A = mg(h_1 - h_2)$	1. Работа не зависит от формы траектории. 2. Всегда равна произведению модуля силы тяжести на разность высот в исходном и конечном состояниях. 3. Работа при движении по замкнутой траектории равна нулю.
Сила упругости $\vec{F} = -k\Delta\vec{l}$	$A = \frac{k\Delta l_1^2}{2} - \frac{k\Delta l_2^2}{2}$	1. Зависит от начального и конечного положения тела. 2. Работа равна половине произведения жесткости упругого тела и разности квадратов его начальной и конечной деформаций. 3.Полная работа при движении "туда и обратно" равна нулю.
Модуль силы трения $F = \mu N$	$A = -F_{mp} l$	1. Работа равна произведению модуля силы трения на длину пути, пройденного телом. 2.Отрицательна. 3.Зависит от длины участка траектории между начальным и конечным положениями тела.

3.3. Мощность

Мощность – физическая скалярная величина, введенная для количественного оценивания скорости (интенсивности) преобразования энергии из одного вида в другой и равная отношению энергии ΔW переданного движения к промежутку времени Δt, в течение которого эта передача произошла: $P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$.

В механике мощность характеризует интенсивность, с какой сила $\vec{F}$ совершает механическую работу A.

Средняя мощность $\langle P \rangle$ – это скалярная физическая величина, равная отношению работы A к промежутку времени t, в течение которого эта работа была совершена: $\langle P \rangle = \frac{A}{\Delta t}$. Если на тело действует постоянная сила F, то средняя мощность $\langle P \rangle = F\langle v \rangle \cos\alpha$, где $\langle \upsilon \rangle$ – средняя скорость тела, α – угол между направлениями силы и скорости тела.

Мгновенная мощность P – мощность в данный момент времени: $P = Fv\cos\alpha$, где v – модуль мгновенной скорости тела, a – угол между направлениями силы и скорости тела.

Единицей мощности в СИ является ватт (1 Вт). Для оценки мощности автомобильных двигателей используется внесистемная единица лошадиная сила 1 л. с. = 736 Вт. Мощности некоторых объектов природы и техники приведены в табл. 9.

Таблица 9

Объекты природы и техники	Мощность, Вт	Объекты природы и техники	Мощность, Вт
Взрыв сверхновой звезды	$\sim 10^{36}$	Гидрогенератор	$\sim 10^{9}$
Полное излучение Солнца	$4 \cdot 10^{26}$	Дизель тепловоза ТЭП75	$4{,}4 \cdot 10^{6}$
Излучение Солнца, падающее на Землю	$2 \cdot 10^{18}$	Синхрофазотрон	$\sim 10^{5}$
		Двигатель троллейбуса	$5 \cdot 10^{4}$
Взрыв водородной бомбы	$\sim 10^{18}$	Бегун	$5 \cdot 10^{3}$
Взрыв атомной бомбы	$\sim 10^{15}$	Утюг	$\sim 10^{3}$
Все реки и водопады на Земле	$5 \cdot 10^{13}$	Холодильник домашний	$\sim 10^{2}$
Ураган	до $5 \cdot 10^{11}$	Горящая спичка	$\sim 10^{3}$
Ракета-носитель "Энергия"	$\sim 10^{11}$	Муха в полете	$\sim 10^{5}$
Молния	$2 \cdot 10^{10}$	Неоновая лампа	10^{-6}

Коэффициент полезного действия (η) – физическая безразмерная величина, характеризующая степень совершенства какой-либо технической системы (простого механизма, машины и др.) в отношении осуществления в нем процессов передачи энергии или ее преобразования из одной формы в другую и равная отношению полезно используемой мощности $P_{\text{полезн}}$ к суммарной мощности $P_{\text{об}}$, подводимой к системе: $\eta = \frac{P_{\text{полезн}}}{P_{\text{общ}}} = \frac{P_{\text{общ}} - P_{\text{потерь}}}{P_{\text{общ}}}$. В ряде случаев целесообразно определять коэффициент полезного действия не как отношение мощностей, а как отношение соответствующих работ (энергий): $\eta = \frac{A_{\text{полезн}}}{A_{\text{общ}}}$.

Коэффициент полезного действия электрического двигателя равен отношению совершаемой двигателем полезной механической работы к электрической энергии, получаемой от источника; в тепловых двигателях – отношение полезной механической работы к затрачиваемому количеству теплоты; в электрических трансформаторах – отношение электромагнитной энергии, получаемой во вторичной обмотке, к энергии, потребляемой первичной обмоткой.

Из-за неизбежных потерь энергии на трение, на нагревание окружающих тел и т. п. коэффициент полезного действия всегда меньше единицы ($\eta < 1$) и выражается в виде правильной дроби или в процентах.

Необходимо иметь в виду, что значения коэффициента полезного действия, рассчитанные по формулам мощности и работы, совпадают только в том случае, если промежутки времени подвода и выделения энергии одинаковые.

3.4. Энергия

Энергия (от греч. – energeia–действие, деятельность) – физическая скалярная величина, являющаяся универсальной мерой интенсивности различных форм движения материи при всех его превращениях из одного вида в другой.

Для количественной характеристики качественно различных форм движения материи и соответствующих им взаимодействий вводятся различные виды энергии: механическая, гравитационная, внутренняя, электромагнитная, ядерная и др. Постулируется, что во всех случаях энергия – это функция состояния физической системы, изменение которой равно работе, т. е. $A = \Delta E$.

В механике состояние физической системы определено, если известны положения тел системы в пространстве (их координаты) и скорости всех тел системы. В соответствии с этим в механике рассматриваются только два вида энергии: *потенциальная* (энергия, обусловленная взаимодействием тел или частей одного тела между собой и зависящая только от координат тел, входящих в систему) и *кинетическая* (энергия, которой обладают тела вследствие движения и которая зависит только от скорости движения).

Сумма кинетической и потенциальной энергий тел физической системы называется *полной механической энергией* этой *системы*: $E_{мех} = K + П$. Значения энергии некоторых объектов природы и техники приведены в табл. 10.

Таблица 10

Объекты природы и техники	Численное значение, Дж	Объекты природы и техники	Численное значение, Дж
Метагалактика	10^{54}	Удар молнии	10^{9}
Взрыв сверхновой звезды	10^{44}	Суточное потребление энергии человеком	10^{8}
Излучение Солнца за год	10^{33}		
Энергия, принимаемая Землей за год	10^{26}	Смертельная доза рентгеновского излучения	10^{3}
Сильное землетрясение	10^{20}	Частицы в ускорителе	10^{-3}
Взрыв водородной бомбы	10^{18}	Фотон видимого света	10^{-2}
Запуск ракеты	10^{12}	Электрон в атоме водорода	10^{-15}
		Химическая связь	10^{-18}

3.4.1. Кинетическая энергия

В классической механике *кинетическая энергия* материальной точки – это физическая скалярная величина, равная половине произведения массы m материальной точки и квадрата ее скорости $\vec{\upsilon}$ $E_к = \dfrac{m\upsilon^2}{2}$.

Приведенное определение кинетической энергии справедливо при скоростях движения, малых по сравнению со скоростью света. При скоростях движения, близких к скорости света, кинетическая энергия тела рассчитывается по формуле $E_к = (\gamma - 1) mc^2$, где $\gamma = \left(1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}\right)^{-1/2}$, c – скорость света в вакууме

Кинетическая энергия физической системы, которая состоит из n материальных точек, равна сумме кинетических энергий материальных точек, входящих в эту систему: $E_{к.сист} = \sum_{i=1}^{n} \frac{m_i \upsilon_i^2}{2}$.

! Единица энергии в СИ – джоуль (1 Дж). В атомной и ядерной физике и в физике элементарных частиц для измерений энергии обычно применяется внесистемная единица – электрон-вольт (1 эВ): $1\,эВ = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Вследствие того, что скорость тела (материальной точки) зависит от выбора системы отсчета, значения его кинетической энергии в разных системах отсчета будут различными. Кинетическая энергия тела, которое покоится относительно рассматриваемой инерциальной системы отсчета, в этой системе отсчета условно принимается равной нулю.

Теорема о изменении кинетической энергии: изменение кинетической энергии материальной точки равно работе равнодействующей всех внешних сил, вызывающих это изменение.

$$E_{к.кон} - E_{к.нач} = \frac{m\upsilon_{кон}^2}{2} - \frac{m\upsilon_{нач}^2}{2} = A$$

1. Если равнодействующая всех внешних сил направлена в сторону движения, то $A > 0$, поэтому $E_{к.кон} > E_{к.нач}$, т. е. кинетическая энергия возрастает.

2. Если равнодействующая всех внешних сил направлена в сторону, противоположную движению, то $A < 0$, поэтому $E_{к.кон} < E_{к.нач}$, т. е. кинетическая энергия уменьшается.

3. Если в начальный момент времени материальная точка покоилась относительно выбранной инерциальной системы отсчета, то $A = \frac{mv^2}{2}$, т. е. кинетическая энергия материальной точки массой m, движущейся со скоростью $\vec{v}$, равна работе, которую должна выполнить сила, действующая на эту точку, чтобы сообщить ей эту скорость. Таким же будет модуль работы совершенной внешними силами при торможении материальной точки до полной остановки.

Если материальные точки, входящие в состав физической системы, взаимодействуют друг с другом, то изменение кинетической энергии каждой из них обусловлено действием как внешних, так и внутренних сил.

Изменение кинетической энергии физической системы, в состав которой входит *n* материальных точек, взаимодействующих между собой, равно работе внешних и внутренних сил, которые действуют на каждую из материальных точек этой системы.

3.4.2. Потенциальная энергия

Потенциальная энергия системы взаимодействующих тел – это скалярная физическая величина, численно равная работе, которую выполняют силы взаимодействия при взаимном удалении всех тел системы на бесконечное расстояние друг от друга, т. е. в состояние с нулевым уровнем потенциальной энергии.

Потенциальная энергия системы, в которой действуют силы отталкивания, является положительной, а потенциальная энергия системы, в которой действуют силы притяжения – отрицательной. Поскольку потенциальная энергия определяется силами, значение которых зависит от вида взаимодействия и от расстояния между взаимодействующими телами, то универсальной формулы для расчета потенциальной энергии нет.

Если нулевой уровень отсчета потенциальной энергии выбрать в бесконечности, то потенциальная энергия тела, находящегося в гравитационном поле Земли: $E_{\text{п}} = -G\dfrac{mM}{R+h}$.

Если нулевой уровень отсчета потенциальной энергии выбрать на поверхности Земли, то потенциальная энергия гравитационного взаимодействия тела массой m с Землей: $E_{\text{п}} = mgh$.

Если тело массой m перемещается из точки, находящейся на высоте h_1 над поверхностью Земли, в точку на высоте h_2, то изменение потенциальной энергии этого тела: $\Delta E_{\text{п}} = mg(h_2 - h_1) = -mg(h_1 - h_2)$.

При таком перемещении сила тяжести выполняет работу $A = mg(h_1 - h_2)$. Следовательно, $A = -\Delta E_{\text{п}}$, т. е. **работа силы тяжести равна изменению потенциальной энергии тела, которое находится в гравитационном поле Земли, взятому со знаком «минус».**

Потенциальная энергия упругодеформированного тела $E_{\text{п}} = \dfrac{k(\Delta l)^2}{2}$, где k – жесткость; Δl – абсолютная деформация тела (при условии, что нулевой уровень потенциальной энергии выбран в недеформированном состоянии). Работа силы упругости

$$A = -\left(\frac{k(\Delta l_2)^2}{2} - \frac{k(\Delta l_1)^2}{2}\right) = \frac{k(\Delta l_1)^2}{2} - \frac{k(\Delta l_2)^2}{2}.$$

Следовательно, $A = -\Delta E_{\text{п}}$, т. е. работа силы упругости равна изменению потенциальной энергии упруго деформированного тела, взятому со знаком «минус».

