ИНЖЕНЕРЫ
БУДУЩЕГО

ФИЗИКА

9

Часть 1

УГЛУБЛЁННЫЙ
УРОВЕНЬ

ФИЗИКА

ИНЖЕНЕРЫ БУДУЩЕГО

9 КЛАСС

Углублённый уровень

Учебник

В двух частях

Часть 1

Под редакцией Ю. А. Панебратцева

Допущено Министерством просвещения
Российской Федерации

МОСКВА
«ПРОСВЕЩЕНИЕ»
2024

УДК 373.167.1:53+53(075.3)
ББК 22.3я721.6
Ф50

Учебник и разработанное в комплекте с ним учебное пособие допущены к использованию при реализации основных образовательных программ начального общего, основного общего, среднего общего образования в соответствии с Приказом Министерства просвещения Российской Федерации № 858 от 21.09.2022 г. (в ред. Приказа Минпросвещения России № 119 от 21.02.2024 г.).

Авторы: В. В. Белага, Н. И. Воронцова, И. А. Ломаченков, Ю. А. Панебратцев

Ф50 **Физика** : инженеры будущего : 9-й класс : углублённый уровень : учебник : в 2 частях / В. В. Белага, Н. И. Воронцова, И. А. Ломаченков, Ю. А. Панебратцев ; под ред. Ю. А. Панебратцева. — Москва : Просвещение, 2024.
ISBN 978-5-09-112672-3.
Ч. 1. — 256 с. : ил.
ISBN 978-5-09-112673-0.

Общая концепция учебно-методического комплекса, который включает печатные издания и электронные ресурсы, в том числе сайт поддержки УМК, разработана научными сотрудниками Объединённого института ядерных исследований, преподавателями Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» и специалистами Госкорпорации «Росатом» в соответствии с требованиями ФГОС ООО от 31.05.2021 г. и Федеральной рабочей программой по физике углублённого уровня от 18.05.2023 г.

Данный учебник продолжает предметную линию «Инженеры будущего» по физике, предназначенную для организации предпрофильной подготовки учащихся. Материал учебника выстроен в логике деятельностного подхода. Система заданий направлена на формирование важных компетенций, которые позволяют: научно объяснять природные и технологические явления; применять методы естественно-научного исследования и предлагать научные способы решения проблем. Помимо предметного содержания, в курсе заложено развитие представлений о сферах профессиональной деятельности, связанных с современным естествознанием.

УДК 373.167.1:53+53(075.3)
ББК 22.3я721.6

Учебное издание

Белага Виктория Владимировна, **Воронцова** Наталия Игоревна,
Ломаченков Иван Алексеевич, **Панебратцев** Юрий Анатольевич

ФИЗИКА

Инженеры будущего
9 класс

Углублённый уровень

Учебник
В двух частях
Часть 1

Центр развития углублённого и профильного образования,
функциональной грамотности

Ответственный за выпуск *Н. В. Мелешко*. Художественный редактор *Т. В. Глушкова*
Художник *В. С. Давыдов*. Технический редактор *Е. А. Урвачева*
Компьютерная вёрстка *О. Ю. Мызниковой*. Корректор *О. А. Мерзликина*
Фотографии фотобанков *Schutterstock/FOTODOM, Лори*

Подписано в печать 24.04.2024. Формат 84×108/16. Гарнитура SchoolBookSanPin.
Уч.-изд. л. 14,25. Усл. печ. л. 26,88. Тираж экз. Заказ .

Акционерное общество «Издательство «Просвещение». Российская Федерация,
127473, г. Москва, ул. Краснопролетарская, д. 16, стр. 3, помещение 1Н.

Адрес электронной почты «Горячей линии» — **vopros@prosv.ru**.

ISBN 978-5-09-112673-0 (ч. 1)
ISBN 978-5-09-112672-3

ВВЕДЕНИЕ

Слово «инженер» берёт своё начало от латинского *ingenium*, что означает «врождённая способность», «дарование», «ум», «изобретательность». Во все эпохи развития человечества инженерная деятельность была чрезвычайно важна, именно она обеспечивала соответствующее состояние техники и технологии, уклад жизни и способствовала техническому прогрессу. Сегодня профессия инженера является одной из наиболее востребованных, ведь с увеличением скорости изменений, происходящих практически во всех областях техники и технологий, растёт потребность в высококвалифицированных специалистах, способных не только производить и совершенствовать существующие технические устройства, но и создавать новые.

Курс физики является одним из ключевых курсов при подготовке специалистов, планирующих заниматься инженерной деятельностью. Физика изучает общие закономерности явлений природы, её понятия и законы лежат в основе всего естествознания.

Физика — это экспериментальная наука. Её законы основываются на фактах, установленных при помощи опытов. Открывая физические законы, человек смог применять их для своих целей: создал мощнейшие машины и механизмы, научился управлять внутриядерной энергией, вышел в космическое пространство. Работа технических устройств, с которыми человек сталкивается дома, на работе и на улице, без которых сегодня немыслима жизнь человечества, основана на правильном применении законов природы, изучаемых физикой.

Физика — точная наука и изучает количественные закономерности явлений, которые записываются в виде формул, поэтому физика «говорит» на языке математики.

Современная физика — это бурно развивающаяся наука, охватывающая многие области знаний человечества.

Материал учебника разделён на тематические главы, которые состоят из параграфов. В начале каждой главы приводится высказывание одного из великих учёных, которое отражает суть содержания темы.

В тексте каждого параграфа важные для осмысления и запоминания термины и понятия выделены **жирным** шрифтом или *курсивом*.

Каждый параграф начинается с вводных рубрик «Новое в уроке» и «Повторим изученное». Рубрика **«Новое в уроке»** познакомит вас с основными вопросами, которые изучаются в параграфе. Рубрика **«Повторим изученное»** подскажет, что необходимо вспомнить из ранее изученного материала, для того чтобы усвоить новый.

Текст, содержащийся в рубрике **«Важно!»**, отражает ключевые аспекты изучаемого материала, а также наиболее важные формулы, термины и физические законы.

Информация о традиционном эксперименте, на основе которого строится объяснение материала параграфа, выделена в рубрике **«Исследование»**.

В рубрике **«Это интересно»** изучаемый материал иллюстрируется интересными историческими фактами и сведениями, примерами технических устройств и явлениями повседневной жизни.

В рубрике **«Применяем в профессии»** изучаемый материал дополняется примерами, которые могут быть использованы в инженерных профессиях.

Рубрика **«Сделай сам!»** поможет вам самостоятельно провести эксперименты по тематике изучаемого материала.

Увидеть взаимосвязь физики с другими учебными дисциплинами, которые вы изучаете в школе, поможет рубрика **«Межпредметные связи»**. Эта рубрика является подсказкой, которая нацелит вас на выполнение следующих заданий:
— приведите дополнительные примеры использования понятий, моделей и законов физики в других областях знаний;
— подготовьте сообщение для своих одноклассников о связях между науками.

математика
геометрия
география
биология/экология
технология
физкультура
химия

Рубрика **«Физика в жизни»** рассказывает о применении знаний, полученных в параграфе, в окружающем нас мире.

В конце каждого параграфа приведены **«Выводы»** к параграфу и **«Ключевые слова»** — основные понятия, новые термины, которые нужно запомнить и по которым можно осуществить поиск дополнительной информации в Интернете.

Завершают параграф **«Вопросы и задания»**, ответы на которые помогут вам закрепить изученный материал и проверить свои знания.

В каждой главе содержатся параграфы: «Решение задач», «Лабораторные и исследовательские работы», «Кейс». В параграфе **«Решение задач»** рассматриваются примеры решения физических задач и приводятся **«Задачи для самостоятельного решения»**, которые помогают закрепить и лучше понять изученный материал. Параграф **«Лабораторные и исследовательские работы»** содержит обязательные лабораторные работы, которые выполняются в классе, и практические работы-исследования, предназначенные для самостоятельного выполнения в классе или дома. **«Кейс»** включает проектно-исследовательское задание, в ходе выполнения которого решаются интересные, полезные и связанные с реальной жизнью задачи.

Завершает каждую главу раздел **«Подведём итоги»**, в котором приводятся основные выводы и идеи, содержащиеся в главе. Вопросы в рубрике **«Вопросы для обсуждения»** носят проблемный характер и могут стать интересной темой для дискуссии. Возможные темы для сообщений приведены в рубрике **«Темы исследовательских и проектных работ»**.

Желаем вам успехов на пути получения новых знаний!

Глава 1

ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ

Если из двух человек один движется с кораблём, а второй стоит неподвижно на берегу... то нет никакого преимущества ни в движении первого, ни в покое второго.

Р. Декарт

§ 1 МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ. СИСТЕМА ОТСЧЁТА

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое поступательное движение.
- Что такое материальная точка.
- Что такое система отсчёта.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое механическое движение?
- Что такое система координат?

Девизом легендарного корабля «Наутилус», который придумал выдающийся писатель-фантаст Жюль Верн, стали слова «Mobiles in Mobile» — подвижный в подвижном. Этот девиз удивительно точно описывает непрерывное движение, происходящее в окружающем нас мире.

МЕХАНИКА И МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ. Движение тел изучается в разделе физики, который называется **механикой.** По целям и задачам, а также по методам исследования механика подразделяется на *кинематику*, *динамику* и *статику*, которые в совокупности выражают собой общие законы движения тел.

Раздел механики, в котором рассматривается движение тел без выяснения причин этого движения, называется **кинематикой** (от греч. *kinema* — движение). Раздел механики, в котором изучаются причины движения, называется **динамикой** (от греч. *dinamis* — сила, мощь). Раздел механики, в котором изучаются условия равновесия тел, называется **статикой** (от греч. *statos* — неподвижный).

Для изучения движения тел необходимо научиться его описывать. Сначала мы научимся описывать движение тела без исследования причин, его вызывающих.

Напомним, что **механическим движением** тела называется изменение положения тела в пространстве относительно других тел с течением времени.

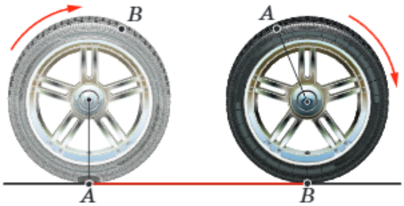
Когда тело с течением времени изменяет своё положение в пространстве, оно движется по некоторой линии, называемой **траекторией** движения тела.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Основы физики, и в первую очередь механики, стали закладываться 2500 лет назад. Главным образом это связано с именем древнегреческого философа Аристотеля. Его основной вклад в развитие науки состоит в том, что он собрал и систематизировал практически все знания (по естествознанию, истории, политике, этике, литературе, философии и т. д.), накопленные к тому времени человечеством. Более двух тысяч лет авторитет Аристотеля считался непререкаемым.

«Отцом современной физики и фактически современного естествознания вообще» А. Эйнштейн назвал Галилео Галилея, жившего около 450 лет назад. В отличие от Аристотеля, опиравшегося на очевидность, Галилей опирался на математику, на эксперимент как метод исследования, на мысленный идеализированный эксперимент и на количественный анализ.

ПОСТУПАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ. При движении тела траектории различных его точек могут быть различны. Например, точки на оси вращения движущегося колеса и на его ободе описывают разные траектории. Но если машина движется прямолинейно по автомагистрали, то в любой момент времени все точки её кузова движутся одинаково.



Движение тела, при котором все его точки движутся одинаково, описывая одинаковые траектории, называется **поступательным движением**.

При поступательном движении все точки тела описывают одинаковые траектории и в каждый момент времени имеют одинаковые скорости и ускорения.

Для того чтобы понять, является ли движение тела поступательным, надо рассмотреть характер движения отрезка, соединяющего любые две точки тела. При поступательном движении этот отрезок в любой момент времени остаётся параллельным своему первоначальному положению. Например, стропы воздушного шара, с помощью которых крепится его корзина, движутся поступательно.

В машинах и механизмах, к которым мы привыкли, используются различные приспособления, позволяющие преобразовывать поступательное движение во вращательное (т. е. движение по окружности) или, наоборот, вращательное движение в поступательное.

МАТЕРИАЛЬНАЯ ТОЧКА. Для описания движения тела нужно знать, как движутся различные его точки. В некоторых случаях размеры тела можно не принимать во внимание и рассматривать тело как *материальную точку*.

Материальная точка — это тело, размерами которого в данных условиях можно пренебречь. Например, при описании движения автомобиля из одного города в другой размеры автомобиля значения не имеют. Однако ответ на вопрос о том, можно ли считать тело материальной точкой, зависит не от размеров тела, а от конкретной ситуации.

Понятие материальной точки является *моделью*, позволяющей упростить изучение движения реального тела при определённых условиях.

ТЕЛО ОТСЧЁТА. Всякое движение тела *относительно*, поэтому обязательно необходимо указать, относительно каких тел происходит это движение. Однако не только движение, но и состояние покоя тела относительно.

Например, что можно сказать о движении книги, лежащей на столе в купе движущегося поезда? Она покоится относительно стола, движется вместе с поездом относительно Земли, сама Земля вращается вокруг своей оси и движется по определённой орбите относительно Солнца. Следовательно, движение тела можно рассматривать по отношению к различным телам. Тело, по отношению к которому рассматривается данное механическое движение, называется **телом отсчёта**.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

В древности Земля представлялась центром мироздания. Было естественно считать, что вокруг неподвижной Земли вращаются другие небесные тела. *Геоцентрическая* (от греч. *geo* — Земля) система мира — это учение, согласно которому центром Вселенной является Земля с обращающимися вокруг неё Луной, Солнцем.
В середине XVI в. революцию в науке произвёл польский учёный Николай Коперник. Он задался простым вопросом: «Как бы выглядело звёздное небо, если смотреть на него с Солнца?» Ответом стала *гелиоцентрическая* система (от греч. *gelios* — Солнце), в которой Земля, вращающаяся вокруг своей оси, вместе с другими планетами обращается вокруг Солнца.

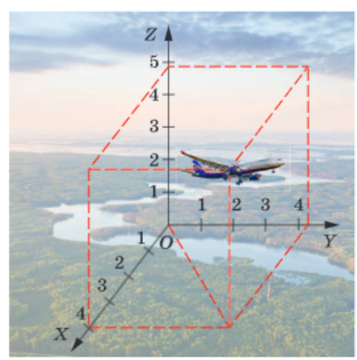
СИСТЕМА ОТСЧЁТА. Для определения положения тела в пространстве используют *систему координат, связанную с телом отсчёта*.

При прямолинейном движении тела для определения его положения достаточно одной координатной оси. Например, если автомобиль движется по прямой дороге, то его движение описывают одной координатой. Одной координатой можно также описать прямолинейное движение тележки по столу.

Для описания движения на плоскости используется *прямоугольная система координат*, состоящая из двух взаимно перпендикулярных осей; такая система ещё называется *декартовой системой координат*. Например, когда автомобиль едет из одного города в другой, его движение, как правило, является криволинейным и описывается двумя координатами.

В случае, когда тело перемещается в пространстве, необходимо использовать *трёхмерную систему координат*. Это нужно, например, для описания движения самолёта, космического корабля и т. д.

Двухмерная система координат



Трёхмерная система координат

Задача механики — описать движение тела, т. е. изменение его положения в пространстве, с течением времени.

Положение точки в пространстве относительно начала координат задаётся её координатами x, y, z. Обычно координата — это длина, значит, её определение сводится к измерению длины, т. е. к сравнению с эталоном длины.

В системе СИ единицей длины является *метр*.

Измерение длины непосредственным прикладыванием эталона называют *прямым измерением*. Однако такие измерения не всегда возможны. В этих случаях применяют *косвенные методы*, при которых значение физической величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, измеряемыми напрямую.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Система координат используется не только на уроках физики или математики, мы применяем её и в нашей повседневной жизни. Например, на двухмерной системе координат основаны такие игры, как шахматы или морской бой. Дисплеи компьютеров, телефонов и других цифровых устройств также используют двухмерную систему координат. Географическая система координат состоит из линий широты и долготы и необходима для определения местоположения объекта на Земле. В астрономии для определения положения небесных объектов используется астрономическая система координат.