Основные сведения о кинетической и потенциальной энергиях и их особенностях приведены в табл. 11 и 12.

Таблица 11

	Кинетическая энергия	Потенциальная энергия
Сходства	1. Физическая величина, характеризующая способность тела (или нескольких тел) совершать работу.	
	2. Мерой изменения энергии при переходе из одного состояния в другое является работа.	
	3. Основной единицей в СИ является 1 Дж (джоуль).	
	4. Числовые значения кинетической и потенциальной энергии относительны.	
Различия	1. Энергия, которой обладает тело вследствие своего движения.	1. Энергия взаимодействия тел или частей тела.
	2. $E_п = \frac{m\upsilon^2}{2}$	2. В поле силы тяжести $E_п = mgh$.
	3. Изменение кинетической энергии численно равно работе, которую должны совершить любые внешние силы, действующие на тело. $A = \Delta E_к = E_{к.кон} - E_{к.нач}$	3. Изменение потенциальной энергии численно равно взятой с обратным знаком работе, которую должны совершить внутренние силы взаимодействия, зависящие только от координат тел. $A = -\Delta E_п = E_{п.нач} - E_{п.кон}$

Таблица 12

Вид энергии	Определение	Формула	Особенности	Связь с работой
Кинетическая энергия	Энергия, обусловленная движением	$E_к = \frac{m\upsilon^2}{2}$	Равна максимальной работе, которую может совершить тело при полном торможении	$A = E_{к2} - E_{к1}$, $A = \frac{m\upsilon_2^2}{2} - \frac{m\upsilon_1^2}{2}$
Потенциальная энергия тела, поднятого над Землей	Энергия, обусловленная взаимодействием тела с гравитационным полем Земли	$E_п = mgh$	Равна всей работе, которая может быть совершена при переходе системы на нулевой уровень энергии	$A = -\Delta E_п = E_{п1} - E_{п2}$, $A = -mg(h_2 - h_1)$
Потенциальная энергия, упругодеформированного тела	Энергия, обусловленная электромагнитным взаимодействием частиц вещества	$E_п = \frac{k(\Delta l)^2}{2}$	Равна всей работе, которая может быть совершена при переходе системы на нулевой уровень энергии	$A = -\Delta E_п = E_{п1} - E_{п2}$, $A = \frac{k\Delta l_1^2}{2} - \frac{k\Delta l_2^2}{2}$

3.5. Закон сохранения полной механической энергии

Если тела, входящие в физическую систему, движутся и, кроме того, взаимодействуют друг с другом, то они обладают одновременно и кинетической, и потенциальной энергией.

Полная механическая энергия E физической системы – это сумма кинетической и потенциальной энергий материальных объектов (тел) физической системы:

$$E_{\text{мех}} = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} \cdot$$

Если на тело действуют силы тяжести и упругости, то полная механическая энергия такого тела определяется выражением

$$E = \frac{m\upsilon^2}{2} + mgh + \frac{k\Delta l^2}{2} \cdot$$

Закон сохранения механической энергии замкнутой (изолированной) системы выражает неизменность во времени механической энергии замкнутой системы. Закон гласит: **в замкнутой механической системе сумма механических видов энергии (потенциальной и кинетической энергии, включая энергию вращательного движения) остается неизменной только в случаях, когда механическая энергия тел, составляющих систему, не переходит в другие виды энергии,** т. е. при условии, что внутренние силы, являются консервативными.

Другими словами, **полная механическая энергия замкнутой физической системы, в которой действуют только консервативные силы** (тяжести, упругости, электростатические силы)**, не изменяется с течением времени (**сохраняется**):**

$$(E_{\text{к}} + E_{\text{п}})_{\text{нач}} = (E_{\text{к}} + E_{\text{п}})_{\text{кон}} = \text{const} \text{ или } \Delta(E_{\text{к}} + E_{\text{п}}) = 0 \cdot$$

Закон сохранения полной механической энергии справедлив не только для замкнутых физических систем, в которых действуют только консервативные силы, но и для систем, находящихся во внешнем потенциальном поле, не зависящем от времени.

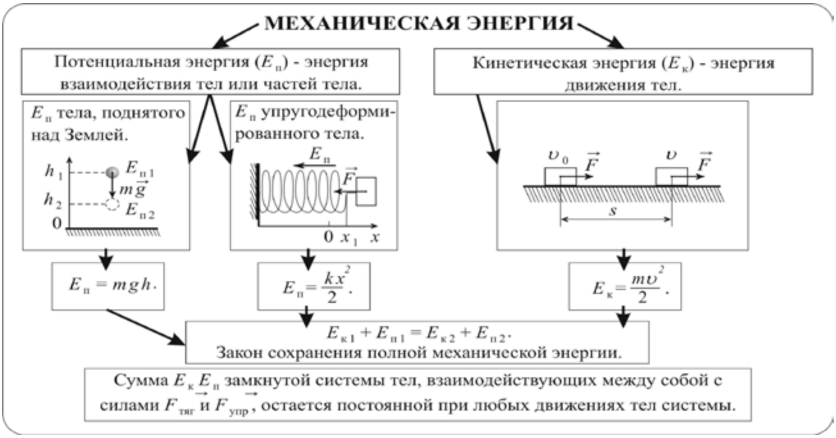
Закон изменения полной механической энергии: если на тела системы действуют кроме консервативных сил также и неконсервативные силы (силы трения, сопротивления движению), то изменение полной механической энергии равно работе неконсервативных сил:

$$(E_{\text{к}} + E_{\text{п}})_{\text{кон}} = (E_{\text{к}} + E_{\text{п}})_{\text{нач}} = A_{\text{неконс}}, \text{ или } \Delta(E_{\text{к}} + E_{\text{п}}) = A_{\text{неконс}} \cdot$$

Законы сохранения и изменения полной механической энергии являются частными случаями всеобщего закона сохранения и превращения энергии применительно к механическим процессам.

Основная информация о сохранении и превращениях энергии при в различных механических системах приведена в табл. 13.

Таблица 13



3.6. <u>Простые механизмы</u>

Простыми механизмами называются механизмы, позволяющие совершать работу без применения источников немеханической энергии. Все простые механизмы служат для преобразования механического воздействия на тело, изменяя точку приложения силы, ее направление и числовое значение (модуль). Простые механизмы можно разделить на шесть основных видов: рычаг, блок, ворот, наклонная плоскость, клин, винт. Блок и ворот являются разновидностями рычага, а клин и винт – разновидностями наклонной плоскости.

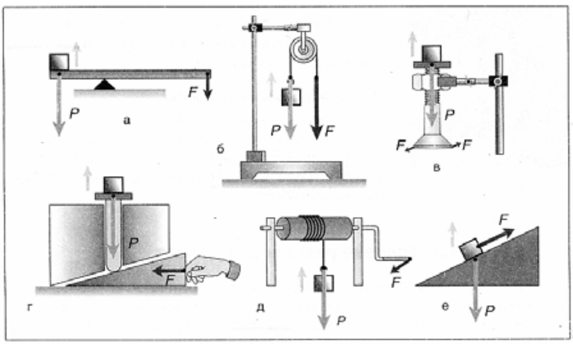
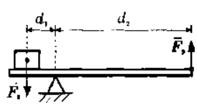


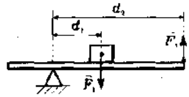
Рисунок 4. Рычаги

Рычаг – Простейший механизм, позволяющий меньшей силой уравновесить большую силу. Представляет собой твердое тело, вращающееся вокруг неподвижной оси или опоры.



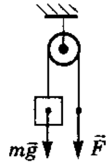
Рычагом первого рода (рис. 4, *а*) называют рычаг, ось вращения (опора) которого располагается между точками приложения сил, а сами силы направлены в одну сторону.

Рычагом второго рода (рис. 4, *б*) называют рычаг, ось вращения (опора) которого располагается по одну сторону от точек приложения сил, а сами силы направлены в противоположные стороны.



Условием равновесия рычага является равенство значений моментов сил $M_1 = F_1d_1$ и $M_2 = F_2d_2$, приложенных к нему: $F_1d_1 = F_2d_2$, где d_1 и d_2 – плечи сил F_1 и F_2 относительно оси вращения соответственно.

Плечом силы называется кратчайшее расстояние от оси вращения (опоры) до прямой, вдоль которой действует сила,

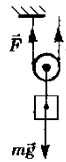


<u>Блок</u> – деталь грузоподъемных машин в форме колеса с желобом по окружности для цепи, каната, нити.

Неподвижный блок – это небольшое колесо, укрепленное на неподвижной оси. Неподвижный блок изменяет направление действия силы, но не изменяет ее модуля (см. рис.).

Действие неподвижного блока аналогично действию равноплечего рычага первого рода, для которого плечи приложенных сил $d_1 = d_2 = r$, где r – радиус блока. Из условия равновесия рычага следует, что $F_1 = mg$.

*Модуль силы, приложенной к нити перекинутой через блок, не зависит от того, под каким углом к вертикали она направлена, и численно равен весу груза.



Подвижный блок является разновидностью рычага второго рода, для которого $d_1 = r$, $d_2 = 2r$. Поэтому из условия равновесия рычага следует, что без учета веса самого блока $F = \frac{P}{2} = \frac{mg}{2}$ (см. рис.).

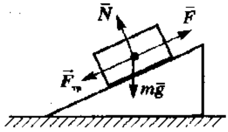
В случае подвижного блока сила, необходимая для равномерного подъема груза (без учета трения и веса самого блока), в 2 раза меньше силы тяжести, действующей на груз.

Основные характеристики неподвижного и подвижного блоков приведены в табл. 14.

Таблица 14

Блоки	Неподвижный	Подвижный
Сходства	Простые механизмы, предназначенные для подъ ема или опускания грузов.	
	Являются разновидностью рычага.	
Различия	Ось вращения неподвижна	Ось вращения перемещается
	Не дает выигрыша в силе	Без учета силы трения и силы тяжести самого блока дает выигрыш в силе в 2 раза.
	Условие равновесия $F_1 \cdot r = F_2 \cdot r$	Условие равновесия $F_2 \cdot 2r = (P + F_T) \cdot r$

Наклонная плоскость применяется для подъема грузов на некоторую высоту. Без учета сил трения она дает выигрыш в силе во столько раз, во сколько раз длина l наклонной плоскости больше ее высоты h.



Коэффициент полезного действия наклонной плоскости при наличии сил трения: $\eta = \frac{1}{1+\mu \text{ctg}\alpha}$, где μ – коэффициент трения; α – угол наклона плоскости к горизонту.

Золотое правило механики. Используя простой механизм, нельзя получить выигрыш в работе, поскольку выигрыш в силе компенсируется проигрышем в пути.

Коэффициент полезного действия η простого механизма – физическая безразмерная величина, показывающая какую часть от работы совершенной с использованием механизма составляет полезная работа $\eta = \frac{A_{пол}}{A_{сов}}$. Коэффициент полезного действия любого механизма $\eta \prec 1$.

Коэффициенты полезного действия простых механизмов приведены в табл. 15.

Таблица 15

Название механизма	Причина того, что $A_{пол.} < A_{затр}$	Полезная работа	Совершенная работа	КПД
Рычаг	Трение, вес рычага	$A_{пол.} = F_1 \cdot s_1$, $F_1 = F_т = mg$	$A_{затр} = F_2 \cdot s_2$	$\eta = \frac{F_1 s_1}{F_2 s_2} \cdot 100\%$ $\eta \approx 95\% - 98\%$
Неподвижный блок	Трение в блоке, вес веревки	$A_{пол.} = F_1 \cdot h$, $F_1 = F_т = mg$	$A_{затр} = F_2 \cdot h$	$\eta = \frac{F_1}{F_2} \cdot 100\%$ $\eta \approx 92\% - 95\%$
Подвижный блок	Трение в блоке, вес блока и веревки	$A_{пол.} = F_1 \cdot h$, $F_1 = F_т = mg$	$A_{затр} = 2F_2 \cdot h$	$\eta = \frac{F_1}{2F_2} \cdot 100\%$ $\eta \approx 92\% - 95\%$
Наклонная плоскость	Трение, вес веревки	$A_{пол.} = F_1 \cdot h$, $F_1 = F_т = mg$	$A_{затр} = F_2 \cdot s_2$	$\eta = \frac{1}{1+\mu ctg\alpha} \cdot 100\%$ $\eta \approx 95\% - 98\%$

3.7. Примеры решения задач

Задача 1. Легкоатлет массой m бежит по круговой дорожке со скоростью, модуль которой υ постоянен. Определите модуль изменения импульса легкоатлета через промежутки времени $\Delta t = \frac{T}{4}$, где T – время пробега одного круга.

Д а н о:	**Р е ш е н и е**
m, υ, $\Delta t = \frac{T}{4}$	Траекторией движения легкоатлета, которого будем считать материальной точкой, является окружность. Поэтому, если в момент начала отсчета времени легкоатлет находился в точке A,
Δp – ?	

то через промежуток времени $\Delta t = \frac{T}{4}$, он окажется в точке B, соответствующей повороту радиус-вектора легкоатлета на угол $\varphi = \frac{\pi}{2}$.

Импульсом тела называют физическую векторную величину, характеризующую механическое состояние тела при его поступательном движении и равную произведению массы тела и его скорости: $\vec{p} = m\vec{\upsilon}$.

Линейные скорости $\vec{\upsilon}_A$ и $\vec{\upsilon}_B$ легкоатлета направлены по касательной к окружности в соответствующих точках траектории. Изменение импульса легкоатлета $\Delta\vec{p} = m\Delta\vec{\upsilon}$.

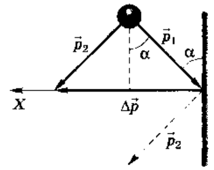
Для построения вектора $\Delta\vec{p} = \vec{p}_B - \vec{p}_A$ воспользуемся правилом треугольника. Сохраняя направление и значение модуля, перенесем вектор $\vec{p}_A$ так, чтобы его начало совпало с началом вектора $\vec{p}_B$. Вектор $\Delta\vec{p}$ получим, соединив конец вектора $\vec{p}_A$ с концом вектора $\vec{p}_B$. По условию задачи модуль скорости υ легкоатлета постоянен, поэтому модуль его импульса во всех точках $p = m\upsilon$. Следовательно, модуль вектора $\Delta p = \sqrt{p_B^2 + p_A^2} = m\upsilon\sqrt{2}$.

Ответ: $\Delta p = \sqrt{2}mv$.

Задача 2. Молекула массой $m = 2{,}0 \cdot 10^{-26}$ кг летит со скоростью, направленной под углом $\alpha = 30^\circ$ к поверхности стенки сосуда. Модуль скорости $v = 600\,\frac{\text{м}}{\text{с}}$. После удара о стенку молекула под таким же углом и с такой же по модулю скоростью отскакивает от нее. Определите изменение импульса молекулы.

Д а н о:	**Р е ш е н и е**
$m = 2{,}0 \cdot 10^{-26}$ кг, $\alpha = 30^\circ$, $v = 600\,\frac{\text{м}}{\text{с}}$.	Импульсом тела называют физическую векторную величину, характеризующую его механическое состояние при поступательном движении и равную произведению массы тела и его скорости: $\vec{p} = m\vec{\upsilon}$. Направление импульса совпадает с направлением скорости тела.
Δp – ?	

Поэтому изменение импульса молекулы $\Delta\vec{p} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1$, причем модули импульса молекулы до и после столкновения со стенкой равны, т. е. $p_1 = p_2 = m\upsilon$. Будем считать, что система отсчета, связанная со стенкой, является инерциальной, а скорость молекулы задана именно в этой системе отсчета. Начало координат выберем в точке столкновения молекулы со стенкой, ось OY направим вдоль стенки, ось OX – перпендикулярно стенке (см. рис.).



Спроецировав векторы, изображающие импульсы молекулы, на оси координат, получим $\Delta p_y = m\upsilon\cos\alpha - m\upsilon\cos\alpha = 0$, $\Delta p_x = m\upsilon\sin\alpha + m\upsilon\sin\alpha = 2m\upsilon\sin\alpha$. Следовательно, вектор $\Delta\vec{p} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1$ направлен перпендикулярно стенке, а его модуль $\Delta p = 2m\upsilon\sin\alpha$.

Подставив числовые значения и выполнив вычисления, получим $\Delta p = 2\cdot 2{,}0\cdot 10^{-26}\ \text{кг}\cdot 600\ \dfrac{\text{м}}{\text{с}}\cdot\dfrac{1}{2} = 1{,}2\cdot 10^{-23}\ \dfrac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}}$.

Ответ: вектор изменения импульса молекулы направлен перпендикулярно стенке, а его модуль $\Delta p = 1{,}2\cdot 10^{-23}\ \dfrac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}}$.

Задача 3. На озере находится плот массой m_1 = 300 кг. На одном краю плота стоит человек массой m_2 = 60 кг. Определите расстояние, на которое относительно берега переместится плот, если человек пройдет по плоту путь S = 6 м. В начальный момент скорость плота была равна нулю. Силой сопротивления воды пренебречь.

Дано:	Решение
m_1 = 300 кг, m_2 = 60 кг, S = 6 м. ——— l = ?	Допустим, что в механическую систему тел входят только человек и плот. Земля, воздух и вода по отношению к выделенной системе тел являются внешними объектами. Взаимодействие системы с ними может быть описано, если ввести внешние силы, соответствующие воздействиям этих объектов на систему тел.

Можно выделить два состояния системы: начальное в момент начала движения человека по плоту и конечное в момент завершения движения. Если не учитывать силы сопротивления, то механическая система «человек – плот» замкнута, поскольку действующие на нее внешние силы скомпенсированы. Поэтому полный вектор импульса данной системы сохраняется, т. е. $\vec{p}_{\text{нач}} = \vec{p}_{\text{кон}}$.

В начальный момент скорость плота относительно берега была равна нулю, т. е. в системе отсчета связанной с берегом $\vec{p}_{\text{нач}} = \vec{0}$. Из закона сохранения импульса следует, что импульс системы в произвольный момент времени при движении человека остается прежним, т. е. $m_1\vec{\upsilon}_1 + m_2\vec{\upsilon}_2 = \vec{0}$. Поскольку $\vec{\upsilon}_1 \uparrow\downarrow \vec{\upsilon}_2$, то $m_1\upsilon_1 = m_2\upsilon_2$.

Если учесть, что модуль перемещения плота относительно берега $\Delta r_1 = l$, то модуль перемещения человека относительно берега $\Delta r_2 = s - l$. Поэтому $\upsilon_1 = \dfrac{l}{\Delta t}$ и $\upsilon_2 = \dfrac{s-l}{\Delta t}$, где Δt – промежуток времени, в течение которого человек двигался по плоту. Следовательно, $m_1 \frac{l}{\Delta t} = m_2 \frac{l-s}{\Delta t}$, откуда расстояние, на которое переместится плот относительно берега $l = \frac{m_2 s}{m_1 + m_2}$.

Подставив значения физических величин и выполнив вычисления, получим: $l = \frac{60\ \text{кг} \cdot 6\ \text{м}}{300\ \text{кг} + 60\ \text{кг}} = 1$ м.

Ответ: $l = \dfrac{m_2 s}{m_1 + m_2} = 1$ м.

Задача 4. Ядро, летевшее в горизонтальном направлении со скоростью $v = 20\,\frac{\text{м}}{\text{с}}$, разорвалось на два осколка массами $m_1 = 10$ кг, и $m_2 = 5{,}0$ кг. Скорость меньшего осколка равна $v_2 = 20\,\frac{\text{м}}{\text{с}}$ и направлена вертикально вверх. Определите модуль скорости υ_1 движения большего осколка и ее направление.

Д а н о:

$\upsilon = 20\dfrac{\text{м}}{\text{с}}$,

$m_1 = 10$ кг,

$m_2 = 5{,}0$ кг.

$\upsilon_1 = ?$

Р е ш е н и е

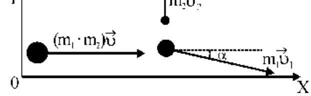
Материальными объектами задачи, являются: ядро, два осколка, поверхность Земли, гравитационное поле Земли и воздух. Ядро и осколки примем за материальные точки. Поверхность Земли будем считать плоской, а ее гравитационное поле однородным.

Систему отсчета свяжем с поверхностью Земли и будем считать ее инерциальной.

Начало координат выберем на поверхности Земли. Ось OX направим горизонтально в направлении движения ядра, ось OY – вертикально вверх.

В физическую систему включим ядро и осколки. Земля и воздух по отношению к выделенной физической системе являются внешними телами. Даже если не учитывать взаимодействие физической системы с воздухом, она будет незамкнутой. Это обусловлено действием на тела системы ничем не скомпенсированной силы тяжести.

Можно выделить два состояния системы: начало взрыва и конец взрыва. Если учесть, что промежуток времени между началом и концом взрыва небольшой, а внутренние силы, возникающие при этом, велики по сравнению с силой тяжести, то выделенную физическую систему можно считать практически замкнутой и описать законом сохранения импульса.



Начальный импульс физической системы равен $\vec{p}_1 = (m_1 + m_2)\vec{\upsilon}$, а ее конечный импульс – $\vec{p}_2 = m_1\vec{\upsilon}_1 + m_2\vec{\upsilon}_2$. Согласно закону сохранения импульса: $\vec{p} = \vec{p}_2$ или $(m_1 + m_2)\vec{\upsilon} = m_1\vec{\upsilon}_1 + m_2\vec{\upsilon}_2$ (см. рис.).

Если спроецировать векторы, изображающие физические величины на оси координат, получим: $(m_1 + m_2)\upsilon = m_1\upsilon_1 \cos\alpha$ $0 = m_2\upsilon_2 - m_1\upsilon_1 \sin\alpha$. Откуда

$$v_1 = \frac{\sqrt{m_2^2 v_2^2 + (m_1+m_2)^2 v^2}}{m_1}; \mathrm{tg}\alpha = \frac{m_2 v_2}{(m_1+m_2)v}.$$

Выполните расчеты самостоятельно и убедитесь, что: $v_1 = 32\frac{\text{м}}{\text{с}}$, $\alpha = 19^{\circ}$.

Ответ: скорость большего осколка направлена вниз под углом $\alpha = 19^{\circ}$ к горизонту, а ее модуль $v_1 = 32\frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Задача 5. Зенитный снаряд, выпущенный вертикально вверх, достиг максимальной высоты и взорвался. При этом образовалось три осколка одинаковой массы. Два осколка разлетелись симметрично под углом $\alpha = 60^{\circ}$ к направлению полета снаряда со скоростями модули которых $v_1 = v_2 = 300\frac{\text{м}}{\text{с}}$. Определите модуль и направление скорости третьего осколка.