В задачах, требующих определения пути, пройденного телом за определённый промежуток времени, или его скорости, одной системы координат недостаточно. Кроме этого, необходимы ещё приборы для измерения времени — *часы*.

ВАЖНО

Тело отсчёта, связанная с ним система координат и часы для отсчёта времени образуют **систему отсчёта**, позволяющую определять положение движущегося тела в любой момент времени.

ВЫВОДЫ

- Механическим движением тела называется изменение положения тела в пространстве относительно других тел с течением времени.
- Тело отсчёта, связанная с ним система координат и часы для отсчёта времени образуют систему отсчёта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Механика; кинематика; динамика; статика; механическое движение; поступательное движение; материальная точка; система отсчёта

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Какое движение называется поступательным движением? Приведите примеры поступательного движения.
2. Вы поднимаетесь на лифте. Можно ли движение лифта считать поступательным?
3. Приведите примеры, в каких случаях тело можно считать материальной точкой, а в каких нет.
4. Что образует систему отсчёта?

§ 2 СПОСОБЫ ОПИСАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ

НОВОЕ В УРОКЕ

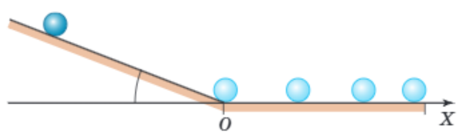
- Какие способы описания движения существуют в механике.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое механическое движение?
- Что такое тело отсчёта и система отсчёта?

Основная задача механики — описать механическое движение тел. Это означает, что необходимо определить положение движущегося тела в любой момент времени, т. е. научиться отвечать на вопросы: где находится тело в данный момент времени и в каких точках пространства оно будет находиться в следующие моменты времени. Существует три способа описания механического движения: *табличный*, *графический* и *аналитический*.

ТАБЛИЧНЫЙ СПОСОБ ОПИСАНИЯ ДВИЖЕНИЯ. Для того чтобы определить положение тела в пространстве в данный момент времени, необходимо выбрать систему отсчёта. Рассмотрим движение шарика по столу после скатывания с наклонной плоскости. В качестве тела отсчёта выберем стол, а за начало отсчёта примем точку на конце наклонной плоскости. Координатную ось OX направим по направлению движения шарика. Для измерения времени используем секундомер.



При движении шарика его положение изменяется с течением времени относительно выбранного тела отсчёта. Будем фиксировать положения шарика в определённые моменты времени и записывать данные в таблицу. В первом столбце таблицы записывают значения моментов времени, а во втором столбце — соответствующие положения, или *координаты,* тела. Такой способ описания движения называется **табличным.**

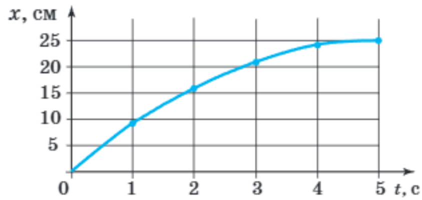
Время t, с	Координата x, см
0	0
1	10
2	18
3	24
4	28
5	30

Табличный способ описания движения тела является достаточно простым и часто используется на практике. Очевидно, что этот способ не является точным, поскольку по данным таблицы нельзя сказать, где находилось тело в моменты времени, не указанные в ней. Для более детального описания необходимо определять координаты через малые интервалы времени и заносить их в таблицу.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Табличное описание движения можно встретить в расписании рейсовых автобусов или электропоездов, где указывается время остановки на определённой станции.

ГРАФИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПИСАНИЯ ДВИЖЕНИЯ. Для большей наглядности результаты измерений часто изображают графически. Для построения графика движения тела на горизонтальной оси (*абсцисс*) откладывают время, а на вертикальной оси (*ординат*) — соответствующие значения координат. Выставленные на координатной плоскости точки соединяют линией и получают *график зависимости координаты от времени*.



Построим график для движения шарика по данным из таблицы, приведённой выше. По форме получившегося графика можно узнать о скорости тела — изменяется она или остаётся постоянной. Об анализе графиков вы узнаете на следующих уроках.

Важно понимать, что график движения показывает, как изменяется координата тела со временем, но по графику ничего нельзя сказать о траектории движения тела. Например, в рассматриваемом примере траектория шарика — прямая линия, но графиком движения является кривая.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПИСАНИЯ ДВИЖЕНИЯ. Как отмечалось выше, при движении тела в каждый момент времени t тело имеет определённую координату x. Зависимость координаты тела от времени можно записывать в виде математической формулы, т. е. как функцию времени:

$$x = f(t). \tag{1}$$

В зависимости от вида движения в каждом конкретном случае функция (1) будет иметь определённый вид. Например, для рассматриваемого движения шарика функцию времени можно записать как $x = 10t - t^2$ (в см).

Представление зависимости координаты тела от времени в виде функции времени называется **аналитическим способом описания движения.** Это наиболее полный и точный способ описания движения. Зная функцию времени, можно найти координату тела в любой момент времени и построить график движения для любого интервала времени. Но для сложных видов движения найти точное аналитическое описание является достаточно трудной задачей.

ВЫВОД

Существует три способа описания механического движения: табличный, графический и аналитический.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Способы описания движения: табличный, графический, аналитический

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. В чём заключаются табличный, графический и аналитический способы описания движения?
2. Можно ли по табличному способу описания определить вид механического движения? Ответ поясните.
3. Какой из способов описания движения является наиболее наглядным?
4. Зависит ли способ описания движения от выбора системы отсчёта? Ответ поясните.

§ 3 ПЕРЕМЕЩЕНИЕ

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое перемещение.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое механическое движение?
- Что такое система отсчёта?

При механическом движении положение тела в пространстве изменяется с течением времени. Раньше мы использовали понятие *путь* — длина траектории, пройденной телом за время наблюдения. Путь является величиной скалярной, т. е. не имеющей направления.

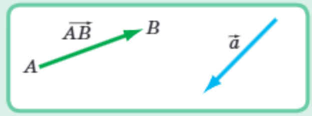
ПЕРЕМЕЩЕНИЕ. Для решения практических задач недостаточно знать только путь. Например, с лыжной базы вышел лыжник и за 2 ч прошёл путь, равный 15 км. Как определить, куда он пришёл? Он мог дойти до города — путь *Б*, а мог вернуться обратно — путь *А*. Лыжник мог оказаться в любой точке внутри круга радиусом 15 км.

Чтобы избежать такой неопределённости, вводится понятие *перемещение*. **Перемещение** — направленный отрезок, соединяющий начальное и конечное положения тела. Таким образом, перемещение — величина *векторная*, т. е. имеющая направление и модуль. Модуль перемещения определяет кратчайшее расстояние между начальной и конечной точками движения. Перемещение обозначается символом $\vec{s}$, а его модуль обозначается либо s, либо $|\vec{s}|$.

Физические величины бывают *векторными* и *скалярными*. **Скалярная** физическая величина характеризуется числовым значением и не имеет направления. Примерами скалярных величин могут служить путь, время, масса, энергия, работа и т. д.

Векторная величина характеризуется численным значением и направлением. Примерами векторных физических величин являются сила, скорость, перемещение и др. Понятие вектора является одним из важнейших как в физике, так и в математике.

Вектором называется направленный отрезок. Один из концов отрезка, например *A*, называется началом, а другой, например B, — концом. Обозначают вектор либо указанием начала и конца отрезка AB ($\overrightarrow{AB}$), либо строчной латинской буквой со стрелкой над ней ($\vec{a}$).



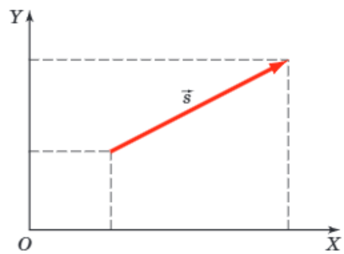
Длиной (значением, модулем) вектора называется длина отрезка, изображающего вектор. Модуль вектора обозначается $|\vec{a}|$ или $|\overrightarrow{AB}|$.

Единицей перемещения (его модуля), как и единицей пути, является *метр*.

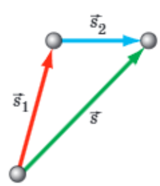
Изменение положения тела в пространстве можно изобразить графически, используя понятие перемещения и систему координат. Для этого надо соединить точку, соответствующую начальному положению тела, с точкой, соответствующей конечному положению тела.

Таким образом,

если известно начальное положение тела и вектор перемещения, можно однозначно определить конечное положение тела в пространстве.



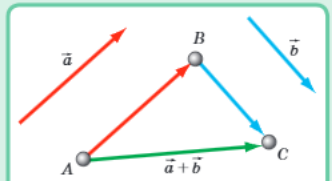
СЛОЖЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ. Пусть для того чтобы попасть в некоторую точку, надо пройти сначала несколько километров в одном направлении (обозначим это перемещение вектором $\vec{s}_1$) и затем несколько километров в другом направлении (перемещение $\vec{s}_2$). В этой конечной точке можно оказаться, двигаясь в третьем направлении (перемещение $\vec{s}$). В этом случае можно говорить о *сложении векторов* $\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$. Сложение векторов часто необходимо для решения широкого круга физических задач.



В математике суммой двух векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ называется такой вектор $\vec{c}$, который обозначается $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$ и получается следующим образом: от произвольной точки A откладывается вектор $\overrightarrow{AB} = \vec{a}$, после чего от точки B откладывается вектор $\overrightarrow{BC} = \vec{b}$. Вектор $\overrightarrow{AC}$ называется суммой векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$:

$$\overrightarrow{AC} = \vec{a} + \vec{b}.$$

Это правило сложения векторов называется *правилом треугольника*.

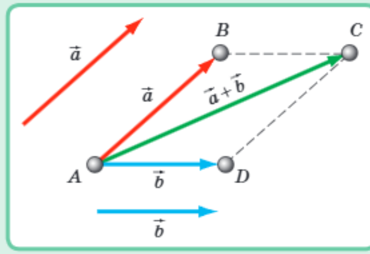


Сложение векторов по правилу треугольника

Для сложения двух векторов можно воспользоваться *правилом параллелограмма*: для векторов с общим началом их сумма изображается диагональю параллелограмма, построенного на этих векторах.

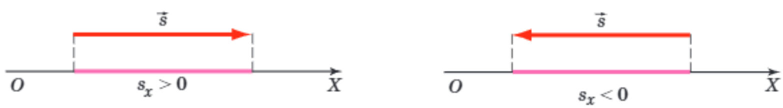
Для любых векторов справедливо равенство:

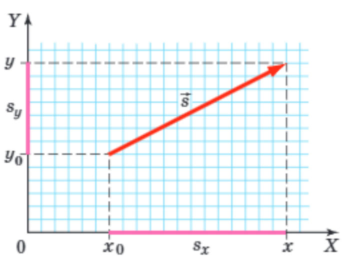
$$\vec{a} + \vec{b} = \vec{b} + \vec{a}.$$



Сложение векторов по правилу параллелограмма

ПРОЕКЦИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НА КООРДИНАТНЫЕ ОСИ. Если известен вектор перемещения тела, то при расчётах, как правило, используют не координаты вектора, а его *проекции* на оси координат. Если опустить перпендикуляры из начала и конца вектора перемещения $\vec{s}$ на координатную ось OX, то получится отрезок s_x, который называется **проекцией перемещения**. При этом проекция вектора на ось считается *положительной*, если координата конца вектора перемещения оказывается больше координаты его начала. В противном случае проекция считается *отрицательной*.





Если вектор и ось параллельны и сонаправлены, то модуль вектора равен его проекции на эту ось.

При решении многих задач необходимо уметь находить проекции вектора перемещения на координатные оси. Если $(x_0; y_0)$ и $(x; y)$ — координаты начала и конца вектора, то его проекции на оси абсцисс и ординат будут равны соответственно

$$s_x = x - x_0;$$
$$s_y = y - y_0.$$

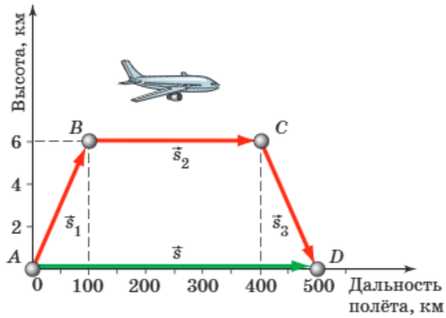
Зная проекции вектора перемещения, можно найти его длину (модуль) по теореме Пифагора:

$$s^2 = s_x^2 + s_y^2.$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ДВИЖУЩЕГОСЯ ТЕЛА И ЕГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ. На рисунке (см. с. 15) представлен график движения самолёта. Сначала он набирал высоту, двигаясь из точки A в точку B (перемещение $\vec{s}_1$), затем двигался на одной и той же высоте до точки C (перемещение $\vec{s}_2$) и, наконец, снижался до приземления в точке D (перемещение $\vec{s}_3$). На какой высоте проходил полёт? Высоте полёта соответствуют координаты по оси OY, значит, в точке B самолёт набрал высоту 6 км.

Теперь ответим на вопрос: какой путь проделал самолёт на этой высоте? Проекция перемещения

$$s_{2x} = 400 - 100 = 300 \text{ (км)}.$$



Так как всё это время самолёт двигался параллельно оси OX, длина вектора перемещения равна его проекции на эту ось. Следовательно, модуль перемещения самолёта из точки B в точку C равен 300 км. Этому же значению равен и путь самолёта из точки B в точку C.

И наконец, определим дальность полёта самолёта. Для этого нам надо найти модуль перемещения самолёта из точки A в точку D:

$$s = s_x = 500 - 0 = 500 \text{ (км)}.$$

Таким образом, при помощи перемещения и его проекций мы описали сложное движение самолёта.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Для того чтобы отслеживать положение транспортного средства на дороге, его снабжают специальными датчиками, сигналы с которых фиксируются с помощью системы глобального спутникового позиционирования GPS/ГЛОНАСС. Датчики положения и перемещения автомобиля используются также при разработке беспилотных транспортных средств.

ВЫВОД

Перемещение — направленный отрезок, соединяющий начальное и конечное положения тела.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Путь; перемещение; проекция перемещения

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что такое перемещение?
2. Чему равно перемещение лыжника, преодолевшего путь A (см. начало параграфа)?
3. Что такое проекция перемещения на координатную ось?

§ 4 ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ МЕХАНИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ

НОВОЕ В УРОКЕ

- В чём состоит относительность механического движения.

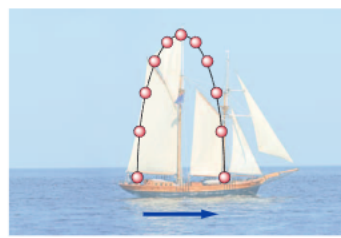
ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое механическое движение?
- Что такое система отсчёта?

Изменение положения тел в пространстве рассматривается относительно других тел. При этом форма траектории, скорость, пройденный путь и другие характеристики зависят от выбора системы отсчёта.

ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ТРАЕКТОРИИ, ПУТИ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ. Представьте себе, что вы плывёте на корабле и, стоя на палубе, подбросили и поймали мяч. Для вас мяч движется вертикально вверх, а затем падает вниз. Однако для наблюдателя, находящегося на берегу, траекторией движения мяча будет парабола, так как, кроме движения по вертикали, мяч движется вперёд вместе с кораблём.

Траектория мяча относительно корабля



Траектория мяча относительно наблюдателя на берегу

При этом в системе отсчёта, связанной с палубой корабля, путь, пройденный подброшенным вертикально вверх мячом, равен удвоенному расстоянию от нижней до верхней точки траектории. А в системе отсчёта, связанной с наблюдателем на берегу, пройденный мячом путь равен длине параболы и, очевидно, больше, чем пройденный путь в первом случае.

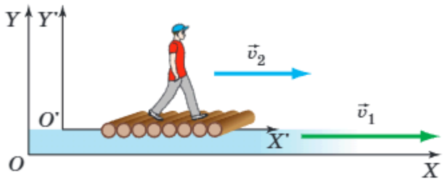
Аналогичный вывод можно сделать по относительности перемещения тела. Действительно, в системе отсчёта, связанной с палубой корабля, перемещение мяча равно нулю, так как он возвращается в начальное положение. А в системе отсчёта, связанной с наблюдателем на берегу, перемещение мяча будет равно расстоянию, на которое переместится корабль за время движения мяча.