Д а н о:

$m_1 = m_2 = m_3 = m_0$,

$\alpha = 60^{\circ}$,

$\upsilon_1 = \upsilon_2 = \upsilon_0 = 300\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

$\vec{\upsilon}_3 = ?$

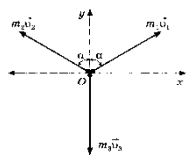
Р е ш е н и е

Систему отсчета свяжем с поверхностью Земли и будем считать ее инерциальной. В механическую систему включим снаряд и три осколка и примем их за материальные точки. Начало координат выберем в точке разрыва снаряда. Ось *OX* направим горизонтально, ось *OY* – вертикально вверх в направлении движения снаряда.

Земля и воздух по отношению к выделенной механической системе являются внешними телами. Даже если не учитывать взаимодействие механической системы с воздухом, она будет незамкнутой. Это обусловлено действием на тела системы ничем не скомпенсированной силы тяжести.

Можно выделить два состояния системы: непосредственно перед после взрыва. Если учесть, что промежуток времени между началом и концом взрыва небольшой, а внутренние силы, возникающие при этом, велики по сравнению с силой тяжести, то выделенную механическую систему можно считать практически замкнутой и для нахождения модуля и направления скорости третьего осколка воспользоваться законом сохранения импульса.

Начальный импульс системы $\vec{p}_{\text{нач}} = \vec{0}$, поскольку снаряд, выпущенный вертикально вверх, взорвался в момент достижения максимальной высоты. Конечный импульс системы $\vec{p}_{\text{кон}} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + m_3\vec{v}_3$. Согласно закону сохранения импульса: $\vec{p}_{\text{нач}} = \vec{p}_{\text{кон}}$ или $m_1\vec{\upsilon}_1 + m_2\vec{\upsilon}_2 + m_3\vec{\upsilon}_3 = \vec{0}$.



Если спроецировать векторные величины на оси координат (см. рис.), получим:

$m_1\upsilon_1 \sin\alpha - m_2\upsilon_2 \sin\alpha + m_3\upsilon_{3x} = 0$ и $m_1\upsilon_1 \cos\alpha + m_2\upsilon_2 \cos\alpha + m_3\upsilon_{3y} = 0$.

Поскольку $m_1 = m_2 = m_3 = m_0$ и $v_1 = v_2 = v_0$, то $m_0\upsilon_0 \sin\alpha - m_0\upsilon_0 \sin\alpha + m_3\upsilon_{3x} = 0$, $m_0\upsilon_0 \cos\alpha + m_0\upsilon_0 \cos\alpha + m_3\upsilon_{3y} = 0$, т. е. $\upsilon_{3x} = 0$, $\upsilon_{3y} = -2\upsilon_0 \cos\alpha$. Следовательно, проекция на ось OY скорости третьего осколка $\upsilon_{3y} = -2\upsilon_0 \cos 60^\circ$, т. е. $\upsilon_3 = -2 \cdot 300\ \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \frac{1}{2} = -300\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Поэтому скорость $\vec{\upsilon}_3$ третьего осколка направлена вертикально вниз, а ее модуль $v_3 = 300\,\frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Ответ: скорость третьего осколка направлена вертикально вниз, а ее модуль $v_3 = 300\,\frac{\text{м}}{\text{с}}$.

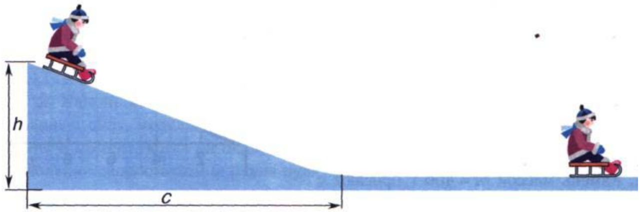
Задача 6. С вершины снежной горки высотой h = 4,0 м и длиной основания b = 10,0 м (см. рис.) на санках съезжает ребенок. Съехав с горки, санки продолжают движение по горизонтальному участку и останавливаются. Коэффициент трения полозьев санок о снег μ = 0,12. Определите длину горизонтального участка движения.

Дано:	**Решение**
$h = 4{,}0$ м, $c = 10{,}0$ м. $\mu = 0{,}12$. $l_2 = ?$	Систему отсчета свяжем с поверхностью Земли, и будем считать ее инерциальной. В качестве механической системы тел рассмотрим санки вместе с ребенком. В качестве идеальной модели системы выберем материальную точку. Выталкивающую силу и силу сопротивления, действующие на санки с ребенком со стороны воздуха, во время движения не будем учитывать.

Нулевой уровень потенциальной энергии выберем на горизонтальном участке поверхности Земли. Начальное состояние системы выберем на вершине снежной горки, а ее конечное состояние – в точке остановки на горизонтальном участке поверхности Земли.

В соответствии с теоремой об изменении кинетической энергии, работа, совершенная внешними силами действующими на систему, при ее движении, равна изменению кинетической энергии системы, т. е. $A = \Delta E_\text{к}$.

Поскольку в начальном и конечном состояниях санки с ребенком покоятся, то $\Delta E_\text{к} = 0$. Следовательно, $A = \Delta E_\text{к} = 0$.



На санки с ребенком действуют: сила тяжести $m\vec{g}$; силы $\vec{N}_1$ и N_2 нормальной реакции наклонного и горизонтального участков пути; силы $\vec{F}_{1тр}$ и $\vec{F}_{2тр}$ трения скольжения (см. рис.). Поэтому работа внешних сил равна сумме работ каждой из них.

Работа силы тяжести $A_{тяж} = mgl_1\cos(90^o - \alpha) = mgh$.

Работы сил $\vec{N}_1$ и $\vec{N}_2$ равны нулю, поскольку каждая из этих сил направлена под углом 90^o к перемещению на соответствующем участке пути.

Работа силы трения скольжения на наклонном участке $A_{1тр} = F_{1тр}l_1\cos180^o = -\mu N_1 l_1$. Если учесть, что $N_1 = mg\cos\alpha$, получим $A_{1тр} = -\mu mgl_1\cos\alpha$. Поскольку $l_1\cos\alpha = c$, то $A_{1тр} = -\mu mg\cdot c$.

Работа силы трения скольжения на горизонтальном участке $A_{2тр} = F_{2тр}l_2\cos180^o = -\mu N_2 l_2$. Если учесть, что $N_2 = mg$, получим $A_{2тр} = -\mu mgl_2$.

Следовательно, работа всех сил $A = mgh - \mu mgc - \mu mgl_2$.

Поскольку $A = 0$, то $mgh - \mu mgc - \mu mgl_2 = 0$. Откуда длина горизонтального участка движения $l_2 = \frac{h}{\mu} - c$.

Подставив числовые значения, получим $l_1 = \frac{4{,}0\text{ м}}{0{,}12} - 10{,}0 = 23$ м.

Ответ: $l_1 = 23$ м.

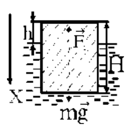
Задача 7. В льдине, плавающей в океане, просверлили вертикальный колодец глубиной $H = 200$ м. Какую минимальную работу A необходимо совершить для поднятия из этого колодца ведра с водой массой $m = 10$ кг, если плотность льда на $\alpha = 10\%$ меньше плотности воды?

Д а н о:
$H = 200$ м
$m = 10$ кг,
$\alpha = 10\% = 0{,}10$

$A = ?$

Р е ш е н и е

Систему отсчета свяжем с поверхностью Земли и будем считать ее инерциальной. В качестве физических систем будем рассматривать «льдину» и «ведро с водой – гравитационное поле Земли». Обе физические системы являются незамкнутыми, кроме того, первая из них находится начала отсчета времени, относительно выбранной системы отсчета в состоянии равновесия.



Первую физическую систему опишем условиями равновесия материальной точки в инерциальной системе отсчета, вторую – теоремой об изменении механической энергии.

На льдину действуют: сила тяжести $m\vec{g}$ и выталкивающая сила $\vec{F}_в$, (см. рис.).

Поскольку льдина находится в состоянии равновесия, то $\vec{F}_в + m\vec{g} = \vec{0}$, или в скалярной форме: $mg - F_в = 0$. Таким образом, $\rho g S H = \rho_0 g S(H - h)$, где ρ_0 и ρ_0 –плотности воды и льда соответственно.

Отсюда глубина колодца до поверхности воды в нем

$$h = \frac{(\rho_0 - \rho)H}{\rho_0}.$$

Минимальная работа, совершенная внешней силой при поднятии ведра с водой, равна изменению его потенциальной энергии в гравитационном поле Земли, т. е.

$$A = \Delta E = E_2 - E_1.$$

Нулевой уровень потенциальной энергии выберем на уровне поверхности воды в колодце, тогда начальная энергия $E_1 = 0$. Конечная энергия $E_2 = mgh$. Работа, выполненная при поднятии ведра с водой, $A = E_2 - E_1 = mgh$. Если подставить в последнюю формулу значение h, получим:

$$A = \frac{mg(\rho_0 - \rho)H}{\rho_0}.$$

Численно: $A = 2$ кДж.

Ответ: $A = 2$ кДж,

Задача 8. В деревянный брусок массой $M = 1{,}0$ кг, лежащий на горизонтальной плоскости, попадает пуля массой $m = 10$ г, которая летела горизонтально со скоростью $v_0 = 1{,}0\ \frac{км}{с}$. Пробив брусок, пуля продолжает движение в том же направлении со скоростью $v = 500\ \frac{м}{с}$. Определите модуль перемещения Δr бруска, если коэффициент трения между ним и плоскостью $\mu = 0{,}50$.

Дано:

$M = 1{,}0$кг,

$m = 10$ г$= 1{,}0 \cdot 10^{-2}$кг,

$\upsilon_0 = 1{,}0 \frac{км}{с} = 1{,}0 \cdot 10^3 \frac{м}{с}$,

$\upsilon = 500\ \frac{м}{с}$,

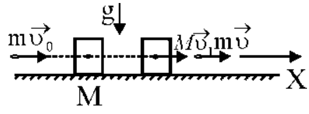
$\mu = 0{,}50$.

$\Delta r = ?$

Решение

Рассмотрим физическую систему, в которую входят пуля и брусок. Физическая система «брусок пуля» является незамкнутой. Однако в горизонтальном направлении внешние силы на нее не действуют. Поэтому для установления связи между параметрами начального и промежуточного состояния системы можно использовать закон сохранения импульса (поскольку импульсы всех тел системы направлены горизонтально).

Начальный импульс системы $\vec{p}_1 = m\vec{v}_0$, конечный импульс – $\vec{p}_2 = m\vec{\upsilon} + M\vec{\upsilon}_1$, где $\vec{\upsilon}_1$ – скорость бруска сразу после столкновения (см. рис.).



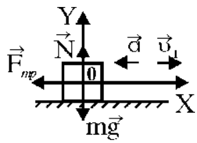
Согласно закону сохранения импульса, $\vec{p}_1 = \vec{p}_2$

или $m\vec{\upsilon}_0 = m\vec{\upsilon} + M\vec{\upsilon}_1$. Начало координат выберем в точке, совпадающей с центром масс бруска. Ось OX направим по движению. Будем считать, что во время движения пули внутри бруска он неподвижен и начинает двигаться в момент вылета пули.

Если перейти к скалярной форме, получим: $m\upsilon_0 = M\upsilon_1 + m\upsilon$.

Откуда $v_1 = \frac{m(v_0 - v)}{M}$. Для определения модуля перемещения бруска после столкновения с пулей рассмотрим физическую систему «брусок после столкновения». Эта физическая система является незамкнутой и может быть описана законами кинематики и динамики, а также теоремой об изменении кинетической энергии. Можно выделить два состояния системы: начальное – в момент сразу после вылета пули и конечное – в момент остановки бруска. Тогда изменение кинетической энергии бруска равно работе силы трения, т. к. работы силы тяжести и силы нормальной реакции плоскости равны нулю, т. е.

$$\Delta E_{\text{к}} = A_{\text{тр}};\ \text{где}\ \Delta E_{\text{к}} = 0 - \frac{M\upsilon_1^2}{2};\ A_{\text{тр}} = F_{\text{тр}}\Delta r\cos 180^{\circ} = -F_{\text{тр}}\Delta r.$$



Для нахождения силы трения используем второй закон Ньютона $M\vec{a} = M\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр}}$ (см. рис.).

Если спроецировать векторы, изображающие физические величины, на ось OY, получим: $N - Mg = 0$. Отсюда $N = Mg$.

По закону Кулона-Амонтона $F_{\text{тр}} = \mu N$, поэтому $F_{\text{тр}} = \mu Mg$. Таким образом, работа силы трения $A_{\text{тр}} = -\mu Mg\Delta r$, т. е. $\frac{M\upsilon_1^2}{2} = \mu Mg\Delta r$. Отсюда $\Delta r = \frac{\upsilon_1^2}{2\mu g}$. Подставив значение υ_1, получим окончательно: $\Delta r = \frac{m^2(\upsilon_0 - \upsilon)^2}{2M^2\mu g}$.

$$\Delta r = \frac{(1{,}0\cdot 10^{-2}\,\text{кг})^2\left(1000\frac{\text{м}}{\text{с}} - 500\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2}{2\cdot(1{,}0\ \text{кг})^2\cdot 0{,}50\cdot 10\frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = 2{,}5\ \text{м}.$$

Ответ: $\Delta r = 2{,}5$ м.

Задача 9. Свинцовые бруски массами $m_1 = 0{,}40$ кг и $m_1 = 0{,}20$ кг движутся по гладкой горизонтальной поверхности навстречу один другому со скоростями, модули которых $v_1 = 2{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$ и $v_2 = 6{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Определите изменение внутренней энергии ΔU брусков при их центральном неупругом столкновении.

Д а н о:	**Р е ш е н и е**
$m_1 = 0{,}40$ кг, $m_2 = 0{,}20$ кг, $\upsilon_1 = 2{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $\upsilon_2 = 6{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. $\Delta U = ?$	Систему отсчета свяжем с поверхностью Земли и будем считать ее инерциальной. В физическую систему оба бруска. Согласно условию задачи трение между брусками и поверхностью стола отсутствует. Поэтому если не учитывать взаимодействие брусков с окружающей средой и теплообмен с поверхностью стола, то выделенная система является замкнутой и может быть описана законами сохранения. Из закона сохранения импульса следует, что полный вектор импульса системы сохраняется.

Поскольку столкновение неупругое, то после него бруски движутся как одно целое, т. е. $m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = (m_1 + m_2)\vec{v}$, или в скалярной форме $m_2v_2 - m_1v_1 = = (m_1 + m_2)v$, откуда модуль скорости обоих брусков после столкновения:

$$v = \frac{m_2v_2 - m_1v_1}{m_1 + m_2}.$$

Полная энергия системы, представляющая собой сумму ее механической и внутренней энергии, также сохраняется. Поэтому изменение полной энергии системы при столкновении равно нулю, т. е. $\Delta U + \Delta E = 0$, где ΔU – изменение внутренней, а ΔE – изменение механической энергии системы. Следовательно, $\Delta U = |\Delta E|$.

Поскольку бруски движутся по горизонтальной поверхности, то потенциальная энергия системы в гравитационном поле Земли при столкновении не изменяется. Поэтому $\Delta E = E_2 - E_1$, где $E_2 = \frac{(m_1+m_2)v^2}{2} = \frac{(m_2v_2-m_1v_1)^2}{2(m_1+m_2)}$ – кинетическая энергия брусков после столкновения, $E_1 = \frac{m_1v_1^2}{2} + \frac{m_2v_2^2}{2}$ – их кинетическая энергия перед столкновением. Тогда $|\Delta E| = \frac{m_1m_2(v_1+v_2)^2}{2(m_1+m_2)}$. Таким образом: $\Delta U = \frac{m_1m_2(v_1+v_2)^2}{2(m_1+m_2)}$.

Если подставить полученные значения ΔU и ΔE в закон сохранения энергии, получим $\Delta U = \frac{0{,}40\text{ кг}\cdot 0{,}20\text{ кг}\left(2{,}0\frac{\text{м}}{\text{с}}+6{,}0\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2}{2(0{,}40+0{,}20)\text{кг}} = 3{,}2$ Дж.

Ответ: ΔU=3,2 Дж.

3.8. <u>Задания для самостоятельного решения</u>

3.8.1. Вопросы

1. В чем заключается закон сохранения импульса? В каких системах отсчета и для каких физических систем он выполняется? Почему он является фундаментальным законом природы?

2. Следствием какого свойства пространства является закон сохранения импульса?

3. Что называется центром масс системы материальных точек? Как движется центр масс замкнутой системы материальных точек?

4. В чем различие между понятиями «энергия» и «работа»?

5. Как найти работу, совершенную переменной силой?

6. Какую работу совершает равнодействующая всех сил, приложенных к телу, которое равномерно движется по окружности?

7. Что такое мощность? Что такое «лошадиная сила»?

8. Дайте определения и выведите формулы для известных вам видов механической энергии.

9. В чем заключается закон сохранения механической энергии? Для каких физических систем он выполняется?

10. Обязательно ли условие замкнутости физической системы для выполнения закона сохранения механической энергии?

11. В чем физическая сущность закона сохранения и превращения энергии? Почему он является фундаментальным законом природы?

12. Следствием какого свойства времени является закон сохранения механической энергии?

13. Почему дверь, прибитая на петлях косо, либо сама открывается, либо сама закрывается?

14. Почему подъемный кран не опрокидывается в сторону поднимаемого груза? Почему без груза кран не опрокидывается в сторону противовеса?

15. При установке стогометателей на колесные трактора колеса должны быть расставлены на максимальную ширину колеи. Почему?

3.8.2. Задачи

1. Зависимость координаты материальной точки массой m = 0,1 кг от времени имеет вид: $x(t) = A + Bt + Ct^2$, где $A = 3{,}0$ м, $B = -12\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $C = 8{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. Определите изменение импульса $\Delta\vec{p}$ этой точки через промежуток времени $\Delta t = 5{,}0\ c$ после начала движения.

2. Железнодорожный вагон массой m, движущийся со скоростью $\vec{\upsilon}$, сталкивается с неподвижным вагоном массой 4т и сцепляется с ним. Определите суммарный импульс $\vec{p}$ обоих вагонов после столкновения.

3. Определите модуль скорости v с которой лосось должен выпрыгнуть из воды, для того чтобы преодолеть водопад высотой h = 2,0 м.

4. Гепард – самое быстрое сухопутное животное. Он может развивать скорость, модуль которой $v = 90\ \frac{\text{км}}{\text{ч}}$, совершая при этом прыжки длиной $l = 25$ см. Оцените приблизительно высоту таких прыжков.

5. Две шайбы двигались по гладкой горизонтальной поверхности вдоль прямой, проходящей через их центры, навстречу друг другу со скоростями, модули которых $v_1 = v_2 = v_0 = 3{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Определите отношение масс этих шайб, если после соударения они стали двигаться вместе со скоростью, модуль которой $v = 1{,}5\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

6. Человек массой m_1 = 70 кг стоит на корме лодки, находящейся в озере. Длина лодки 5 м, масса ее m_2 = 280 кг. На какое расстояние L относительно дна переместится человек после того как он перейдет на нос лодки?

7. Две шайбы движутся по взаимно перпендикулярным направлениям. Масса первой шайбы m_1 = 2 кг, а модуль ее скорости $v_1 = 3{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Масса второй – m_2 = 4 кг, а модуль ее скорости – $v_2 = 2{,}0\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Определите модуль полного импульса системы тел после абсолютно неупругого столкновения.

8. Тело брошено под углом к горизонту со скоростью $\vec{v}_0$. На какой высоте h его кинетическая энергия будет равна половине потенциальной?

9. Какую работу нужно совершить, чтобы лежащий на земле однородный стержень длиной L = 2,0 м и массой m = 100 кг поставить вертикально?

10. Двое рабочих должны выкопать цилиндрический колодец глубиной H. До какой глубины следует копать первому рабочему, чтобы работа оказалась распределенной поровну? Грунт однороден и рабочие поднимают его до поверхности Земли.

11. Определите работу, совершенную силой трения, при соскальзывании тела массой m = 5 кг по наклонной плоскости, образующей угол α = 60° с горизонтом. Длина наклонной плоскости L =1,0 м, коэффициент трения μ = 0,20.

12. Две пружины, жесткости которых $k_1 = 200\ \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ и $k_2 = 400\ \frac{\text{Н}}{\text{м}}$, соединены последовательно друг с другом. Какую работу надо совершить, чтобы растянуть их на Δl = 10 см?

13. Тело брошено вертикально вверх со скоростью, модуль которой $v_0 = 20\frac{\text{м}}{\text{с}}$. На какой высоте h от точки бросания кинетическая энергия тела будет равна его потенциальной энергии?

14. Модуль скорости снаряда массой m = 3 кг в момент вылета из ствола орудия со скоростью $v_0 = 600\frac{\text{м}}{\text{с}}$. Под каким углом α к горизонту вылетел снаряд, если его кинетическая энергия в высшей точке траектории E = 270 кДж?

15. Сани массой m = 50 кг съехали с горы высотой H = 8,0 м и длиной L = 100 м. Определите модуль силы сопротивления, если в конце горы сани достигли скорости, модуль которой $v = 10\frac{\text{м}}{\text{с}}$, если модуль начальной скорости саней $v_0 = 2{,}0\frac{\text{м}}{\text{с}}$.

16. Шар вращается в вертикальной плоскости на нити длиной L. Определите минимальное значение модуля скорости, с которой должен двигаться шар по окружности, чтобы нить была всегда натянутой.

17. С высшей точки гладкой закрепленной полусферы радиусом R без начальной скорости соскальзывает небольшая шайба. На какой высоте h шайба оторвется от поверхности полусферы?

18. Поток воды падает на лопатки турбины со скоростью, модуль которой $v_1 = 10\frac{\text{м}}{\text{с}}$, и возвращается в обратном направлении со скоростью, модуль которой $v_2 = 7{,}5\frac{\text{м}}{\text{с}}$. Определите среднее значение силы, действующей на лопатки водяной турбины, если ежесекундно на них падает вода массой m = 100 кг.

19. Определите среднее значение полезной мощности $\langle P \rangle$ двигателей при разбеге самолета, предназначенного для работ в сельском и лесном хозяйстве, если масса самолета 1 т, длина разбега 300 м, модуль скорости в момент взлета

300 м/с, коэффициент сопротивления 0,03.

20. Из винтовки вылетает пуля. Каким будет соотношение между кинетической энергией винтовки после выстрела и кинетической энергией пули, если допустить свободную отдачу (т. е. движению винтовки не противодействует плечо стрелка)?

21. Радиус лопастей ветродвигателя R = 8,0 м, а его КПД η = 30 %. Определите мощность P двигателя, если модуль скорости ветра $v = 9{,}0\,\frac{\text{м}}{\text{с}}$. Раскройте экологические преимущества использования энергии ветра.