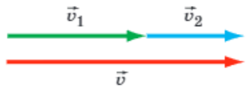
Форма траектории, пройденный путь и перемещение зависят от выбора системы отсчёта.

КЛАССИЧЕСКИЙ ЗАКОН СЛОЖЕНИЯ СКОРОСТЕЙ. Так как пройденный путь и перемещение тела различны в разных системах отсчёта, то, очевидно, и скорость движения тела будет отличаться относительно разных наблюдателей.

Рассмотрим плот, движущийся относительно берега со скоростью $\vec{v}_1$ течения реки. Человек, находящийся на плоту, перемещается из точки A в точку B по направлению течения реки со скоростью $\vec{v}_2$ относительно плота. Обозначим:

XOY (система K_1) — неподвижная система отсчёта, связанная с берегом, $X'O'Y'$ (система K_2) — подвижная система отсчёта, связанная с плотом. Для простоты рассуждения будем предполагать, что оси OX и $O'X'$ параллельны.





ВАЖНО

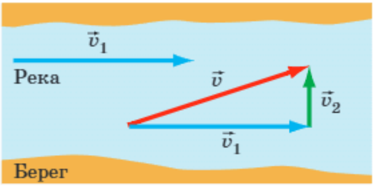
Классический закон сложения скоростей. Если тело движется относительно некоторой системы отсчёта K_1 со скоростью $\vec{v}_1$ и сама система отсчёта K_1 движется относительно другой системы отсчёта K_2 со скоростью $\vec{v}_2$, то скорость тела $\vec{v}$ относительно системы отсчёта K_2 равна векторной сумме скоростей $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$:

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2.$$

Таким образом, скорость человека относительно берега (неподвижной системы отсчёта) равна векторной сумме его скорости относительно плота (подвижной системы отсчёта) и скорости плота (подвижной системы отсчёта) относительно берега:

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2.$$

Пусть теперь человек перемещается по плоту перпендикулярно направлению движения плота. И в этом случае скорость человека относительно берега равна векторной сумме скоростей $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$.



ВЫВОД

Форма траектории, скорость, пройденный путь и другие характеристики зависят от выбора системы отсчёта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Относительность движения; система отсчёта; относительность траектории; относительность пути и перемещения; относительность скорости

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Приведите примеры, в которых форма траектории и другие характеристики механического движения зависят от выбора системы отсчёта.
2. Автомобиль движется по прямолинейному участку пути. Какова форма траектории: точки, находящейся на шине колеса; точки, находящейся в центре колеса относительно дороги?
3. Человек идёт по вагону движущегося поезда. Опишите пройденный человеком путь и скорость в системах отсчёта, связанных с землёй и с вагоном, в случаях, когда человек идёт: по ходу движения поезда; против движения.

§ 5 РАВНОМЕРНОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

НОВОЕ В УРОКЕ

- Как определить перемещение, скорость и координаты тела, движущегося равномерно и прямолинейно.
- Что такое уравнение движения.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Какое движение тела является равномерным и прямолинейным?
- Что такое перемещение?
- Как найти проекцию перемещения?

Вспомним, что если тело за любые равные промежутки времени проходит равные пути, то его движение называется **равномерным**. Если траектория движения тела представляет собой прямую линию, то такое движение называется **прямолинейным**. Равномерное прямолинейное движение является наиболее простым видом движения. Рассмотрим его основные характеристики.

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ И СКОРОСТЬ ПРИ РАВНОМЕРНОМ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ДВИЖЕНИИ. Если тело движется прямолинейно, то траектория его движения совпадает с перемещением. При этом пройденный телом путь равен модулю вектора перемещения.

Поэтому можно сказать, что **скоростью равномерного прямолинейного движения** называется векторная величина, равная отношению перемещения тела ко времени, за которое это перемещение произошло.

ВАЖНО

Если обозначить величины: скорость — $\vec{v}$, перемещение — $\vec{s}$, время — t, то **скорость прямолинейного равномерного движения** рассчитывается по формуле

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}.$$

При равномерном прямолинейном движении векторы скорости и перемещения направлены в одну сторону.

Зная скорость равномерного прямолинейного движения, можно найти перемещение тела за любой промежуток времени:

$$\vec{s} = \vec{v}t. \qquad (1)$$

Ранее при решении задач мы использовали формулу $s = vt$ без стрелочек. Почему? Символом s здесь обозначался путь, пройденный телом, а символом v — модуль скорости. Теперь нам известно, что при равномерном прямолинейном движении путь равен модулю перемещения. Поэтому если нас не интересует направление движения тела, а необходимо только найти его путь, то эта формула поможет нам найти решение.

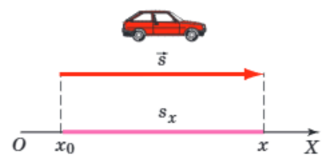
Поскольку скорость $\vec{v}$ является векторной величиной, её можно изобразить графически. Обозначим её проекцию на координатную ось v_x. При этом знак проекции скорости зависит от того, в каком направлении относительно координатной оси движется тело: если направление движения тела совпадает с направлением координатной оси, то проекция скорости положительна ($v_x > 0$), а если тело движется в направлении, противоположном направлению координатной оси, то проекция скорости отрицательна ($v_x < 0$).

Если направление координатной оси совпадает с направлением движения тела, то для расчёта перемещения тела можно использовать формулу

$$s_x = v_x t. \quad (2)$$

В Международной системе единиц (СИ) за единицу скорости принимают скорость такого равномерного прямолинейного движения, при котором движущееся тело за 1 секунду проходит путь, равный 1 метру. Эта единица называется *метр в секунду* и обозначается м/с. Используются и другие единицы скорости: *километр в час* (км/ч), *километр в секунду* (км/с), *сантиметр в секунду* (см/с). При выборе разных единиц скорость будет иметь разные численные значения.

УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ. Уравнение зависимости координаты тела от времени называется **уравнением движения**.



Пусть тело совершило перемещение $\vec{s}$. Направим координатную ось OX по направлению перемещения тела. Обозначим начальную координату тела x_0, а конечную координату x. Тогда

$$s_x = x - x_0.$$

Но по формуле (2) $s_x = v_x t$. Следовательно, $x - x_0 = v_x t$, откуда

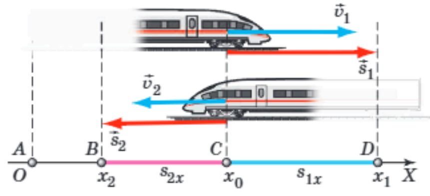
$$x = x_0 + v_x t. \quad (3)$$

ВАЖНО

Координату тела при равномерном прямолинейном движении в любой момент времени можно определить, если известны его начальная координата и проекция скорости движения на ось OX:

$$x = x_0 + v_x t.$$

ПРИМЕР ОПИСАНИЯ ДВИЖЕНИЯ В ВЫБРАННОЙ СИСТЕМЕ ОТСЧЁТА. Два поезда выехали навстречу друг другу. Первый поезд выехал со станции A по направлению к станции D. Второй поезд выехал со станции D в сторону станции A. У станции C, находящейся в 40 км от станции A, они встретились. По прошествии некоторого времени t первый поезд доехал до станции D, а второй поезд проехал станцию B. Расстояние между станциями B и C равно 20 км. Расстояние между станциями C и D равно 30 км. Определим координаты каждого поезда относительно станции A и расстояние между ними через время t.



Пусть направление координатной оси совпадает с направлением от A к D, а начало отсчёта $x = 0$ совпадает с точкой A.

Обозначим $x_0 = x_C = 40$ км — координату поездов во время их встречи.

Проекция перемещения первого поезда положительна:

$$s_{1x} = x_1 - x_0; \quad s_{1x} > 0.$$

Проекция перемещения второго поезда имеет отрицательный знак:

$$s_{2x} = x_2 - x_0; \quad s_{2x} < 0.$$

Координаты поездов x_1 и x_2 соответственно равны

$$x_1 = x_0 + s_{1x};$$
$$x_2 = x_0 + s_{2x}.$$

Подставив данные задачи в формулы, получим, что координата первого поезда через время t:

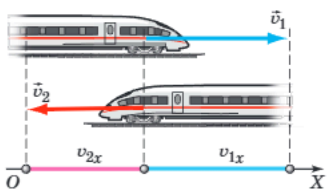
$$x_1 = 40 + 30 = 70 \text{ (км)}.$$

Координата второго поезда через время t:

$$x_2 = 40 - 20 = 20 \text{ (км)}.$$

Из курса математики известно, что расстояние между точками на оси равно модулю разности их координат. Значит, расстояние между поездами через время t равно

$$l = |x_1 - x_2|;$$
$$l = |70 - 20| = 50 \text{ (км)}.$$



Рассмотрим проекции скоростей поездов на ось OX, направление которой совпадает с направлением движения первого поезда. Проекция скорости первого поезда v_{1x} в этом случае будет положительной, а проекция скорости второго поезда v_{2x} — отрицательной.

Здесь отрицательное значение проекции скорости означает, что движение происходит в направлении, противоположном направлению оси.

ВЫВОДЫ

- Скоростью равномерного прямолинейного движения называется векторная величина, равная отношению перемещения тела ко времени, за которое это перемещение произошло.
- Уравнение зависимости координаты тела от времени называется уравнением движения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Проекция перемещения; координата; скорость равномерного прямолинейного движения; уравнение движения

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Чему равна скорость при равномерном прямолинейном движении?
2. От чего зависит знак проекции скорости на координатные оси?
3. Что собой представляет уравнение движения?
4. Как должна двигаться точка, чтобы пройденный ею путь равнялся модулю перемещения?
5. Известно, что тело за каждую последовательную секунду движения проходит равные пути. Является ли это движение равномерным?

ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РАВНОМЕРНОГО ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ

§ 6

НОВОЕ В УРОКЕ

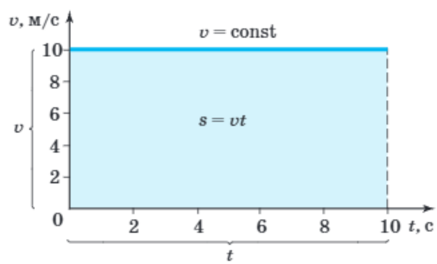
- Какие графики используют для получения представления о равномерном прямолинейном движении.

Построение графиков широко используется в физике для наглядного представления различных физических процессов. Графики помогают лучше понять физическое явление, проанализировать его и найти ответы на поставленные вопросы.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что образует систему отсчёта?
- Что такое скорость равномерного прямолинейного движения?

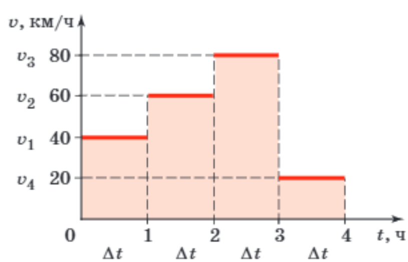
ГРАФИК ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ОТ ВРЕМЕНИ. При равномерном движении скорость тела с течением времени остаётся неизменной. Поэтому график зависимости модуля вектора скорости от времени t — это прямая, параллельная оси абсцисс.



Зафиксируем время, прошедшее от начала движения, и опустим перпендикуляр из выбранной точки на график скорости. Площадь полученного прямоугольника равна произведению vt. Но нам известно, что модуль перемещения $s = vt$. Следовательно, эта площадь численно равна модулю перемещения. Итак,

при прямолинейном равномерном движении модуль вектора перемещения численно равен площади прямоугольника под графиком скорости.

Теперь опишем движение тела по приведённому на рисунке графику зависимости скорости движения от времени. При этом будем считать, что тело двигалось прямолинейно. В разные промежутки времени, каждый из которых равен $\Delta t = 1$ ч, тело двигалось с различной скоростью. Сначала скорость тела была равна 40 км/ч, затем 60 км/ч, потом 80 км/ч и, наконец, 20 км/ч. При этом за первый час тело переместилось на $s_1 = v_1 \Delta t = 40$ км, за второй — на 60 км, за третий — на 80 км, за четвёртый — на 20 км. Таким образом, перемещение тела за 4 ч движения составило:



$$s = v_1 \Delta t + v_2 \Delta t + v_3 \Delta t + v_4 \Delta t = 40 + 60 + 80 + 20 = 200 \text{ (км)}.$$

ГРАФИК ЗАВИСИМОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОТ ВРЕМЕНИ. График зависимости перемещения тела от времени при прямолинейном равномерном движении — это прямая, проходящая через начало координат.

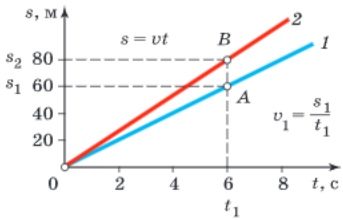


Рис. 1

По графику, изображённому на рисунке 1, определим скорость движения тела. Выберем на прямой *1* точку *A* и определим перемещение s_1 и соответствующий момент времени t_1. Скорость движения тела будет равна

$$v_1 = \frac{s_1}{t_1}.$$

Чем круче проходит график перемещения, т. е. чем больше его угол наклона к оси абсцисс, тем больше скорость движения тела. Действительно, точке *B* на прямой *2* соответствует большее перемещение s_2 за то же самое время t_1, следовательно, график *2* описывает движение с большей скоростью.

ГРАФИК ЗАВИСИМОСТИ КООРДИНАТЫ ТЕЛА ОТ ВРЕМЕНИ. Зависимость координаты тела от времени описывается формулой $x = x_0 + v_x t$.

Поскольку эта зависимость линейная, то соответствующий график (график движения) представляет собой прямую линию (рис. 2). В начальный момент времени $t = 0$ координата $x = x_0$.

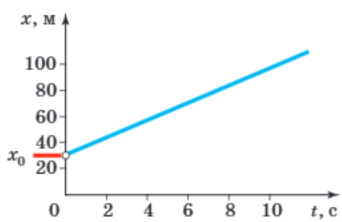


Рис. 2

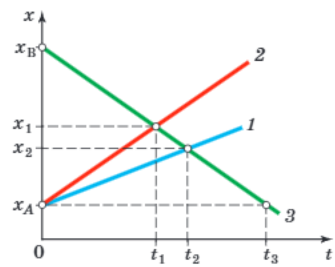


Рис. 3

Рассмотрим изображённые на рисунке 3 графики движения для трёх тел.

Тела *1* и *2* имеют одинаковую начальную координату x_A и начинают движение из одной точки. Поскольку угол наклона графика *2* к оси абсцисс больше, чем у графика *1*, то модуль скорости тела *2* больше модуля скорости тела *1*. Это видно из графиков, поскольку даже для моментов времени $t_1 < t_2$ координата x_1 тела *2* больше координаты x_2 тела *1* ($x_1 > x_2$). Тело *3* имеет начальную координату x_B ($x_B > x_A$). Причём по графику *3* видно, что координата тела *3* уменьшается с течением времени. Это означает, что проекция скорости тела *3* отрицательна.

Рассмотрим ещё один график зависимости координаты тела от времени для прямолинейного движения (рис. 4). Как, опираясь на этот график, построить график зависимости скорости тела от времени?

Движение состоит из нескольких участков равномерного движения, на каждом из которых тело меняет направление движения и скорость.

На участке графика от 0 до 2 с координата тела увеличивается от 0 до 10 м, т. е. тело движется в направлении оси *OX*.

Проекцию скорости можно найти по формуле

$$v_x = \frac{x - x_0}{\Delta t}. \qquad (1)$$

Для первого участка скорость $v_1 = \frac{10 - 0}{2 - 0}\frac{\text{м}}{\text{с}} = 5$ м/с. На графике скорости (рис. 5) это отрезок прямой, параллельной оси абсцисс, лежащий выше оси времени.