РАЗДЕЛ 4. СТАТИКА

Момент силы. Условия равновесия тел с закрепл енной осью вращения. Центр тяжести тела. Виды равновесия

Простые механизмы и их применение. Коэффициент полезного действия(КПД) *простых механизмов.*

Давление. Закон Паскаля. Гидростатическое давление. Атмосферное давление. Закон Архимеда. Условия плавания тел.

Статика – это раздел механики, в котором изучаются условия равновесия механической системы (тела или нескольких тел) под действием внешних сил.

Моделью механической системы в статике является *абсолютно твердое тело*, т. е. тело, расстояние между двумя любыми точками которого не изменяется при взаимодействии с материальными объектами (телами и полями), которые окружают это тело системы.

4.1. Условия равновесия

Равновесным состоянием (равновесием) механической системы (тела) называют состояние движения системы, не изменяющееся с течением времени. В таком состоянии, по отношению к данной системе отсчета, механическая система (тело) может находиться в покое, двигаться равномерно прямолинейно или равномерно вращаться вокруг какой-нибудь оси, проходящей через центр масс. Если эта система отсчета является инерциальной, то равновесие называется абсолютным, в противном случае – относительным.

В инерциальной системе отсчета абсолютно твердое тело, не имеющее оси вращения (внешние связи «запрещают» вращательное движение), находится в состоянии равновесия, если сумма всех внешних сил, действующих на тело, равна нулю:

$$\sum_{i=1}^{n}\vec{F}_i=\vec{0}. \text{ или } \vec{F}_1+\vec{F}_2+\vec{F}_3+...+\vec{F}_n=\vec{0}$$

* Учитываются все силы, приложенные к телу, включая силы трения и реакции, причем число этих сил в общем случае должно быть не менее трех, поскольку равнодействующая двух сил, направленных под углом друг к другу, отлична от нуля.

* При выполнении этого условия тело либо покоится, либо движется равномерно относительно инерциальной системы отсчета**.**

Абсолютно твердое тело, которое может вращаться вокруг неподвижной относительно инерциальной системы отсчета оси, находится в состоянии равновесии, если сумма моментов всех сил, действующих на тело, относительно любой точки тела (в том числе и точки находящейся на оси) равна нулю:

$$\sum_{i=1}^{n}\vec{M}_0\left(\vec{F}_i\right)=\vec{0}\cdot$$

* При выполнении этого условия тело находящееся в инерциальной системе отсчета, либо покоится, либо равномерно вращается вокруг оси.

* Если все силы находятся в одной плоскости, эта сумма является алгебраической, т. е. $\vec{M}_1 + \vec{M}_2 + \vec{M}_3 + ... + \vec{M}_n = \vec{0}$

* Применяя условие равновесия необходимо помнить, что моменты сил, вращающие тело в направлении движения часовой стрелки, берутся со знаком «минус», а моменты сил, вращающие тело в направлении противоположном движению часовой стрелки, – со знаком «плюс».

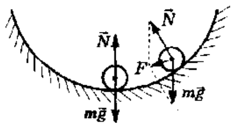
Абсолютно твердое тело с незакрепленной осью вращения **в инерциальной системе отсчета находится в состоянии равновесия, если одновременно выполнены два условия**

$$1. \quad \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + ... + \vec{F}_n = \vec{0};$$

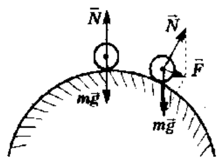
$$2. \quad \vec{M}_1 + \vec{M}_2 + \vec{M}_3 + ... + \vec{M}_n = \vec{0}.$$

Чтобы судить о механическом состоянии абсолютно твердое тело в реальных условиях, нужно знать не только условия, при которых оно находится в равновесии. Необходимо оценить, как будет вести себя тело, если его вывести из равновесного состояния, поскольку при этом возможно появление сил и моментов сил, нарушающих условия равновесия.

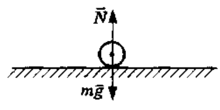
Равновесие называется **устойчивым,** если при отклонении от положения равновесия потенциальная энергия тела, которое находится в гравитационном поле Земли, возрастает, т. е. силы или моменты сил, возникающие при отклонении тела от положения равновесия, возвращают его обратно к положению равновесия (см. рис.)



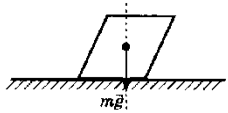
Равновесие называется **неустойчивым,** если при отклонении от положения равновесия потенциальная энергия тела, которое находится в гравитационном поле Земли, уменьшается, т. е. силы или моменты сил, возникающие при отклонении тела от положения равновесия, уводят его дальше от равновесного состояния (см. рис.).

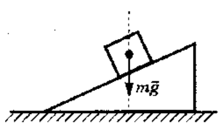


Равновесие называется **безразличным,** если при отклонении от положения равновесия потенциальная энергия тела, которое находится в гравитационном поле Земли, не изменяется, т. е. силы или моменты сил, возникающие при отклонении тела от положения равновесия, скомпенсированы (см. рис.).



Равновесие тела на опоре. Тело, находящееся на опоре, находится в состоянии устойчивого равновесия, если линия отвеса, проведенная через центр масс этого тела, не выходит за рамки контура, ограниченного точка-





ми соприкосновения тела с опорой. Если же эта вертикаль проходит вне указанного контура, то равновесие неустойчивое и при незначительном толчке тело опрокидывается.

Тела находятся в состоянии устойчивого равновесия, если небольшие дополнительные воздействия на тела не смогли вывести их из равновесия. Когда же равновесие тела может быть необратимо нарушено под влиянием небольших воздействий, оно называется неустойчивым.

4.2. Давление

Давление − физическая скалярная величина, введенная для количественного оценивания механического действия одного тела на поверхность другого (например, фундамент здания на грунт, жидкость на стенки сосуда, газ в цилиндре двигателя на поршень) и равная отношению нормальной (перпендикулярной) к поверхности составляющей силы $F_{п}$, действующей на поверхность, к площади S этой поверхности: $p = \frac{F_{п}}{S}$.

Если сила направлена под углом к нормали, то $p = \frac{F \ \cos\alpha}{S}$, где α – угол между силой и нормалью к поверхности. Нормальная составляющая силы, действующей на поверхность, называется **силой давления**, т. е. $F_{д} = F\cos\alpha$. С учетом этого $p = \frac{F_{д}}{S}$.

Модуль силы давления $F_{д} = pS$.

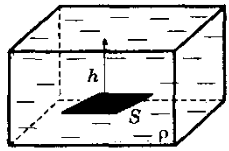
За единицу давления в СИ принят паскаль (Па). 1 Па – давление, которое создает сила 1 Н, равномерно распределенная по нормальной к ней поверхности площадью 1 м^2.

При измерении атмосферного давления допускается внесистемная единица давления – мм рт. ст. (1 мм рт. ст. = 133,3 Па).

Измеряют давление манометрами, барометрами, вакуумметрами, а также различными датчиками давления.

Покоящиеся газы и жидкости создают (благодаря действию силы тяжести) в своем объеме дополнительное гидростатическое давление, которое зависит от глубины погружения и подчиняется закону Паскаля.

В термодинамике давление является важнейшим параметром состояния термодинамической системы и связывает работу A расширения с изменением объема тела ΔV : $p = \frac{A}{\Delta V}$.



Гидростатическое давление – это давление, которое жидкость, находящаяся в гравитационном поле Земли, оказывает на поверхность погруженного в нее тела. Гидростатическое давление определяется выражением $p = \rho g h$, где ρ – плотность жидкости, g – модуль ускорения свободного падения, h – глубина погружения тела относительно поверхности жидкости.

! Гидростатическое давление зависит только от рода жидкости и высоты столба жидкости над площадкой.

! Гидростатическое давление на заданной глубине h в жидкости не зависит от ориентации площадки $p = \rho g h$.

Гидростатическое давление на дно сосуда, где h – высота уровня жидкости в сосуде. Сила гидростатического давления, действующая на дно сосуда $F = \rho g h S_д$, где $S_д$ – площадь дна сосуда.

Гидростатическое давление жидкости на боковую стенку сосуда $p = \frac{\rho g h}{2}$, где h – высота уровня жидкости в сосуде.

Сила гидростатического давления, действующая на боковую поверхность сосуда: $F = \frac{\rho g h S_б}{2}$, где $S_б$ – площадь боковой поверхности сосуда.

Закон Паскаля – давление, создаваемое силами, которые действуют на поверхность жидкости (газа), передается во все точки жидкости (газа) без изменений.

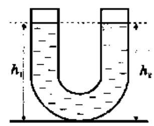
Согласно закону Паскаля давление в сосуде с жидкостью на глубине h равно сумме внешнего атмосферного и гидростатического давлений:

$$p = p_{атм} + \rho g h.$$

4.3. Сообщающиеся сосуды

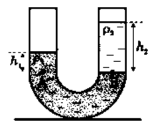
Сообщающимися называют сосуды, которые имеют общий канал, расположенный ниже уровня жидкости, находящейся в этих сосудах.

В открытых сообщающихся сосудах поверхности однородной жидкости устанавливаются на одинаковом уровне независимо от формы сосудов**.** Это утверждение называют первым законом сообщающихся сосудов (см. рис.).



! Уровни жидкости располагаются на одинаковой высоте, если диаметры сообщающихся сосудов такие, что можно пренебречь капиллярными явлениями.

Если в сообщающиеся сосуды налиты две разнородные несмешивающиеся жидкости (см. рис.) с плотностями p_2, то жидкость с большей плотностью опустится вниз и вытеснит жидкость с меньшей плотностью. При условии равновесия гидростатические давления в обоих коленах на выбранном уровне АВ равны, т. е.



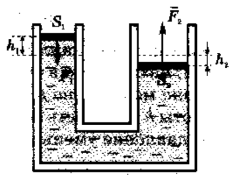
$$p_{атм} + \rho_1 g h_1 = p_{атм} + \rho_2 g h_2 \text{ или } \rho_1 h_1 = \rho_2 h_2. \text{ Откуда } \frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_2}.$$

В открытых сообщающихся сосудах разнородные несмешивающиеся жидкости устанавливаются так, что их высоты над уровнем раздела обратно пропорциональны плотностям жидкостей, т. е. $\rho_1 h_1 = \rho_2 h_2$, где ρ_1 и ρ_2, h_1 и h_2 плотности и высоты столбов жидкости соответственно. Это утверждение называют вторым законом сообщающихся сосудов.

* Если одно из колен сообщающихся сосудов закрыто, то разность уровней жидкости будет зависеть от давления в закрытом колене. На этом основано устройство закрытых манометров.

4.4. Гидравлический пресс

Гидравлический пресс (гидравлическая машина) – простой механизм, предназначенный для передачи давлений по герметичным каналам (трубкам), заполненным жидкостью, с целью преобразования внешних сил. В основе работы гидравлического пресса лежит закон Паскаля. Используется гидравлический пресс в основном для получения больших внешних сил в различных подъемниках. Гидравлический пресс представляет собой два цилиндрических сообщающихся сосуда, заполненных жидкостью (водой или маслом) и закрытых поршнями различной площади.



Принцип действия гидравлического пресса основан на законе Паскаля и свойстве несжимаемости жидкости.По закону Паскаля давление, создаваемое внешней силой $\vec{F}_1$ на поршень сечением $S_{1(}$ передается без изменения его величины на поршень сечением S_2: $p_1 = p_2 \Rightarrow \frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}$. Откуда $F_2 = \frac{F_1 S_2}{S_1}$.

Сила давления $\vec{F}_2$ второго поршня во столько раз больше силы давления первого, во сколько раз площадь второго поршня больше площади первого.