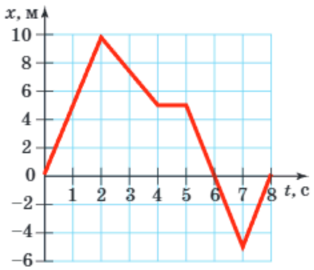


Рис. 4

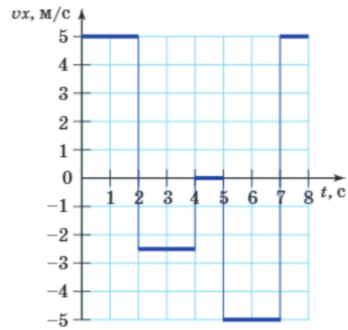


Рис. 5

На участке графика от 2 с до 4 с координата тела уменьшается от 10 м до 5 м. Это означает, что оно движется в направлении, противоположном направлению оси OX. Проекция скорости в этом случае будет отрицательной: $v_2 = \frac{5-10}{4-2}\frac{\text{м}}{\text{с}} =$ $= -2{,}5$ м/с. Поэтому этот участок графика расположен под осью времени.

На участке графика от 4 с до 5 с координата тела не изменяется ($x = 5$ м), т. е. тело не движется: $v_3 = 0$.

Далее, используя формулу (1), найдём значения проекций скоростей на участках от 5 с до 7 с и от 7 с до 8 с:

$$v_4 = \frac{-5-5}{7-5}\frac{\text{м}}{\text{с}} = -5 \text{ м/с}, \qquad v_5 = \frac{0-(-5)}{8-7}\frac{\text{м}}{\text{с}} = 5 \text{ м/с}.$$

В итоге график зависимости скорости тела от времени для рассматриваемого движения выглядит так, как показано на рисунке 5.

ВЫВОДЫ

- График зависимости модуля вектора скорости от времени при прямолинейном равномерном движении — это прямая, параллельная оси абсцисс.
- При прямолинейном равномерном движении модуль вектора перемещения численно равен площади прямоугольника под графиком скорости.
- График зависимости перемещения тела от времени при прямолинейном равномерном движении — это прямая, проходящая через начало координат.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

График зависимости скорости от времени; график зависимости перемещения тела от времени; график зависимости координаты тела от времени

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Как выглядит график зависимости скорости от времени при прямолинейном равномерном движении?
2. Может ли график зависимости скорости от времени располагаться под осью времени, т. е. в области отрицательных значений скорости? Приведите пример.
3. Как по графику скорости определить перемещение при прямолинейном равномерном движении?
4. Что означают точки пересечения графиков *1* и *2* с графиком *3* в моменты времени t_1 и t_2 (см. рис. 3 на с. 22)?

§ 7 СКОРОСТЬ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое средняя и мгновенная скорость.
- Как по графику скорости определить пройденный телом путь.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое равномерное и неравномерное движение?
- Как определить скорость при равномерном прямолинейном движении?

В окружающем нас мире равномерное движение встречается нечасто. Обычно скорость тела изменяется с течением времени, т. е. тело за равные промежутки времени проходит разные пути. Такое движение тела называется *неравномерным*.

СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ НЕРАВНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ. В качестве примера неравномерного движения рассмотрим движение автобуса по шоссе. Начиная движение после остановки, автобус увеличивает свою скорость и, двигаясь далее, уменьшает свою скорость перед следующей остановкой. Он также может изменять скорость при пересечении перекрёстков, у светофора и т. п.

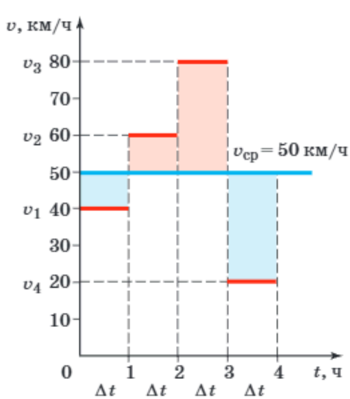
Для того чтобы охарактеризовать неравномерное движение в целом за некоторый промежуток времени, вводится понятие *средней скорости*.

ВАЖНО

Средняя скорость неравномерного движения — это физическая величина, равная отношению пути, пройденного телом, ко времени, за которое этот путь был пройден:

$$v_{\text{ср}} = \frac{s}{\Delta t}.$$

Эту скорость также называют **средней путевой скоростью**.



Так как средняя скорость равна отношению двух скалярных величин, она сама является величиной скалярной. Зная среднюю скорость неравномерного движения, можно делать выводы о том, насколько быстро или медленно движется тело.

При таком способе описания движения мы фактически заменяем неравномерное движение равномерным, скорость которого равна средней скорости неравномерного движения.

Представим, что тело двигалось так, как изображено на графике красными отрезками. Как определить среднюю скорость его движения? Чтобы найти среднюю скорость, надо весь пройденный путь разделить на общее время движения:

$$v_{ср} = \frac{s_1 + s_2 + s_3 + s_4}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4} = \frac{v_1\Delta t + v_2\Delta t + v_3\Delta t + v_4\Delta t}{4\Delta t} = \frac{1}{4}(v_1 + v_2 + v_3 + v_4).$$

Подставив значения скорости на каждом из отрезков пути, получим

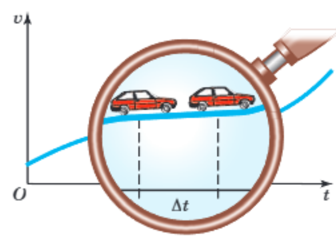
$$v_{ср} = \frac{1}{4}(40 + 60 + 80 + 20) = 50 \text{ (км/ч)}.$$

Полученное значение показывает среднюю скорость движения тела на всём пути, и оно может не совпадать со значением скорости в различные моменты времени движения.

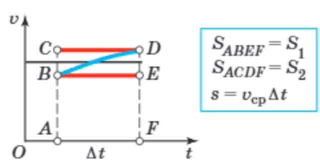
Таким образом, при движении со скоростью $v_{ср} = 50$ км/ч за всё время движения тело должно пройти точно такой же путь, как и двигаясь неравномерно. Проведём горизонтальную линию синего цвета $v_{ср} = 50$ км/ч. Можно проверить, что площадь прямоугольника под этой линией равна суммарной площади прямоугольников под линиями v_1, v_2, v_3 и v_4.

При этом можно также заметить, что площадь фигур голубого цвета под графиком средней скорости равна площади фигур оранжевого цвета над графиком средней скорости.

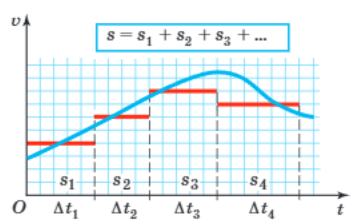
ГРАФИК СКОРОСТИ И ЗНАЧЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ. Мы уже знаем, что при равномерном прямолинейном движении модуль перемещения численно равен площади под графиком скорости. Оказывается, при неравномерном движении это равенство также справедливо. При этом не имеет значения, как изменяется скорость с течением времени.



Построим график зависимости скорости от времени и разобьём весь интервал движения на отрезки Δt. Рассмотрим движение тела в отдельном промежутке времени Δt. Как определить площадь фигуры под графиком? Очевидно, что эта площадь больше площади S_1 прямоугольника и меньше площади S_2 прямоугольника ($S_{ABEF} = S_1$; $S_{ACDF} = S_2$).



Если выбирать всё меньшие промежутки времени Δt, то скорость на каждом из них будет изменяться всё меньше и меньше и площади S_1 и S_2 будут всё меньше отличаться друг от друга. Для каждого промежутка времени площадь под графиком равна произведению высоты (средней скорости) и основания (промежутка времени), т. е. площадь равна перемещению тела за этот промежуток времени. А площадь под всем графиком равна сумме площадей для всех промежутков времени.

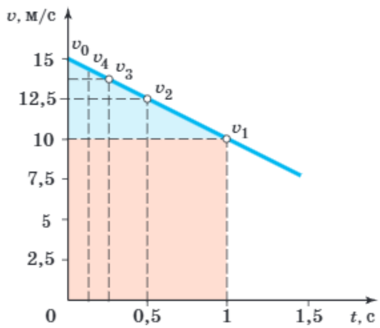


Модуль перемещения при неравномерном движении численно равен площади под графиком зависимости скорости от времени.

МГНОВЕННАЯ СКОРОСТЬ. При движении тело проходит последовательно все точки траектории. В каждой точке оно находится в определённые моменты времени и имеет определённую скорость.

Скорость тела в данный момент времени или в данной точке траектории называется **мгновенной скоростью.**

Для уяснения смысла мгновенной скорости потребуются дополнительные рассуждения. Например, как определить мгновенную скорость автобуса в некоторый момент времени t, соответствующий началу торможения?



Для определения мгновенной скорости нужно измерить среднюю скорость тела на интервале времени от t до $t + \Delta t$ и принять, что его мгновенная скорость в момент времени t приблизительно равна этому среднему значению скорости. Характер изменения средней скорости движения тела нетрудно установить в случае, когда его скорость линейно изменяется с течением времени. Например, двигавшийся со скоростью $v_0 = 54$ км/ч (15 м/с) автобус в момент времени $t = 0$ начинает тормозить, причём его скорость равномерно уменьшается на 5 м/с за каждую секунду движения. На рисунке приведён график зависимости скорости движения автобуса от времени, с помощью которого можно установить характер изменения его средней скорости за определённый интервал времени, например за первую секунду после начала торможения.

Как видно из рисунка, модуль перемещения автобуса за время $\Delta t_1 = 1$ с численно равен сумме площадей треугольника и прямоугольника:

$$\Delta s_1 = \frac{1}{2}(v_0 - v_1)\Delta t_1 + v_1\Delta t_1, \quad \text{где } v_1 = 10 \text{ м/с}.$$

С другой стороны, $\Delta s_1 = v_{\text{ср}1}\Delta t_1$.

Приравняв оба выражения для Δs_1, после простых преобразований получим:

$$v_{\text{ср}1} = \frac{v_0 + v_1}{2} = 12{,}5 \text{ м/с},$$

т. е. средняя скорость равна среднему арифметическому скоростей v_0 и v_1.

Для вдвое меньшего интервала времени $\Delta t_2 = \frac{1}{2}\Delta t_1 = 0{,}5$ с аналогично получим значение

$$v_{\text{ср}2} = \frac{v_0 + v_2}{2} = \frac{15 + 12{,}5}{2} = 13{,}75 \text{ (м/с)}.$$

Если интервал времени уменьшить ещё в 2 раза, т. е. $\Delta t_3 = \frac{1}{2}\Delta t_2 = 0{,}25$ с, то средняя скорость оказывается равной

$$v_{\text{ср}3} = \frac{v_0 + v_3}{2} = \frac{15 + 13{,}75}{2} = 14{,}375 \text{ (м/с)}.$$

Полученные результаты свидетельствуют о том, что по мере дальнейшего уменьшения временны́х интервалов Δt_4, Δt_5 и т. д. значение средней скорости ($v_{\text{ср}4} \approx 14{,}69$ м/с; $v_{\text{ср}5} \approx 14{,}84$ м/с и т. д.) будет стремиться к значению мгновенной скорости автобуса в момент начала торможения: $v_{\text{мгн}} = 15$ м/с.

По мере уменьшения промежутков времени фактическое движение в пределах каждого отдельного промежутка времени будет всё меньше отличаться от равномерного, и наконец различие перестанет улавливаться приборами.

Δt, с	$v_{\text{ср}}$, м/с
1	12,5
0,5	13,75
0,25	14,375
0,125	14,69
0,0625	14,84

В пределах малых промежутков времени (столь малых, что движение можно считать равномерным) результат измерения можно относить к любому моменту времени в пределах рассматриваемого промежутка.

Если движение *равномерное*, то его мгновенная скорость в любой момент времени равна скорости этого равномерного движения.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

На многих транспортных средствах модуль мгновенной скорости измеряется с помощью специального прибора, который называется *спидометром*. Показания спидометра, как правило, представляются в километрах в час (км/ч). Погрешность показаний спидометра зависит от скорости транспортного средства и возрастает с увеличением его скорости.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Интересно, что Галилей не пользовался такой физической величиной, как скорость. Рассуждения о природе движения проводились в виде анализа отношений однородных, имеющих одинаковую размерность величин.

Впервые в современной форме записи понятие скорости ввёл Л. Эйлер в 1765 г. в работе «Теория движения твёрдых тел». Он писал: «При равномерном движении отношение путей к промежуткам времени, в течение которых они проходятся, называется быстротой или скоростью...» Эйлер впервые записал $v = s/t$, и эта форма записи с тех пор не изменилась.

ВЫВОДЫ

- Средняя скорость неравномерного движения — это физическая величина, равная отношению пути, пройденного телом, ко времени, за которое этот путь был пройден.
- Скорость тела в данный момент времени или в данной точке траектории называется мгновенной скоростью.
- Модуль перемещения при неравномерном движении численно равен площади под графиком зависимости скорости от времени.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Неравномерное движение; средняя скорость; мгновенная скорость

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что такое мгновенная скорость?
2. Как по графику скорости определить пройденный телом путь?
3. О какой скорости (средней или мгновенной) идёт речь в следующих примерах:
   1) показание спидометра автомобиля равно 60 км/ч;
   2) скорость лыжника при спуске превышает 5 м/с;
   3) человек идёт со скоростью 5 км/ч;
   4) скорость ветра равна 10 м/с?
   Объясните свой ответ.
4. При движении тела через каждые равные промежутки времени измеряли его мгновенную скорость. Можно ли по имеющимся данным определить среднюю скорость движения тела?

§ 8 УСКОРЕНИЕ И СКОРОСТЬ ПРИ РАВНОУСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ

НОВОЕ В УРОКЕ

- Как вычислить ускорение тела.
- Как вычислить скорость прямолинейного равноускоренного движения.
- Что собой представляет график скорости прямолинейного равноускоренного движения.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Какое движение называется равнопеременным?
- Что такое ускорение?
- Что такое линейная функция и как выглядит её график?

В окружающем нас мире равномерное движение встречается очень редко, а примеров неравномерного движения огромное количество. Давайте подробнее остановимся на движении, которое называется *равнопеременным*.

РАВНОУСКОРЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ. Пусть автомобиль движется с начальной скоростью v_0, а затем начинает увеличивать свою скорость, которая через время t становится равной v. Если за любые одинаковые промежутки времени скорость этого автомобиля увеличивалась на одно и то же значение, то в течение времени t автомобиль двигался **равноускоренно.** При прямолинейном равноускоренном движении не только сама скорость, но и проекции вектора скорости за любые равные промежутки времени увеличиваются на одно и то же значение.

Если за любые одинаковые промежутки времени скорость тела уменьшается на одно и то же значение, то говорят, что тело движется **равнозамедленно.**

УСКОРЕНИЕ — ВЕКТОРНАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА. Для того чтобы понять, как именно изменяется скорость тела при равнопеременном движении, необходимо найти его *ускорение*.

Ускорение — это физическая величина, характеризующая быстроту изменения скорости тела:

$$\text{ускорение} = \frac{\text{изменение скорости}}{\text{время}}.$$

ВАЖНО

Если обозначить величины: скорость тела в начальный момент времени — $\vec{v}_0$, время движения — t, конечная скорость — $\vec{v}$, то **ускорение** рассчитывается по формуле

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}.$$

В числителе формулы определения ускорения находится векторная величина $(\vec{v} - \vec{v}_0)$, в знаменателе — скалярная (время t). Поэтому **ускорение является векторной величиной**.

Для решения практических задач, как правило, необходимо знать проекцию ускорения на заданное направление. Вычислить проекцию ускорения можно, зная проекции векторов скорости:

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}. \quad (1)$$

В Международной системе единиц (СИ) за единицу ускорения принимают ускорение такого равнопеременного прямолинейного движения, при котором скорость движущегося тела за 1 с изменяется на 1 м/с. Эта единица называется *метр на секунду в квадрате* и обозначается м/с^2:

$$\frac{1\ \text{м/с}}{1\ \text{с}} = 1\frac{\text{м}}{\text{с}\cdot\text{с}} = 1\frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Пусть автомобиль начинает своё движение в момент времени $t = 0$. В таблице приведены значения скорости движения автомобиля через равные промежутки времени.

t, с	0	2	4	6
v, м/с	0	10	20	30

По таблице видно, что за каждые 2 с движения скорость увеличивается на 10 м/с. Убедимся, что автомобиль движется равноускоренно. Вычислим ускорение, с которым движется автомобиль.

Ускорение за первые 2 с движения:

$$a_x = \frac{10\ \text{м/с} - 0\ \text{м/с}}{2\ \text{с}} = 5\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Ускорение за следующие 2 с движения:

$$a_x = \frac{20\ \text{м/с} - 10\ \text{м/с}}{2\ \text{с}} = 5\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Ускорение в течение всего времени движения:

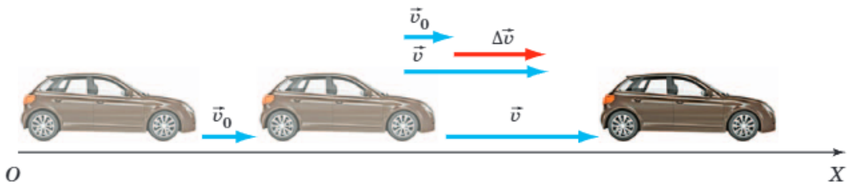
$$a_x = \frac{30\ \text{м/с} - 0\ \text{м/с}}{6\ \text{с}} = 5\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

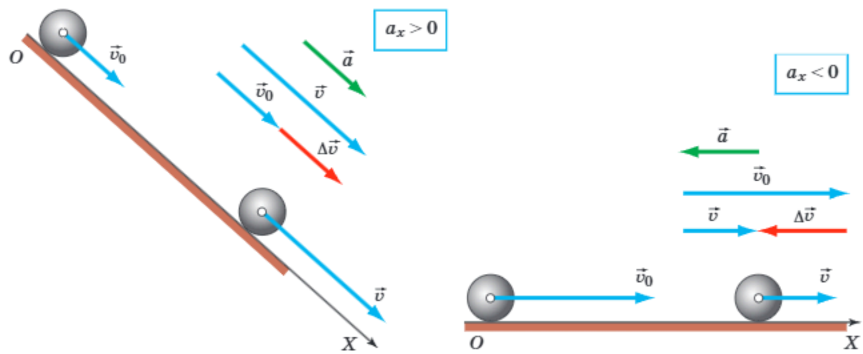
При равноускоренном (или равнозамедленном) движении ускорение не изменяется, поэтому в формуле (1) может использоваться любой интервал времени t.

Пусть автомобиль движется по прямому участку дороги.

Направим ось OX по направлению движения. Так как направления оси и вектора скорости совпадают, то проекция скорости на эту ось будет положительной и равна модулю вектора скорости.

Из определения ускорения следует, что направление вектора ускорения всегда совпадает с направлением вектора изменения скорости. Найдём вектор $\Delta\vec{v}$, равный разности векторов $\vec{v}$ и $\vec{v}_0$. Так как скорость автомобиля увеличивается, то вектор $\Delta\vec{v}$, а следовательно, и вектор ускорения имеют то же направление, что и вектор скорости. Поэтому проекция вектора ускорения также будет положительной.





Ускоренное движение Замедленное движение

Если тело ускоряется на прямом участке, т. е. модуль скорости движения тела возрастает, то направление вектора ускорения совпадает с направлением движения тела (с направлением вектора скорости).

Если тело замедляет своё движение, т. е. модуль скорости движения тела уменьшается, то в этом случае направление вектора ускорения противоположно направлению движения тела (направлению вектора скорости).

СКОРОСТЬ ПРИ РАВНОУСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ. Преобразовав формулу для вычисления ускорения при прямолинейном равноускоренном движении, можно получить формулу для определения **скорости** в любой момент времени:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t.$$

Используя проекции скорости и ускорения, получаем

$$v_x = v_{0x} + a_x t. \qquad (2)$$

Если в начальный момент тело покоилось ($\vec{v}_0 = 0$), то формула принимает вид

$$\vec{v} = \vec{a}t, \quad \text{или} \quad v_x = a_x t.$$

ВАЖНО

Если обозначить величины: проекция скорости тела в начальный момент времени — v_{0x}, время движения — t, проекция ускорения — a_x, то **проекция v_x конечной скорости** рассчитывается по формуле

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

ГРАФИК ЗАВИСИМОСТИ ПРОЕКЦИИ СКОРОСТИ ОТ ВРЕМЕНИ. Функция $v_x = v_{0x} + a_x t$ — линейная. Её аргументом является время t, угловой коэффициент равен a_x, а свободный член — это v_{0x}.

Графиком данной функции является прямая линия, расположение которой по отношению к осям координат определяется значениями a_x и v_{0x}.

Например, на рисунке 1 (см. с. 31) графиком зависимости проекции скорости от времени является график функции $v_x = t$, где начальная скорость равна 0 ($v_{0x} = 0$), а проекция ускорения положительна и равна $a_x = 1$ м/с^2.

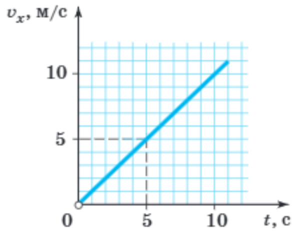


Рис. 1

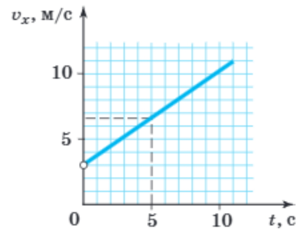


Рис. 2

На рисунке 2 построен график функции $v_x = 3 + 0{,}7t$, где проекция начальной скорости $v_{0x} = 3$ м/с, проекция ускорения также положительна и равна $a_x = 0{,}7$ м/с^2.

Определим ускорение тела по графику зависимости проекции скорости от времени (рис. 3). Для этого выберем на графике *1* две точки *A* и *B* и отметим изменение скорости Δv и изменение времени Δt на этом участке. Отношение $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ и будет равно ускорению.

Чем круче проходит график зависимости скорости от времени, т. е. чем больше его угол наклона к оси абсцисс, тем больше ускорение тела. Например, тело *1* быстрее изменяет свою скорость, чем тело *2*, т. е. его ускорение больше.

Если тело, имеющее скорость v_0 в момент времени $t = 0$, начинает замедлять своё движение, его ускорение направлено в сторону, противоположную направлению движения (до момента остановки). Если ось OX направлена по направлению движения тела, то проекция ускорения отрицательна и можно записать: $a_x = -|\vec{a}| = -a$. Тогда модуль скорости в момент времени t можно найти по формуле

$$v = v_0 - at.$$

График такого равнозамедленного движения показан на рисунке 4.

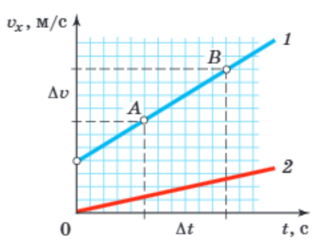


Рис. 3

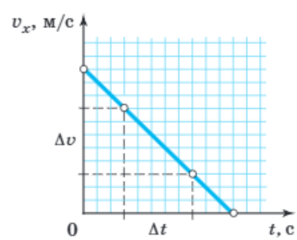
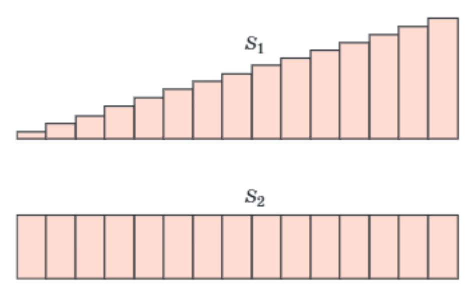


Рис. 4

ЭТО ИНТЕРЕСНО

В XIV в. независимо друг от друга французский философ и естествоиспытатель Николай О р é м и итальянский философ и монах Джованни ди К а з а л и впервые предложили изображать движение в виде графиков. Ещё до введения прямоугольной двухмерной (декартовой) системы координат они смогли представить движение тел с переменной скоростью, анализируя их скорость, пройденный путь и время движения. Орем на горизонтальной линии откладывал равные промежутки времени (ось времени) и для каждого промежутка строил ряд перпендикулярных полос, длина которых представляла собой скорость в данный момент времени. Площадь S_1 получившейся фигуры представляет собой путь, пройденный телом. Орем пришёл к важному выводу, что тело, движущееся равноускоренно, за данное время проходит то же самое расстояние, которое оно бы прошло за это же время, двигаясь равномерно со скоростью, равной средней скорости движения: $S_1 = S_2$.



ВЫВОДЫ

Если за любые одинаковые промежутки времени скорость тела увеличивалась на одно и то же значение, то тело двигалось равноускоренно.

Ускорение — это физическая величина, характеризующая быстроту изменения скорости тела.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Равноускоренное движение; ускорение; скорость; график зависимости скорости от времени

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Как найти ускорение?
2. Почему ускорение является векторной величиной?
3. Как найти скорость равноускоренного движения в произвольный момент времени?
4. Два автомобиля движутся навстречу друг другу по параллельным дорогам. Один автомобиль движется равноускоренно на север, а другой — равнозамедленно на юг. Как при этом направлены ускорения автомобилей?
5. Встречаются задачи, в условии которых написано, что движущееся с некоторой скоростью тело «мгновенно» изменяет направление своего движения на противоположное. Что можно сказать по поводу ускорения, испытываемого телом в этом случае?

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ПРИ РАВНОУСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ § 9

НОВОЕ В УРОКЕ

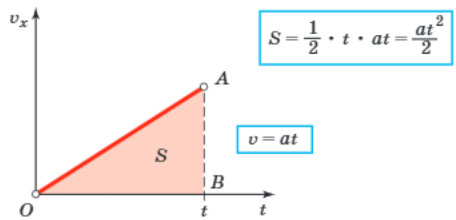
- Как вычислить перемещение при прямолинейном равноускоренном движении.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Как вычислить скорость прямолинейного равноускоренного движения?
- Что собой представляет график скорости прямолинейного равноускоренного движения?

При изучении прямолинейного равноускоренного движения тела необходимо уметь определять модуль перемещения за любой промежуток времени. Для решения этой задачи нужно вспомнить, что модуль перемещения тела, как при равномерном, так и при неравномерном движении, численно равен площади под графиком зависимости проекции скорости тела от времени.

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ТЕЛА, НАЧАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ КОТОРОГО РАВНА НУЛЮ. Если начальная скорость тела равна нулю и тело движется равноускоренно в положительном направлении оси координат, то график зависимости проекции скорости от времени будет выглядеть так, как изображено на рисунке. Для определения модуля перемещения за время t необходимо вычислить площадь треугольника под графиком. Так как полученный треугольник прямоугольный, отрезок AB является его высотой, поэтому можно записать, что площадь треугольника равна



$$S = \frac{1}{2}\,OB \cdot AB.$$

Длина отрезка OB численно равна значению времени t. Длина отрезка AB численно равна значению скорости v, которую приобретёт тело, двигаясь в течение этого времени с ускорением a. Учитывая, что $v_{0x} = 0$, можно записать:

$$v_x = a_x t.$$

Тогда площадь $S = \frac{1}{2} t a_x t = \frac{1}{2} a_x t^2$, или перемещение $s_x = \frac{a_x t^2}{2}$.

Следовательно, **проекция перемещения пропорциональна квадрату времени**.

Если тело движется прямолинейно и равноускоренно, то направления векторов перемещения и ускорения совпадают. Если ось OX направлена по направлению движения тела, то проекции векторов перемещения, скорости и ускорения равны их модулям. Поэтому мы можем записать:

$$s = \frac{at^2}{2}. \qquad (1)$$

Найдём среднюю скорость равноускоренного движения тела, начальная скорость которого равна нулю. Для этого нужно перемещение тела разделить на время движения:

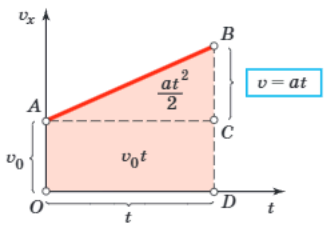
$$v_{ср} = \frac{s}{t} = \frac{at^2}{2t} = \frac{at}{2}.$$

Учитывая, что $at = v$, получим

$$v_{ср} = \frac{v}{2},$$

т. е. **средняя скорость за время движения t равна половине конечной скорости.**

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ТЕЛА, НАЧАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ КОТОРОГО НЕ РАВНА НУЛЮ. Если тело движется прямолинейно и равноускоренно, а начальная скорость тела не равна нулю, то график зависимости проекции скорости от времени будет выглядеть так, как изображено на рисунке. В этом случае модуль вектора перемещения также будет численно равен площади фигуры под графиком.



Площадь фигуры $OABD$ равна сумме площадей треугольника ABC и прямоугольника $OACD$. Площадь S_1 прямоугольника равна произведению длин его сторон:

$$S_1 = v_{0x}t.$$

Площадь S_2 треугольника, как и в предыдущем случае, равна

$$S_2 = \frac{a_xt^2}{2}.$$

Так как перемещение $s_x = S_1 + S_2$, то

$$s_x = v_{0x}t + \frac{a_xt^2}{2}. \qquad (2)$$

ВАЖНО

Если обозначить величины: проекция скорости тела в начальный момент времени — v_{0x}, время движения — t, проекция ускорения — a_x, то **проекцию перемещения** s_x тела, движущегося прямолинейно равнопеременно, рассчитывают по формуле

$$s_x = v_{0x}t + \frac{a_xt^2}{2}.$$

Учитывая, что при прямолинейном равноускоренном движении направление движения совпадает с направлением скорости и ускорения, проекции в этой формуле можно заменить модулями соответствующих векторов:

$$s = v_0t + \frac{at^2}{2}.$$

Рассмотрим движение тела вдоль оси OX. Пусть в момент времени $t = 0$ тело имеет скорость v_0. Проекция скорости v_{0x} на ось OX в этом случае равна модулю скорости v_0. Если тело движется замедленно, то его ускорение направлено в сторону, противоположную направлению движения, а проекция ускорения a_x отрицательна: $a_x = -a$, где a — модуль ускорения. Тогда модуль перемещения за время t может быть определён по формуле

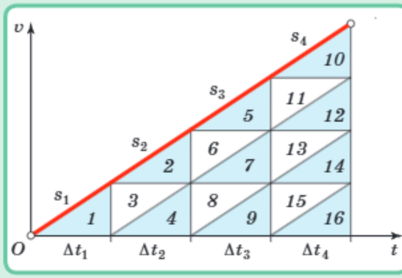
$$s = v_0t - \frac{at^2}{2}.$$

ЭТО ИНТЕРЕСНО

В результате многочисленных опытов по изучению равноускоренного движения тел по наклонным плоскостям из состояния покоя Г. Галилей обнаружил, что пути, проходимые телом за последовательные равные промежутки времени, относятся как последовательные нечётные числа:

$$s_1 : s_2 : s_3 : \ldots = 1 : 3 : 5 : \ldots .$$

Рассмотрим график зависимости скорости от времени, на котором отмечены равные промежутки времени $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3$ и т. д. Можно доказать, что все треугольники, изображённые на рисунке, равны (по трём сторонам). Путь s_1, пройденный за первый промежуток времени Δt_1, равен площади треугольника *1*. Путь s_2, пройденный за второй промежуток времени Δt_2, равен сумме площадей трёх треугольников *2*, *3* и *4*. Путь s_3, пройденный за следующий промежуток времени Δt_3, равен сумме площадей треугольников *5*, *6*, *7*, *8* и *9*. Таким образом, пройденные пути s_1, s_2, s_3, ... относятся как нечётные числа 1 : 3 : 5 : ... .