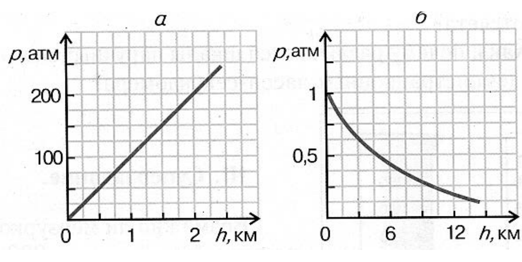
Из свойства несжимаемости жидкости следует, что объем жидкости V_1, вытесненный первым поршнем, равен объему жидкости V_2, прибывшему под вторым поршнем: $V_1 = V_2 \Rightarrow h_1 S_1 = h_2 S_2$. Откуда $h_2 = \frac{h_1 S_1}{S_2}$.

Гидравлический пресс не дает выигрыша в работе: во сколько раз выигрываем в силе, в столько раз проигрываем в расстоянии.

! Гидравлические машины также используются в домкратах для подъема грузов, в тормозных системах и др.

4.5. Атмосферное давление

Воздушную оболочку, окружающую Землю, называют *атмосферой*. Атмосфера удерживается у Земли гравитационными силами. Масса атмосферы составляет примерно $5 \cdot 10^{15}$ т, причем около 90 % этой массы заключено в слое высотой 16 км.



Атмосфера состоит из трех слоев: тропосферы, стратосферы, ионосферы. Находясь в гравитационном поле Земли, атмосфера имеет вес и оказывает давление на опору, т. е. на Землю и на все тела, находящиеся на ее поверхности.

Атмосферное давление обусловлено силой тяжести воздуха, находящего в атмосфере. Атмосферное давление на уровне моря равно $p_{атм}$ = 1,01325·10^5 Па. С увеличением высоты h плотность воздуха, а соответственно и атмосферное давление, уменьшаются.

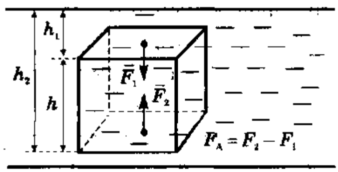
! Давление также измеряют во внесистемных единицах – атмосферах (1 атм ~ 10^5 Па) или мм рт. ст. (1 мм рт. ст. s 133 Па).

4.6. Закон Архимеда. Условия плавания

Закон – открыт древнегреческим ученым Архимедом (около 287-221 гг. до н. э.) и выражает количественную связь между силой, с которой жидкость (газ) выталкивает погруженное в нее (него) тело, плотностью ρ жидкости (газа), объемом V жидкости (газа), вытесненной телом, и ускорением свободного падения g.

Закон гласит: **на тело, погруженное в жидкость или газ, действует выталкивающая сила F, направленная вертикально вверх, модуль которой равен весу жидкости или газа, в объеме погруженной части тела, приложенная в центре этого объема.** $F = \rho g V$.

Возникновение выталкивающей силы обусловлено двумя причинами: весовым давлением жидкости или газа и их свойством передавать это давление по всем направлениям, в частности, на нижнюю часть погруженного тела. Весовым давлением погруженное тело сжимается со всех сторон, но не одинаково. Поэтому сила давления на нижнюю грань куба больше чем на верхнюю (см. рис).



Следовательно, выталкивающая сила возникает вследствие упругого взаимодействия погруженного тела с жидкостью, т. е. имеет электромагнитную природу. Она равна геометрической сумме всех сил давления, действующих со стороны жидкости (газа) на поверхность погруженного в нее тела.

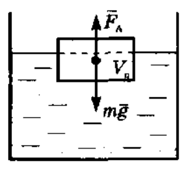
Центр давления – точка, к которой считается приложенной результирующая сил давления, действующих со стороны жидкости или газа на движущееся или покоящееся в них тело.

- Выталкивающая сила действует на тело как в жидкости, так и в газе.
- Выталкивающая сила направлена вертикально вверх.
- Модуль выталкивающей силы равен модулю веса жидкости или газа в объеме тела, если оно погружено целиком.
- Модуль выталкивающей силы равен модулю веса жидкости или газа в объеме погруженной части тела, если тело погружено в них частично.

В земных условиях на тела, которые находятся в жидкости или газе, действуют две противоположено направленные силы: сила тяжести $m\vec{g}$ и сила Архимеда $\vec{F}_A$.

Если $mg > F_в$, т. е. плотность тела $\rho_т$ больше плотности жидкости ρ, тело тонет.

Если $mg = F_в$, $\rho_т = \rho$, тело находится внутри жидкости в состоянии безразличного равновесия (так называемое взвешенное состояние).



Если $mg < F_в$, $\rho_т < \rho$, то тело всплывает. Всплывающее тело будет частично выступать над поверхностью жидкости, поэтому объем погруженной части тела будет уменьшаться и, следовательно, будет уменьшаться сила Архимеда. Всплытие прекратится при условии, что $mg = F_A = \rho_ж g V_п$, где $V_п$ – объем погруженной части тела.

4.7. <u>Примеры решения задач</u>

Задача 1. Под действием груза массой $m = 100$ г, подвешенного к середине горизонтального резинового жгута, половины жгута образовали угол $\alpha = 120^o$ Определите модули сил натяжения каждой половины жгута. Как изменятся модули сил натяжения, если точки подвеса приближать друг к другу.

Д а н о:

$m = 100$ г = 0,10 кг,

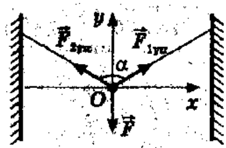
$\alpha = 120^o$,

$g = 10\ \frac{м}{с^2}$.

F – ?

Р е ш е н и е

Систему отсчета свяжем с поверхностью, Земли и будем считать ее инерциальной. Ось OY направим вертикально вверх, ось OX – горизонтально. Груз будем считать материальной точкой. Точка резинового жгута, к которой подвешен груз, находится в состоянии равновесия, поэтому действующая на эту точку внешняя деформирующая жгут сила, модуль которой равен модулю силы тяжести, действующей на груз, скомпенсирована силами упругости, возникшими вследствие деформации обеих половин жгута, т. е. $\vec{F} = \vec{F}_{1уп} + \vec{F}_{2уп}$ (см. рис). Причем модуль деформирующей силы равен модулю силы тяжести действующей на груз, т. е. $F = mg$.



Если жгут считать невесомым, то модули сил $F_{уп1} = F_{уп2} = F_{уп}$ упругости и модули сил $F_{н1} = F_{н2} = F_н$ натяжения деформированных половин жгута равны друг другу. Согласно третьему закону Ньютона, $F_{уп} = F_н$. Если учесть равенство модулей сил упругости и сил натяжения, то, спроецировав векторы, изображающие силы на оси координат, получим: $F_{уп1x} = F_{уп}\sin\frac{\alpha}{2}$, $F_{уп2x} = -F_{уп}\sin\frac{\alpha}{2}$ и $F_{уп1y} = F_{уп2y} = F_{уп}\cos\frac{\alpha}{2}$. Следовательно, модуль деформирующей силы $F_н = F_y = 2F_{уп}\cos\frac{\alpha}{2}$ или $mg = 2F_{уп}\cos\frac{\alpha}{2}$. Откуда, $F_{упр} = \dfrac{mg}{2\cos\frac{\alpha}{2}}$. Поскольку $F_{н1} = F_{н2} = F_н$, то модуль силы натяжения каждой половины жгута $F_н = \dfrac{mg}{2\cos\frac{\alpha}{2}}$.

Подставив числовые значения сил и выполнив вычисления, получим:

$$F_{\text{уп}1} = F_{\text{уп}2} = \frac{mg}{2\cos 60^\circ} = \frac{0{,}10\ \text{кг} \cdot 10\ \frac{\text{Н}}{\text{кг}}}{2 \cdot \frac{1}{2}} = 1{,}0\ \text{Н} \cdot$$

Если точки подвеса *A* и *B* жгута приближать друг к другу, то угол α уменьшается от $\alpha = 120^\circ$ до $\alpha = 0^\circ$, поэтому $\cos\frac{\alpha}{2}$ возрастает, а модули сил натяжения половин жгута уменьшаются. Если $\alpha = 0^\circ$, то $F_{\text{н}}^* = \frac{0{,}10\ \text{кг} \cdot 10\frac{\text{Н}}{\text{кг}}}{2 \cdot 1} = 0{,}5\ \text{Н}$.

Ответ: модуль силы натяжения каждой половины жгута уменьшается от $F_{\text{i}} = 1{,}0$ Н до $F_{\text{i}}^* = 0{,}5\ \text{Н} \cdot$

Задача 2. Брусок длиной $l = 20$ см состоит из двух равных половин: одна – из алюминия, другая – из меди. Определите положение центра тяжести бруска.

Д а н о:

$l = 20$ см = 0,20 м,

$\rho_1 = 2{,}7 \cdot 10^3\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$,

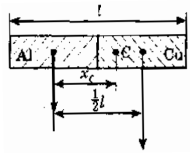
$\rho_2 = 8{,}9 \cdot 10^3\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

---

x_C = ?

Р е ш е н и е

Центр тяжести бруска находится в точке *C* на продольной оси бруска, которая является его осью симметрии (см. рис.). Сила тяжести, действующая на стержень, приложена в центре тяжести стержня и равна равнодействующей сил тяжести, действующих на каждую из его половин, т. е. $m\vec{g} = m_1\vec{g} + m_2\vec{g}$, где m_1– масса алюминия, m_2– масса меди.



Алгебраическая сумма моментов сил $m_1\vec{g}$ и $m_2\vec{g}$ относительно точки *C* равна нулю, т. е. $m_1 g x_C = m_2 g(\frac{l}{2} - x_C)$, где x_C – расстояние от центра алюминиевой половины бруска до его центра тяжести. Следовательно, центр тяжести системы находится на оси бруска на расстоянии $x_C = \frac{m_2 l}{2(m_1 + m_2)}$ от центра алюминиевой половины. Масса

алюминия $m_1 = \rho_1 V_1$, где ρ_1 – плотность алюминия. Масса меди $m_2 = \rho_2 V_2$, где ρ_2 – плотность меди. Подставив найденные значения масс в формулу для расчета x_C, с учетом того, что $V_1 = V_2$, получим окончательно, что центр тяжести бруска находится на оси бруска на расстоянии $x_C = \frac{\rho_2 l}{2(\rho_1 + \rho_2)}$ от центра его алюминиевой половины.

Подставив числовые значения физических величин и выполнив вычисления, получим: $x_c = \frac{8{,}9 \cdot 10^3\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 0{,}20\ \text{м}}{2 \cdot 11{,}6 \cdot 10^3\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = 0{,}077\ \text{м} = 7{,}7\ \text{см}$.. С учетом этого, расстояние от центра тяжести бруска до центра его медной половины

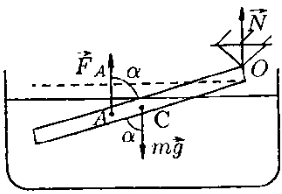
$x_C' = \frac{l}{2} - x_C = 10$ см – 7,7 см = 2,3 см.

Ответ: центр тяжести бруска находится на расстоянии x_C = 7,7 см от центра его алюминиевой половины и на расстоянии x_C' = 2,3 см от центра его медной половины.

Задача 3. Тонкая однородная палочка, нижняя часть которой погружена в воду, шарнирно укреплена за верхний конец. Определите плотность палочки, если в состоянии равновесия палочка расположена наклонно и в воде находится, $L_1 = \frac{2}{3}L$, где L – длина палочки.