Из формулы проекции скорости для прямолинейного равноускоренного движения $v_x = v_{0x} + a_x t$ выразим **время**:

$$t = \frac{v_x - v_{0x}}{a_x}.$$

Подставив полученное выражение в формулу (2), найдём проекцию перемещения:

$$s_x = v_{0x} \cdot \frac{v_x - v_{0x}}{a_x} + \frac{a_x}{2} \cdot \left(\frac{v_x - v_{0x}}{a_x}\right)^2 = \frac{2v_{0x}(v_x - v_{0x}) + (v_x - v_{0x})^2}{2a_x} = \frac{(v_x - v_{0x})(v_x + v_{0x})}{2a_x}.$$

Таким образом,

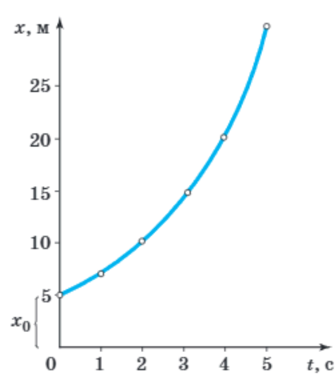
$$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}.$$

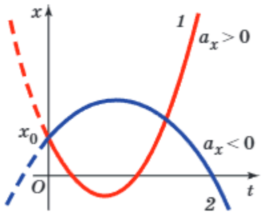
Эта формула позволяет вычислить **проекцию перемещения** тела в случае, если не задано время движения.

КООРДИНАТА ТЕЛА, ДВИЖУЩЕГОСЯ РАВНОУСКОРЕННО. С помощью формулы (2) можно найти положение (координату) тела в любой момент времени при прямолинейном равноускоренном движении.

Поскольку $s_x = x - x_0$ и $s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$, то $x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$.

График зависимости координаты тела от времени при прямолинейном равноускоренном движении представляет собой параболу (см. рисунок).





По направлению ветвей участков параболы можно судить о знаке проекции ускорения при движении тела. Например, если ветви параболы направлены вверх (график *1*), то проекция ускорения положительна: $a_x > 0$. Если ветви параболы направлены вниз (график *2*), то проекция ускорения отрицательна: $a_x < 0$.

Однако проекции скорости тела на указанных графиках могут быть как положительными, так и отрицательными. Несмотря на то что $a_x > 0$ (график *1*), тело сначала замедляет своё движение ($v_x < 0$), а затем ускоряется ($v_x > 0$). При этом вершина параболы соответствует моменту разворота тела.

Зафиксировать положения тела через равные промежутки времени позволяет прибор *стробоскоп*. Он производит повторяющиеся световые вспышки. Настроив прибор и задав частоту вспышек, можно наблюдать за быстро движущимся объектом. Он будет освещаться только в определённые моменты времени во время вспышек прибора. Сделав фотографию этого процесса с большой выдержкой, по изображению можно определить характер движения объекта.

ВЫВОДЫ

- Проекция перемещения пропорциональна квадрату времени движения тела.
- График зависимости координаты тела от времени при прямолинейном равноускоренном движении представляет собой параболу.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Равноускоренное движение; перемещение; координата тела

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Как найти перемещение тела при прямолинейном равноускоренном движении?
2. Как найти координату тела при прямолинейном равноускоренном движении в произвольный момент времени?
3. Известно, что тело в начальный момент времени имеет положительное значение начальной координаты и положительное значение проекции ускорения на ось OX. Можно ли при этом утверждать, что движение тела является равноускоренным и его координата с течением времени только увеличивается?

ДВИЖЕНИЕ С УСКОРЕНИЕМ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ §10

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое свободное падение.
- Уравнение движения тела, брошенного вертикально вверх.
- На какую максимальную высоту может подняться тело, брошенное вертикально вверх.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое равнопеременное движение?
- Как вычислить скорость и перемещение при прямолинейном равнопеременном движении?
- Что такое ускорение свободного падения?

Открытие того, что все тела при отсутствии влияния сопротивления воздуха падают на поверхность Земли с одинаковым ускорением, принадлежит Г. Галилею.

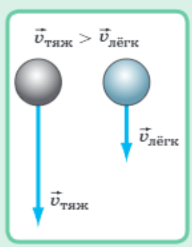
СВОБОДНОЕ ПАДЕНИЕ. Движение тела только под действием силы тяжести называется **свободным падением.** Говорить о свободном падении тела можно только в том случае, если сила сопротивления воздуха много меньше силы тяжести и ею можно пренебречь, а также если отсутствует воздействие со стороны других тел. В вакууме все тела, падающие под действием силы тяжести, движутся с одинаковым ускорением — **ускорением свободного падения.** Оно обычно обозначается буквой g. В реальности свободное падение тел нарушается из-за сопротивления воздуха.

Ускорение свободного падения всегда направлено вертикально вниз и вблизи поверхности Земли приблизительно равно 9,8 м/с^2.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Над вопросами, почему тела падают и от чего зависит скорость падения тел, размышляли ещё древнегреческие учёные. Аристотель выдвинул гипотезу о том, что падение тела происходит тем быстрее, чем тяжелее само тело. Галилео Галилей был не согласен с выводами Аристотеля и провёл опыты, пытаясь подтвердить или опровергнуть его гипотезу. По легенде, он бросал лёгкие и тяжёлые тела со знаменитой Пизанской башни и установил, что и тяжёлые, и лёгкие шары достигают земли почти одновременно. Небольшое различие во времени падения связано с сопротивлением воздуха. Таким образом при помощи эксперимента Галилей опроверг гипотезу Аристотеля.

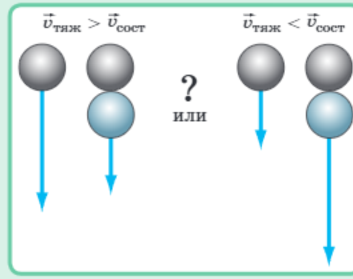
Приведём здесь рассуждения Галилея о падении тел. Пусть имеются два тела — тяжёлое и лёгкое, например свинцовый и медный шарики. Согласно Аристотелю, тяжёлое тело падает быстрее, чем лёгкое. Соединим их друг с другом в составное тело и обсудим, скорость какого тела больше при падении с башни.

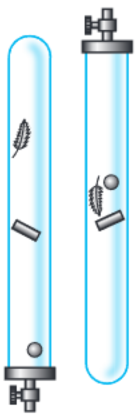


С одной стороны, тяжёлое тело, которое падало в одиночку быстрее, теперь затормозится за счёт того, что лёгкое падает медленнее. Следовательно, тяжёлое тело будет падать быстрее составного тела.

Но, в то же время, составное тело тяжелее исходных и должно падать быстрее, чем тяжёлое или лёгкое тела.

Мы получили два противоречивых вывода, следовательно, изначальное предположение о том, что тяжёлое тело падает быстрее, чем лёгкое, было неверно. Таким образом, тела одинаковые по форме, но разной массы, начав падать одновременно, движутся с одинаковой скоростью.





Свободное падение тел можно продемонстрировать при помощи *трубки Ньютона* — стеклянной трубки, один конец которой закрыт, а другой снабжён краном, через который из трубки можно откачать воздух. Не откачивая воздух, поместим в трубку пёрышко, кусочек пробки и дробинку. Если трубку резко перевернуть, эти три предмета будут падать по-разному и достигнут дна в разные моменты времени.

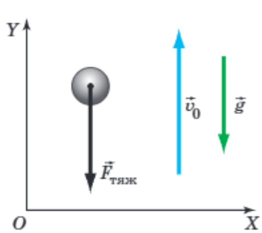
Теперь откачаем из трубки воздух. Если её быстро перевернуть, все три предмета упадут на дно одновременно, так как все падающие вниз тела движутся с одинаковым ускорением.

Свободным падением считается движение не только вертикально вниз. Примером свободного падения также является движение тела, брошенного вертикально вверх.

СКОРОСТЬ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ. Для того чтобы тело начало своё движение вверх, на него в течение короткого промежутка времени действуют с некоторой силой и сообщают ему начальную скорость $\vec{v}_0$. После этого тело движется вверх, постепенно замедляя своё движение, затем на мгновение останавливается, достигнув наибольшей высоты, и, наконец, начинает падать вниз. Если пренебречь сопротивлением воздуха, то можно сказать, что на тело в течение всего времени его движения действует только сила тяжести.

Так как направление начальной скорости тела противоположно направлению ускорения свободного падения, то модуль скорости тела при его движении вверх уменьшается, т. е. тело движется *замедленно*. При этом скорость тела в любой момент времени t равна:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t. \qquad (1)$$



Направим ось OY вертикально вверх. Так как направление оси совпадает с направлением начальной скорости $\vec{v}_0$, то проекция v_{0y} положительна и равна модулю начальной скорости: $v_{0y} = v_0$.

Направление ускорения свободного падения противоположно направлению оси OY, поэтому проекция g_y отрицательна:

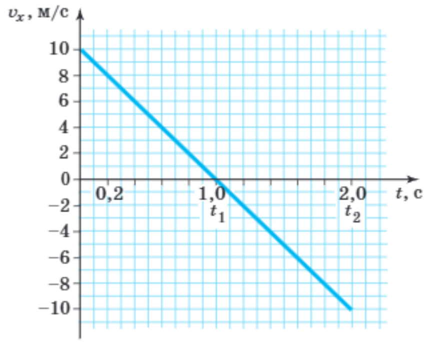
$$g_y = -g = -9{,}8 \text{ м/с}^2.$$

Запишем уравнение (1) для проекции скорости v_y:

$$v_y = v_{0y} + g_y t,$$

или

$$v_y = v_0 - gt. \qquad (2)$$



Графиком зависимости проекции скорости от времени является прямая линия. Видно, что с течением времени модуль скорости движения тела уменьшается и в момент времени t_1 его скорость становится равной нулю. Тело останавливается, достигнув наибольшей высоты.

После этого под действием силы тяжести тело начинает своё движение вниз. Это движение является *равноускоренным*, т. е. модуль скорости будет увеличиваться. При этом направление скорости и направление оси OY противоположны, поэтому проекция скорости v_y отрицательна для времени $t > t_1$.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

При падении тела в земной атмосфере на него, кроме силы тяжести, действует также *сила сопротивления* воздуха. Чем больше скорость падения, тем сильнее сопротивление воздуха. В начальный момент тело движется ускоренно и его скорость увеличивается, следовательно, увеличивается и сила сопротивления. Если падение тела происходит достаточно долго, то может наступить момент, когда сила сопротивления станет равна силе тяжести. Их равнодействующая будет равна нулю, и тело продолжит падать уже равномерно. Скорость такого равномерного падения называется *предельной скоростью падения*. Предельная скорость падения во многом зависит от формы тела. Например, предельная скорость дождевых капель бывает от 2 до 9 м/с, а предельная скорость парашютиста до раскрытия парашюта составляет от 53 до 67 м/с.

УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ. Так как движение тела, брошенного вертикально вверх, является движением с постоянным ускорением, то зависимость проекции его перемещения от времени описывается формулой

$$s_y = v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}.$$

Так как ускорение свободного падения и ось направлены противоположно, проекция ускорения свободного падения отрицательна и можно записать:

$$s_y = v_0 t - \frac{gt^2}{2}. \qquad (3)$$

Зависимость координаты тела от времени, т. е. его уравнение движения, в этом случае

$$y = y_0 + v_0 t - \frac{gt^2}{2}. \qquad (4)$$

МАКСИМАЛЬНАЯ ВЫСОТА ПОДЪЁМА ТЕЛА, БРОШЕННОГО ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ. Жизненный опыт показывает, что, чем бо́льшую начальную скорость мы сообщим телу, бросаемому вертикально вверх, тем на бо́льшую высоту оно поднимется. Определим, чему же равна максимальная высота подъёма h.

Очевидно, эта высота соответствует моменту остановки тела, т. е. моменту времени t_1. Тогда по формуле (2)

$$0 = v_0 - gt_1, \quad \text{или} \quad t_1 = \frac{v_0}{g}.$$

Максимальную высоту подъёма тела можно определить из уравнения движения (4), подставив в него найденное значение времени t_1. Учитывая, что нас интересует, на какую высоту поднялось тело по сравнению с его начальным положением, значение y_0 можно считать равным нулю:

$$h = v_0 t_1 - \frac{gt_1^2}{2} = \frac{v_0^2}{g} - \frac{v_0^2}{2g} = \frac{v_0^2}{2g}. \qquad (5)$$

ВАЖНО

Максимальная высота подъёма тела, брошенного вертикально вверх, пропорциональна квадрату его начальной скорости:

$$h = \frac{v_0^2}{2g}.$$

Согласно уравнению (5) наибольшая высота подъёма тела, брошенного вертикально вверх, зависит только от его начальной скорости и не зависит от его массы и формы. Важно понимать, что это справедливо только в случае, когда мы не учитываем сопротивления воздуха. В реальных условиях из-за сопротивления воздуха максимальная высота подъёма тела будет меньше значения, полученного из формулы (5).

ВЫВОДЫ

- Движение тела только под действием силы тяжести называется свободным падением. При свободном падении все тела движутся с одинаковым ускорением — ускорением свободного падения.
- Максимальная высота подъёма тела, брошенного вертикально вверх, пропорциональна квадрату его начальной скорости.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Движение тела, брошенного вертикально вверх

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. С каким ускорением движется тело, брошенное вертикально вверх?
2. Как записывается уравнение движения?
3. Как найти максимальную высоту подъёма тела, брошенного вертикально вверх, если сопротивление воздуха не учитывать? Как изменится ответ, если учесть сопротивление воздуха?
4. Как различаются высоты подъёма тела, брошенного вертикально вверх с одинаковой начальной скоростью, на Земле и на Луне?
5. Если с одной и той же высоты одновременно отпустить скомканный лист бумаги и такой же нескомканный, то скомканный лист упадёт быстрее. Не противоречит ли этот опыт утверждению, что все тела испытывают вблизи поверхности земли одинаковое ускорение?

ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ГОРИЗОНТАЛЬНО §11

НОВОЕ В УРОКЕ

- Как движется тело, брошенное горизонтально.
- Как найти дальность полёта тела, брошенного горизонтально.
- Как найти модуль скорости тела, брошенного горизонтально.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое траектория и перемещение?
- Что такое равномерное и неравномерное движение?
- Что такое мгновенная скорость?
- Уравнение движения тела, брошенного вертикально вверх.

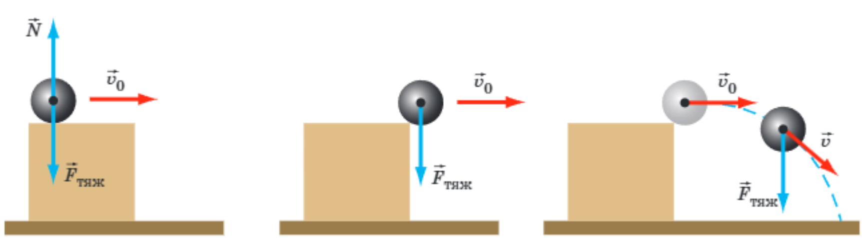
Рассмотрим случай, когда тело, движущееся под действием силы тяжести, имеет начальную скорость, направленную горизонтально. Если не учитывать сопротивление воздуха, то это движение можно считать свободным падением. Примерами такого движения могут быть: движение мяча, брошенного горизонтально; движение стрелы, выпущенной из лука горизонтально, и т. п.

ПРИНЦИП СЛОЖЕНИЯ ДВИЖЕНИЙ. До сих пор мы рассматривали только прямолинейное движение, для описания которого было достаточно одной координатной оси. При этом сила тяжести, действующая на тело, была параллельна этой оси.

Пусть шарик равномерно движется без трения по горизонтальной поверхности с постоянной скоростью $\vec{v}_0$ (рис. *а*). При движении по плоскости сила тяжести, действующая на шарик, компенсируется силой реакции опоры, т. е. равнодействующая этих сил равна нулю.

В момент, когда шарик достигает края горизонтальной поверхности (рис. *б*), сила реакции опоры исчезает. При этом в горизонтальном направлении шарик продолжает своё движение по инерции с той же скоростью $\vec{v}_0$. А в вертикальном направлении на него теперь действует только сила тяжести (силой сопротивления воздуха мы пренебрегаем), поэтому шарик в проекции на вертикальное направление будет испытывать свободное падение с ускорением $\vec{g}$.

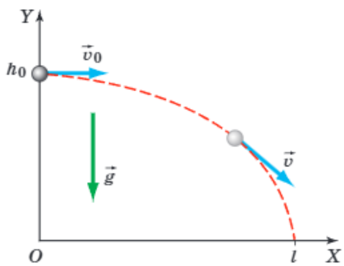
Таким образом, **движение шарика можно представить как сумму двух независимых движений** (рис. *в*): **движения по горизонтали и движения по вертикали**.



а) б) в)

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Изучением движения тел, брошенных горизонтально, занимался Г. Галилей. В своих трудах этот вид движения он описал как сумму двух движений: по горизонтали и по вертикали, введя тем самым в механику *принцип сложения движений*.



ТРАЕКТОРИЯ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ГОРИЗОНТАЛЬНО. Рассмотрим движение тела, брошенного с высоты h_0 и имеющего горизонтальную начальную скорость $\vec{v}_0$. Для описания этого движения координатную ось OX направим горизонтально, а ось OY — вертикально вверх. Траектория этого движения имеет вид плавной кривой, называемой *параболой*. Движение, при котором траектория не является прямой линией, называется *криволинейным*.

ДВИЖЕНИЕ ВДОЛЬ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСИ. Проекция ускорения свободного падения на ось OY отрицательна и равна $g_y = -g$. Направление начальной скорости совпадает с направлением оси OX, поэтому $v_{0y} = 0$.

Поскольку скорость тела, движущегося равноускоренно, в момент времени t можно определить по формуле $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t$, то

$$v_y = -gt. \qquad (1)$$

Найдём высоту h, на которой находится тело в момент времени t. Для этого воспользуемся уравнением движения тела:

$$y = y_0 + v_{0y}t - \frac{gt^2}{2}.$$

Обозначим начальную высоту y_0 как h_0, получим

$$h = h_0 - \frac{gt^2}{2}. \qquad (2)$$

Время t, за которое тело, брошенное горизонтально, достигнет поверхности земли ($y = h = 0$), можно найти при помощи формулы (2): $h_0 = \frac{gt^2}{2}$, откуда

$$t = \sqrt{\frac{2h_0}{g}}. \qquad (3)$$

ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА ВДОЛЬ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСИ. Проекция ускорения тела на ось OX равна $g_x = 0$. Поэтому движение вдоль оси OX является равномерным и проекция скорости движения в этом направлении не изменяется:

$$v_x = v_0. \qquad (4)$$

Тогда в момент времени t координату x можно найти по формуле

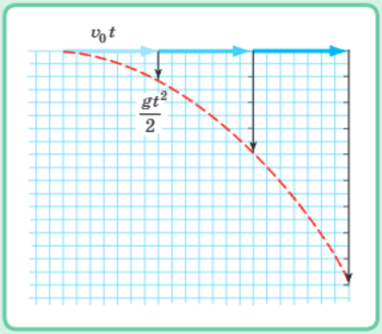
$$x = v_0 t. \qquad (5)$$

Дальность полёта тела, брошенного горизонтально, равна $l = v_0 t$. Подставив в это выражение время движения (3), получим:

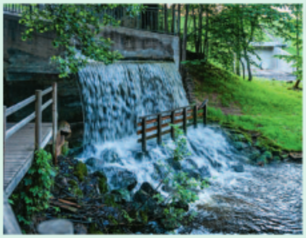
$$l = v_0\sqrt{\frac{2h_0}{g}}.$$

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Проведём на листе клетчатой бумаги вертикальную и горизонтальную линии. Так как движения в горизонтальном и вертикальном направлениях происходят независимо друг от друга, то через время t тело переместится на отрезок v_0t вправо и на отрезок $gt^2/2$ вниз. Если отложить по горизонтали отрезок v_0t, а из его конца вертикальный отрезок $gt^2/2$, то получится точка, в которой тело окажется через время t. Сделав подобное построение для нескольких промежутков времени и соединив эти точки плавной линией, получим ветвь параболы.



Знание методов расчёта кинематических характеристик движения тел под действием силы тяжести могут быть полезны самым разным специалистам. Например, ландшафтному дизайнеру при проектировании искусственного водопада в парке важно точно рассчитать скорость течения воды в канале, чтобы в пространстве под водопадом было достаточно места для пешеходной тропинки. Пусть вода течёт со скоростью 1,8 м/с и падает с высоты 2,5 м. Рассчитаем, какой может быть ширина тропинки под водопадом. Для этого необходимо найти дальность полёта водяной струи:



$$l = v_0\sqrt{\frac{2h_0}{g}}; \quad l = 1{,}8\,\frac{\text{м}}{\text{с}}\sqrt{\frac{2 \cdot 2{,}5\ \text{м}}{9{,}8\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2}}} \approx 1{,}3\ \text{м}.$$

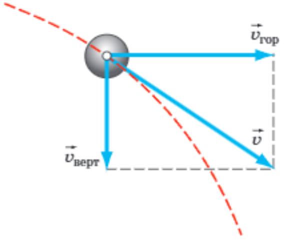
Таким образом, ширина тропинки не должна превышать 1,3 м.

СКОРОСТЬ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ГОРИЗОНТАЛЬНО. Мы уже знаем, что движение тела, брошенного горизонтально, можно рассматривать как сложение движений вдоль горизонтальной и вертикальной осей. В каждый момент времени такое тело имеет мгновенную скорость $\vec{v}$, проекции которой можно найти по формулам (1) и (4).

Если обозначить скорость движения тела вдоль оси OX через $\vec{v}_{\text{гор}}$, а его скорость вдоль оси OY через $\vec{v}_{\text{верт}}$, то можно записать:

$$\vec{v} = \vec{v}_{\text{гор}} + \vec{v}_{\text{верт}},$$

т. е. вектор скорости тела можно найти как сумму векторов скоростей тела вдоль координатных осей.



Напомним, что для того чтобы изобразить вектор, являющийся суммой двух векторов, используют *правило параллелограмма*: для векторов с общим началом их сумма изображается диагональю параллелограмма, построенного на этих векторах. В нашем случае векторы $\vec{v}_{гор}$ и $\vec{v}_{верт}$ перпендикулярны друг другу, поэтому их сумма — диагональ прямоугольника.

Модули векторов $\vec{v}_{гор}$ и $\vec{v}_{верт}$ равны проекциям скорости $\vec{v}$ на оси OX и OY:

$$v_{гор} = v_x = v_0; \quad v_{верт} = v_y = gt.$$

Значение (модуль) скорости тела в любой момент времени можно найти по теореме Пифагора:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 + (gt)^2}.$$

ВЫВОД

Движение тела, брошенного горизонтально, можно представить в виде суммы двух независимых движений: движения вдоль горизонтальной оси OX и движения вдоль вертикальной оси OY.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Движение тела, брошенного горизонтально

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Как найти координаты тела, брошенного горизонтально, в момент времени t?
2. Как найти модуль скорости тела, брошенного горизонтально?
3. Из пушки и мушкета, стволы которых горизонтальны и находятся на одной высоте от поверхности земли, одновременно произведены выстрелы. Одновременно ли ядро и пуля упадут на землю? Обоснуйте свой ответ. Изменится ли ответ, если учесть сопротивление воздуха?

ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ §12

НОВОЕ В УРОКЕ

- Как движется тело, брошенное под углом к горизонту.
- Как найти дальность и высоту подъёма тела, брошенного под углом к горизонту.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Как движется тело, брошенное горизонтально?
- Как найти дальность и высоту подъёма тела, брошенного горизонтально?
- Как найти модуль скорости тела, брошенного горизонтально?

Теперь рассмотрим случай, когда тело, движущееся под действием силы тяжести, имеет начальную скорость, направленную под некоторым углом к горизонту. Примерами такого движения могут служить: движение мяча; движение снаряда, выпущенного из пушки; движение лыжника при прыжке с трамплина; движение воды из шланга и т. п.

ТРАЕКТОРИЯ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ. Движение тела, брошенного под углом к горизонту, можно разбить на два этапа. На первом этапе при движении от начала траектории до точки, соответствующей наибольшей высоте подъёма, скорость тела уменьшается. На втором этапе тело будет двигаться вниз, аналогично движению тела, брошенного горизонтально.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Внимание учёных к описанию движения тел вблизи поверхности земли начиная с XVI в. объяснялось необходимостью развития *баллистики* — науки о движении снарядов, выпущенных из огнестрельного оружия, и в частности развития теории полёта пушечных ядер. Итальянский математик Н. Тарталья в своих сочинениях впервые утверждал, что траектория пушечного ядра является кривой линией, тогда как его предшественники считали, что она состоит из двух прямых, соединённых кривой линией. Например, траекторию движения снарядов на старинных гравюрах изображали так, как показано на рисунке 1. Это неудивительно, так как в реальной жизни с учётом сопротивления воздуха траектория такого движения уже не является параболой, а выглядит так, как изображено на рисунке 2 сплошной линией. Пунктирной красной линией показана идеальная траектория движения снаряда.

Рис. 1

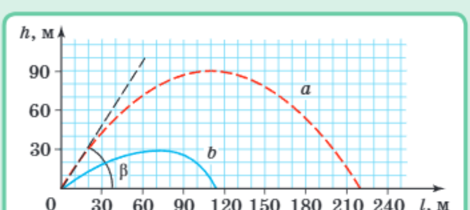
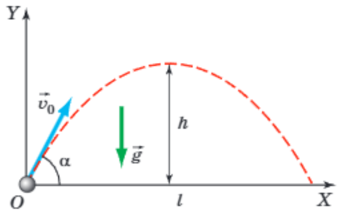


Рис. 2

Точную форму траектории тела, брошенного под углом к горизонту, установил великий Галилей спустя почти сто лет после Тартальи. Именно он доказал, что траектории снарядов, если пренебречь сопротивлением воздуха, представляют собой *параболы*.



Рассмотрим движение тела, брошенного под углом α к горизонту. Пусть при этом точка бросания тела и точка его падения лежат на горизонтальной прямой. Сопротивлением воздуха пренебрегаем. Это движение также можно представить как сумму двух независимых движений: равномерного движения вдоль оси OX и движения под действием силы тяжести вдоль оси OY.

Введём следующие обозначения: $\vec{v}_0$ — начальная скорость, h — максимальная высота подъёма тела, l — дальность полёта. Обозначим проекцию начальной скорости на ось OX через v_{0x} и на ось OY через v_{0y}. Поскольку движение вдоль оси OX является равномерным, то проекция скорости на эту ось остаётся неизменной: $v_x = v_{0x}$.

ВЫСОТА ПОДЪЁМА ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ. Поднимаясь вверх, тело движется замедленно, с постоянным ускорением, и его скорость в момент времени t можно найти по формуле $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t$.

Рассмотрим движение тела вдоль оси OY:

$$v_y = v_{0y} - gt. \tag{1}$$

Обозначим максимальную высоту подъёма тела как h, а момент времени, в который тело достигло наибольшей высоты, через $t_{\text{под}}$. Поскольку в наивысшей точке траектории $v_y = 0$, то с учётом (1) находим $v_{0y} = gt_{\text{под}}$, откуда

$$t_{\text{под}} = \frac{v_{0y}}{g}. \tag{2}$$

Воспользовавшись уравнением движения тела и приняв $y_0 = 0$ и $y = h$, получим

$$h = v_{0y}t_{\text{под}} - \frac{gt_{\text{под}}^2}{2}. \tag{3}$$

Подставив выражение (2) в равенство (3), получим высоту подъёма:

$$h = \frac{v_{0y}^2}{2g}.$$

ВРЕМЯ ПОЛЁТА ТЕЛА. Всё время t полёта тела можно определить, учитывая, что в момент падения проекция перемещения на ось OY будет равна нулю: $s_y = 0$, т. е.

$$0 = v_{0y}t - \frac{gt^2}{2}.$$

Решая данное квадратное уравнение, получаем два корня: $t = 0$ (соответствует начальному положению тела) и $t = \frac{2v_{0y}}{g}$ (соответствует времени окончания полёта тела). Сравнив полученное время t со временем $t_{\text{под}}$ (формула (2)), затраченным телом на подъём до наивысшей точки траектории, можно сделать следующий вывод. **При отсутствии сопротивления воздуха время $t_{\text{под}}$, затраченное телом на подъём, составляет половину всего времени движения тела, т. е. оно равно времени от момента, когда тело достигает максимальной высоты, до момента падения тела.**

ДАЛЬНОСТЬ ПОЛЁТА ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ. Учитывая, что движение тела вдоль горизонтальной оси равномерное, дальность l полёта можно найти по формуле

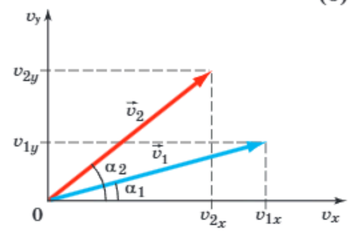
$$l = v_x t = v_{0x} t, \qquad (4)$$

где t — время полёта. С учётом формулы (2) можно записать:

$$t = 2t_{\text{под}} = \frac{2v_{0y}}{g}. \qquad (5)$$

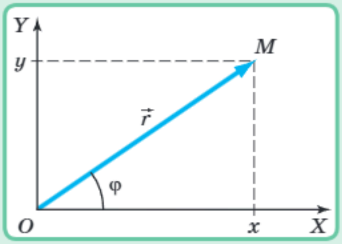
Подставив выражение (5) в формулу (4), получим

$$l = \frac{2v_{0x}v_{0y}}{g}. \qquad (6)$$



Полученное выражение свидетельствует о том, что при одном и том же значении начальной скорости дальность полёта зависит от значений проекций v_{0x} и v_{0y} и, следовательно, от угла α. При одном и том же значении начальной скорости значение проекции v_y будет тем больше, чем больше угол α. При этом с увеличением угла значение проекции v_x уменьшается.

В математике и физике важную роль играет понятие вектора, начало которого совпадает с началом координат. **Радиус-вектором** ($\overrightarrow{OM}$) называется направленный отрезок, соединяющий начало координат O и точку M с произвольными координатами. Радиус-вектор принято обозначать $\vec{r}$.



Из рисунка видно, что координаты x и y точки M являются проекциями радиус-вектора $\vec{r}$ на координатные оси:

$$r^2 = r_x^2 + r_y^2 = x^2 + y^2.$$

Положение любой точки M на плоскости определяется её координатами x и y.

Из рисунка видно, что можно однозначно определить положение этой точки, если знать длину радиус-вектора, концом которого является эта точка, и положение этого радиус-вектора относительно осей координат. Для определения положения радиус-вектора относительно системы координат достаточно знать угол φ между ним и осью OX.

Синусом угла называется отношение ординаты y к длине r радиус-вектора $\overrightarrow{OM}$:

$$\sin\varphi = \frac{y}{r}.$$

Косинусом угла называется отношение абсциссы x к длине r радиус-вектора $\overrightarrow{OM}$:

$$\cos\varphi = \frac{x}{r}.$$

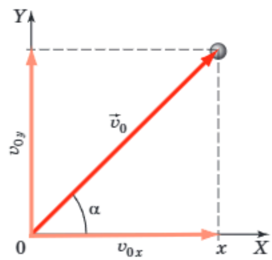
Таким образом, если известны длина радиус-вектора и угол φ, то проекции радиус-вектора на оси координат определяются по формулам

$$x = r\cos\varphi;$$
$$y = r\sin\varphi.$$

Из курса математики известно, что тригонометрические функции sin φ и cos φ зависят только от угла φ и не зависят от длины радиус-вектора *r*.

При решении физических задач часто используется тригонометрическая функция, **тангенс** угла:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} = \frac{y}{x}.$$

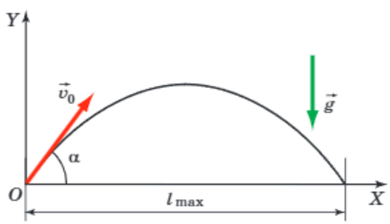


Проекции вектора скорости v_{0x} и v_{0y} соответственно равны

$$v_{0x} = v_0\cos\alpha;$$

$$v_{0y} = v_0\sin\alpha.$$

Учитывая свойства тригонометрических функций синуса и косинуса, можно показать, что максимальное значение дальности полёта *l* (6) достигается для угла α = 45°. Рассмотрим это на примере.