Систему отсчета свяжем с поверхностью Земли и будем считать ее инерциальной. Палочку будем рассматривать как абсолютно твердое, тело ось вращения (шарнир) которого закреплена. Гравитационное поле Земли, вода, шарнир и воздух по отношению к палочке являются внешними объектами. Поэтому их воздействие на палочку можно описать, введя соответствующие силы.

Если пренебречь воздействием воздуха, то на палочку действуют: сила тяжести $m\vec{g}$, приложенная в ее центре и направленная вертикально вниз; выталкивающая сила $\vec{F}_{\text{в}}$, приложенная в центре той части палочки, которая находится в воде и направленная вертикально вверх, и сила реакции шарнира $\vec{N}$, направленная вертикально вверх (см. рис.).



Поскольку палочка является телом с закрепленной осью вращения, то для решения задачи достаточно только второго условия равновесия:

$$\sum \vec{M}_0(\vec{F}_i) = \vec{0}.$$

Составим уравнение моментов всех внешних сил, действующих на стержень, относительно шарнира (точка О):

$$\vec{M}_0\left(m\vec{g}\right) + \vec{M}_0\left(\vec{F}_{\text{в}}\right) + \vec{M}_0\left(\vec{N}\right) = \vec{0}.$$

Если учесть, что все силы находятся в одной плоскости, сумма моментов является алгебраической, т. е. $M_0\left(m\vec{g}\right) + M_0\left(\vec{F}_{\text{â}}\right) + M_0\left(\vec{N}\right) = 0$. В этом случае моменты сил, вращающие тело в направлении движения часовой стрелки, берутся со знаком «минус», а моменты сил, вращающие тело в направлении противоположном движению часовой стрелки, – со знаком «плюс», или в явном виде: $-mgl_1 + F_{\text{â}}l_2 = 0$.

Длина палочки L, а угол, который она образует с вертикалью, α, поэтому

$$l_1 = \frac{1}{2}L\sin\alpha;\ l_2 = \frac{2}{3}L\sin\alpha.$$

Масса палочки $m = \rho V$, где $\rho -$ плотность вещества палочки, V – ее объем.

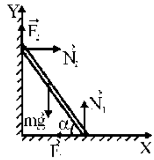
По закону Архимеда $F_в = \frac{2\rho_0 gV}{3}$, где $\rho_в$ – плотность воды. Если подставить значения l_1, l_2, m и $F_в$ в уравнение моментов, получим: $\rho_{\hat{a}} \cdot \frac{2}{3}V \cdot \frac{2}{3}gL\sin\alpha = \rho Vg\frac{L}{2}\sin\alpha.$ Откуда искомая плотность палочки $\rho = \frac{8}{9}\rho_в$.

Численно, $\rho = \frac{8}{9} \cdot 1{,}0 \cdot 10^3 \frac{кг}{м^3} = 890\ \frac{кг}{м^3}$.

Ответ: $p = 890\frac{кг}{м^3}$

Задача 4. При каком наименьшем угле наклона к горизонту лестница, приставленная к стене, будет находиться в равновесии, если коэффициент трения между лестницей и полом равен μ_1,а между лестницей и стенкой – μ_2 ?

Решение. Анализ описанной в задаче физической ситуации показывает, что если в качестве физической системы выбрать лестницу и считать ее абсолютно твердым телом, находящимся в состоянии покоя в инерциальной системе отсчета, связанной с поверхностью Земли, то геометрическая сумма действующих на лестницу сил и алгебраическая сумма моментов этих сил относительно любой точки, лежащей в плоскости действия сил, должны быть равными нулю.



Если не учитывать выталкивающую силу со стороны воздуха, то на лестницу действует сила тяжести $m\vec{g}$, приложенная в ее центре и направленная вертикально вниз, сила нормальной реакции пола $\vec{N}_1$, направленная вертикально вверх, сила нормальной реакции стены $\vec{N}_2$, направленная горизонтально, сила трения покоя между лестницей и полом $\vec{F}_1$, и сила трения покоя между лестницей и стеной $\vec{F}_2$ (см. рис.).

По первому условию равновесия

$$m\vec{g} + \vec{N}_1 + \vec{N}_2 + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0}\cdot$$

Если спроецировать векторы, изображающие физические величины, на оси *OX* и *OY*, получим:

$$\begin{cases} N_2 - F_1 = 0, \\ N_1 + F_2 - mg = 0, \end{cases}$$

т. е. $F_1 = N_2$, $F_2 = mg - N_1$. С учетом того, что $F_1 \le \mu_1 N_1$ и $F_2 \le \mu_2 N_2$, получим: $N_2 \le \mu_1 N_1$, $mg \le (\mu_1\mu_2 + 1)N_1\cdot$

Поскольку в двух последних неравенствах имеются три неизвестные величины, составим уравнение моментов относительно точки соприкосновения лестницы с полом: $\vec{M}_A(m\vec{g}) + \vec{M}_A(\vec{N}_1) + \vec{M}_A(\vec{F}_1) + \vec{M}_A(\vec{N}_2) + \vec{M}_A(\vec{F}_2) = \vec{0}$, или в явном виде: $\frac{1}{2}mgl\cos\alpha - N_2 l\sin\alpha - F_2 l\cos\alpha = 0$, где l – длина лестницы, α – угол наклона лестницы к горизонту. Если подставить в последнюю формулу значение $F_2 = mg - N_1$, получим:

$$(2N_1 - mg)\cos\alpha = 2N_2\sin\alpha \text{, откуда } \mathrm{tg}\alpha = \frac{2N_1 - mg}{2N_2}.$$

С учетом неравенств для N_1 и N_2 получим: $\mathrm{tg}\alpha \geq \frac{1-\mu_1\mu_2}{2\mu_1}$.

Отсюда $\mathrm{tg}\alpha_{\min} = \frac{1-\mu_1\mu_2}{2\mu_1}$ или $\alpha_{\min} = \mathrm{arctg}\left(\frac{1-\mu_1\mu_2}{2\mu_1}\right)$.

4.8. Задания для самостоятельной работы

4.8.1. Вопросы

1. Почему овес мало страдает от ветра: почти никогда не полегает и не ломается?

2. Многие кости животных и человека имеют на концах утолщения. Объясните назначение этих утолщений с точки зрения механики?

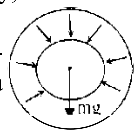
3. Почему человек, тело которого легче воды, может утонуть, а лошадь и другие животные сразу начинают хорошо плавать, даже если до этого ни разу не были в воде?

4. Большими хранилищами влаги являются ледники. В них сосредоточено до 2,1 % мировых запасов воды. Если бы ледники растаяли, то изменился ли уровень воды мирового океана?

5. Почему шатуны двигателей внутреннего сгорания изготовляют из профилей двутаврового сечения?

6. Почему обычно сплошные брусья, подвергающиеся изгибу, заменяют трубчатыми конструкциями?

7. Давление воздуха во всех частях камеры автомобильного колеса одинаково. Кроме давления воздуха на обод действует сила тяжести (см. рис.), что удерживает обод в состоянии равновесия?



8. Почему хвостовое оперение у скоростных самолетов устанавливают значительно выше плоскости крыльев?

9. Надувной матрац наполнен воздухом. В каком случае давление воздуха в матраце будет больше: когда человек станет на него или ляжет?

10. Почему нельзя работать тракторным стогометателем при сильном ветре?

11. Оцените силу натяжения бельевой веревки, на которой висит мокрое белье.

12. Для отделения зерен ржи от ядовитых рожков спорыньи их смесь высыпают в воду. Зерна ржи и спорыньи в ней тонут. Затем в воду добавляют соль. Рожки начинают всплывать, а рожь остается на дне. Объясните это явление.

4.8.2. Задачи

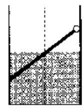
1. Груз массой m подвешен к горизонтальной балке на двух тросах равной длины, угол между которыми α = 120°. Найдите силы натяжения каждого троса.

2. Бетонный столб массой $m = 200$ кг лежит на земле. Определите модуль минимальной силы F, которую нужно приложить к столбу, чтобы приподнять один из его концов?

3. На тело массой $m = 2$ кг, покоящееся на наклонной плоскости с углом при основании α = 30°, действует прижимающая сила, модуль которой $F = 10$ Н направленная горизонтально. Определите модуль силы трения $F_{тр}$.

4. У однородного вала отрезали конец длиной $l = 40$ см. На какое расстояние x от середины вала сместился его центр тяжести?

5. Два однородных шара массами $m_1 =$ 5 кг и $m_2 = 7$ кг и радиусами $R_1 =$ 0,6 м и $R_2 = 0{,}4$ м соединены однородным стержнем массой $m = 3$ кг и длиной $l = 0{,}2$ м. На каком расстоянии x от середины стержня находится центр тяжести системы?



6. Палочка массы m_1 = 400 г наполовину погружена в воду под углом α = 45° к горизонту (см. рис.). С какой силой давит на стенку цилиндрического сосуда нижний конец палочки? Трением пренебречь.

7. На плоскости, образующей угол α = 45° с горизонтом, стоит невесомый цилиндрический сосуд радиусом $R = 10$ см. Сколько литров воды можно налить в этот сосуд, прежде чем он опрокинется? Плотность воды $\rho = 1{,}0 \cdot 10^3 \frac{кг}{м^3}$.

8. Определите максимальное значение массы m груза, который может поднять под действием своего веса человек массой M = 75 кг, пользуясь системой, состоящей из одного неподвижного и одного подвижного блоков?

9. Мензурка с площадью дна S = 10 см соединена тонким шлангом с мензуркой вдвое меньшего диаметра. Определите высоту h воды в широкой мензурке, если в систему налито V = 0,5 л воды.

10. В узкой вертикально расположенной пробирке налита вода. Определите угол α отклонения (в градусах) пробирки от вертикали при котором давление воды на ее дно уменьшится в два раза?

11. Тело с плотностью, составляющей 0,75 плотности воды, плавает в воде. Какая часть объема тела находится в воздухе?

12. Каким должен быть объем V полости железного буя для того, чтобы он мог плавать на поверхности воды? Объем буя V, плотность железа ρ_1, плотность воды ρ_2.

13. Сколько туристов могут, не замочив ноги, переправится через реку на плоту из 10 дубовых бревен объемом 0,3 м^3 каждое? Средняя масса туриста с рюкзаком 75 кг, плотность дуба $\rho = 800 \frac{кг}{м^3}$.

14. Определите работу A по подъему железной плиты массой $m = 700$ кг со дна водоема глубиной $H = 6$ м на высоту h = 8 м над поверхностью воды.

15. Рассчитайте давление p воды: а) на самой большой глубине Тихого океана $H = 11035$ м; б) на наибольшей глубине Азовского моря $h = 14$ м.

16. Предположим, что человек может понизить давление в легких на $\Delta\rho$ = 80 мм ртутного столба ниже атмосферного. На какую высоту h ему удастся втянуть воду по соломинке?

Содержание

Учебно-методичекое пособие

Малишевский Виктор Феликсович
Луцевич Александр Александрович

ВСПОМНИМ ШКОЛЬНУЮ ФИЗИКУ. МЕХАНИКА
(В ПОМОЩЬ ПЕРВОКУРСНИКУ)

Редактор: *Корзун Е. В.*
Компьютерная верстка: *Богданова А. А.*
Технический редактор: *Корзун Е. В., Богданова А. А.*

Подписано в печать 27.02.2014. Формат 60×90/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Ризография.
Усл. печ. л. 7,46. Уч.-изд. л. 4,76. Тираж 70 экз.
Заказ № 240

ЛИ №02330/993 от 31.08.2011 г.
Республика Беларусь, 220070, г. Минск, ул. Долгобродская, 23
E-mail: info@iseu.by
http:// www.iseu.by