Пусть человек бросает мяч под углом α к горизонту. Он последовательно совершает три броска, причём в первый раз мяч брошен под углом α = 30° к горизонту, второй раз — под углом 45°, а третий — под углом 60°. Ответим на вопрос: чему равна дальность полёта мяча в каждом из этих трёх случаев? При этом начальную скорость мяча во всех случаях будем считать одинаковой и равной 25 м/с. Для решения задачи выберем систему отсчёта, связанную с землёй. Ось *OX* направим горизонтально по направлению полёта мяча, ось *OY* — вертикально вверх. Поскольку высота подъёма мяча много больше роста человека, можно считать, что проекции на ось *OY* начального положения мяча и положения мяча в точке падения равны нулю, т. е. можно не учитывать размер мяча.

Из формулы (6) получим выражение для дальности полёта мяча:

$$l = \frac{2v_{0x}v_{0y}}{g} = \frac{2v_0^2 \sin\alpha \cos\alpha}{g}.$$

Подставив числовые значения, получим

для $\alpha = 30°$: $$l_1 = \frac{2 \cdot 25^2 \cdot 0{,}87 \cdot 0{,}5}{9{,}8} \approx 55{,}23 \text{ (м)};$$

для $\alpha = 45°$: $$l_2 = \frac{2 \cdot 25^2 \cdot 0{,}71 \cdot 0{,}71}{9{,}8} \approx 63{,}78 \text{ (м)};$$

для $\alpha = 60°$: $$l_3 = \frac{2 \cdot 25^2 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}87}{9{,}8} \approx 55{,}23 \text{ (м)}.$$

Таким образом, наибольшая дальность полёта мяча (63,78 м) соответствует броску, совершённому под углом 45° к горизонту.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Именно Н. Тарталья впервые установил, что наибольшая дальность полёта тела, брошенного под углом к горизонту, достигается под углом 45°. Этот результат он получил, пытаясь ответить на вопрос своего друга-артиллериста, под каким углом необходимо устанавливать ствол пушки для наибольшей дальности полёта ядра.

ВЫВОДЫ

- Траекторией движения тела, брошенного под углом к горизонту, является парабола.
- Максимальное значение дальности полёта тела достигается при угле $\alpha = 45°$.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Движение тела, брошенного под углом к горизонту

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Как записывается уравнение движения тела, брошенного под углом к горизонту?
2. Как найти максимальную высоту подъёма тела, брошенного под углом к горизонту?
3. Как проекции скорости на óси OX и OY зависят от угла α, под которым брошено тело?
4. Под каким углом к горизонту нужно бросить мяч, чтобы дальность полёта мяча была равна максимальной высоте его подъёма?

§ 13 ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ

НОВОЕ В УРОКЕ

- Как направлена мгновенная скорость тела при его движении по окружности.
- Как направлено ускорение тела при его движении по окружности и как его вычислить.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое касательная к окружности?
- Что такое равномерное и неравномерное движение?
- Что такое перемещение и мгновенная скорость?

В зависимости от формы траектории движение можно разделить на прямолинейное и криволинейное. Одним из простейших видов криволинейного движения является движение тела по окружности. Рассмотрим такое движение при постоянной по модулю скорости.

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ И СКОРОСТЬ ПРИ КРИВОЛИНЕЙНОМ ДВИЖЕНИИ. Вы уже знаете, что **перемещение** — это направленный отрезок, соединяющий начальное и конечное положения тела. Значение перемещения не зависит от формы траектории тела. Поэтому в случае криволинейного движения, так же как и при прямолинейном движении, перемещение — величина векторная, а её модуль показывает расстояние между начальной и конечной точками движения.

Скорость тела, движущегося криволинейно, изменяет направление в каждой точке траектории. Поэтому при описании криволинейного движения в данный момент времени или в данной точке траектории используют понятие *мгновенной скорости*.

а) б)

Рис. 1

НАПРАВЛЕНИЕ ВЕКТОРА МГНОВЕННОЙ СКОРОСТИ. При движении тела по окружности при неизменном модуле скорости направление скорости изменяется в каждый момент времени. Как направлен вектор мгновенной скорости?

Для ответа на этот вопрос рассмотрим движение некоторого тела, закреплённого на верёвке и раскрученного в горизонтальной плоскости (рис. 1, *а*). Такое тело движется по окружности. Если верёвка оборвётся, то тело начнёт двигаться по *прямой* (рис. 1, *б*). Эта прямая — касательная к окружности в той точке, где находилось тело в момент разрыва верёвки. При этом направление движения тела совпадает с направлением мгновенной скорости тела в момент разрыва верёвки (рис. 2).

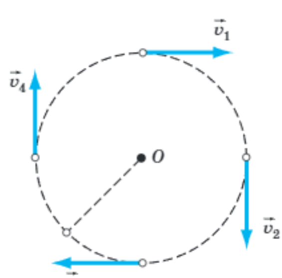


Рис. 2

Мгновенная скорость тела в любой точке траектории направлена по касательной к траектории в этой точке.

НАПРАВЛЕНИЕ ВЕКТОРА УСКОРЕНИЯ ТЕЛА, ДВИЖУЩЕГОСЯ ПО ОКРУЖНОСТИ. При движении по окружности с постоянной по модулю скоростью направление скорости изменяется в каждый момент времени. Значит, такое движение является движением с ускорением.

Рассмотрим движение тела по окружности с радиусом R. Обозначим скорость тела в точке A — $\vec{v}_1$, а его скорость в точке B — $\vec{v}_2$. Тогда ускорение, с которым тело движется, можно найти по формуле

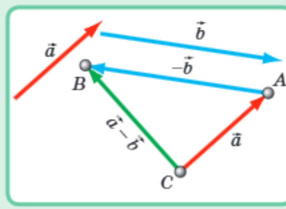
$$\vec{a} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t}. \tag{1}$$

В числителе этой формулы стоит векторная физическая величина, а в знаменателе — скалярная. Поэтому направление вектора ускорения должно совпадать с направлением вектора $\Delta\vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$, равного разности векторов скоростей.

Вычитание векторов можно представить как сложение с отрицательным вектором:

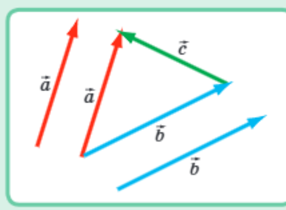
$$\vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b}).$$

Здесь $-\vec{b}$ является вектором, противоположным вектору $\vec{b}$.

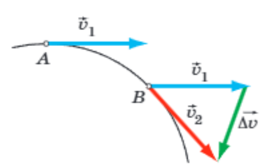


Разностью векторов называется такой вектор $\vec{c}$, сумма которого с вектором $\vec{b}$ равна вектору $\vec{a}$. Разность векторов обозначается

$$\vec{c} = \vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b}).$$



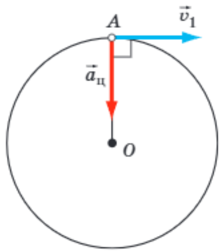
На практике, для того чтобы изобразить вектор, являющийся разностью двух векторов, также используют *правило треугольника*. Сначала векторы изображаются исходящими из одной точки (при этом двигать их можно только при помощи параллельного переноса). Затем проводится отрезок так, чтобы получился треугольник. Вектор, начало которого совпадает с концом вектора $\vec{b}$, а конец — с концом вектора $\vec{a}$, и будет их разностью.



В нашем случае направленный отрезок, соединяющий конец вычитаемого вектора $\vec{v}_1$ с концом уменьшаемого вектора $\vec{v}_2$, и будет их векторной разностью. Из рисунка видно, что вектор $\Delta\vec{v}$ и, следовательно, вектор $\vec{a}$ направлены внутрь окружности.

Для того чтобы понять, как направлено ускорение в определённой точке траектории, представим, что промежуток времени от момента нахождения тела в точке A до момента, когда тело стало находиться в точке B, становится всё меньше и меньше. Тогда точки A и B стягиваются в одну точку A.

При этом направление вектора $\Delta\vec{v}$ приближается к направлению вектора $\overrightarrow{AO}$.



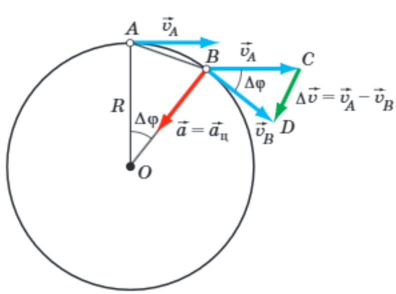
Получается, что ускорение тела, движущегося по окружности с постоянной по модулю скоростью, направлено по радиусу окружности к её центру. Именно поэтому оно называется *центростремительным* и обозначается $\vec{a}_ц$.

Так как касательная к окружности перпендикулярна радиусу, проведённому в точке касания, то векторы скорости и центростремительного ускорения перпендикулярны друг другу.

Для тренировки космонавтов по привыканию к большим перегрузкам, которые возникают при взлёте и спуске космического корабля, используют специальные центрифуги. Капсула с космонавтом вращается по окружности радиусом более 16 м. При этом испытуемый космонавт должен выполнить определённые действия, чтобы проверить готовность организма к космическому полёту.
Центрифуги используются также в различных сферах деятельности человека. Например, её можно использовать для разделения веществ разной плотности. При вращении центрифуги более тяжёлые частицы перемещаются к краю, а более лёгкие частицы располагаются ближе к центру. Также центрифуги применяют для удаления влаги, например для выжимания сока из фруктов и овощей или для отжима белья.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

В окружающем нас мире существует множество примеров проявления центростремительного ускорения. Когда автомобилист или мотоциклист совершает поворот на дороге, он испытывает центростремительное ускорение. Искусственные спутники, вращающиеся вокруг Земли, а также планеты, вращающиеся вокруг Солнца, также имеют центростремительное ускорение. Даже электроны, вращающиеся вокруг ядра атома по круговым орбитам, движутся с центростремительным ускорением.



МОДУЛЬ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОГО УСКОРЕНИЯ ТЕЛА. Для определения модуля центростремительного ускорения вновь обратимся к рисунку. Пусть тело за время t, двигаясь по окружности с центром в точке O и радиусом R, переместилось из точки A в точку B. При этом вектор $\overrightarrow{OA}$ займёт положение вектора $\overrightarrow{OB}$, повернувшись на угол $\Delta\varphi$. Треугольники AOB и DBC являются равнобедренными, так как $OA = OB = R$, а $CB = BD = v$. При этом $\angle AOB = \angle CBD = \Delta\varphi$ как углы, образованные взаимно перпендикулярными сторонами. Поэтому треугольники AOB и DBC подобны. Следовательно,

$$\frac{CD}{AB} = \frac{BC}{AO}. \qquad (2)$$

Разность скоростей $\Delta\vec{v} = \vec{v}_B - \vec{v}_A = \overrightarrow{CD}$. Тогда соотношение (2) можно записать в виде

$$\frac{\Delta v}{AB} = \frac{v}{R},$$

где Δv и v — модули соответствующих векторов.

Так как AB — модуль перемещения тела, то его значение при малых t можно заменить длиной дуги $\overset{\frown}{AB}$:

$$AB \approx \overset{\frown}{AB} = vt.$$

Подставив это выражение в равенство (2), получим

$$\frac{\Delta v}{vt} = \frac{v}{R}, \quad \text{или} \quad \frac{\Delta v}{t} = \frac{v^2}{R}.$$

С учётом формулы (1) можно записать:

$$a_{ц} = \frac{v^2}{R}.$$

ВАЖНО

Если обозначить величины: модуль скорости движения тела по окружности — v, радиус окружности — R, то модуль **центростремительного ускорения** можно рассчитать по формуле

$$a_{ц} = \frac{v^2}{R}.$$

При равномерном движении по окружности модуль скорости движения и радиус окружности не изменяются, поэтому модуль центростремительного ускорения тела также остаётся постоянным.

ВЫВОДЫ

- При движении по окружности мгновенная скорость тела в любой точке траектории направлена по касательной к траектории в этой точке.
- Ускорение тела, движущегося с постоянной по модулю скоростью, направлено по радиусу окружности к её центру.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Движение по окружности; центростремительное ускорение

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Куда направлена мгновенная скорость тела при его движении по окружности?
2. Куда направлено ускорение тела при его движении по окружности?
3. Как вычислить модуль центростремительного ускорения?
4. Используя табличное значение радиуса орбиты Земли и значение времени её обращения вокруг Солнца, вычислите значение центростремительного ускорения движения Земли по орбите.

§ 14 ПЕРИОД И ЧАСТОТА. ЛИНЕЙНАЯ И УГЛОВАЯ СКОРОСТИ

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое период обращения.
- Что такое частота обращения.
- Как вычислить скорость и ускорение тела, движущегося по окружности, если известны его период и частота обращения.
- Что такое угловая скорость.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Как направлена мгновенная скорость тела при его движении по окружности?
- Как направлено ускорение тела при его движении по окружности и как его вычислить?

Измерить скорость тела, движущегося по окружности, не всегда просто. Однако её можно вычислить, используя такие понятия, как *период* и *частота обращения*.

ПЕРИОД ОБРАЩЕНИЯ. Когда тело движется по окружности с постоянной по модулю скоростью, через определённые промежутки времени положение тела и движение в целом повторяются снова и снова. Примером этому может служить движение на обычной детской карусели.

Время, в течение которого тело совершает один полный оборот, называется **периодом обращения**. Эту физическую величину принято обозначать буквой T. Единица этой величины в СИ — *секунда*.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

С понятием периода обращения вы уже знакомились при изучении географии. Например, период обращения Земли вокруг своей оси составляет 23 ч 56 мин 4 с, а период обращения Земли вокруг Солнца — 365 сут 6,5 ч.
Самый короткий период обращения вокруг Солнца в нашей Солнечной системе имеет планета Меркурий. Её период обращения составляет 0,24085 земных лет. Интересно, что самая большая планета Солнечной системы — Юпитер имеет самый короткий период обращения вокруг своей оси — всего 9 ч 50 мин.
В 226 000 000 лет оценивается период обращения Солнечной системы вокруг ядра Галактики.

ЧАСТОТА ОБРАЩЕНИЯ. Число оборотов в единицу времени, которое совершает тело при движении по окружности, называется **частотой обращения**. Частоту обозначают греческой буквой ν.

Если, катаясь на карусели в парке, мы совершаем один оборот за 20 с, то период обращения в этом случае $T = 20$ с. Как определить частоту обращения при этом движении? Сколько оборотов совершает карусель за 1 с?

Очевидно,

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{20}\,\frac{1}{\text{с}},$$

т. е. за 1 с карусель совершает одну двадцатую часть своего полного оборота.

Таким образом, **частота обращения является величиной, обратной периоду обращения**:

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (1)$$

Именно поэтому единица этой физической величины обратна секунде, т. е. 1/с, или $с^{-1}$.

ЛИНЕЙНАЯ СКОРОСТЬ. Часто мгновенную скорость движения по окружности называют **линейной скоростью.** Чтобы определить модуль линейной скорости тела, достаточно знать радиус окружности R и период или частоту обращения.

Действительно, один полный оборот тело совершает за время, равное периоду обращения T. Путь, пройденный телом, в этом случае равен длине окружности:

$$l = 2\pi R.$$

Тогда можно записать:

$$v = \frac{2\pi R}{T} \quad (2)$$

или с учётом формулы (1):

$$v = 2\pi R\nu. \quad (3)$$

ВАЖНО

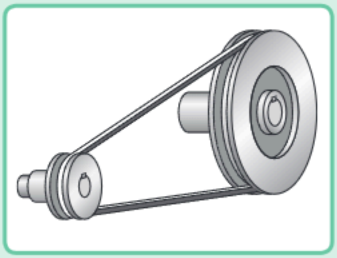
Если обозначить величины: частота обращения — ν, период обращения — T, радиус окружности — R, то модуль **скорости движения** тела по окружности рассчитывают по формуле

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

С учётом формул (2) и (3) можно рассчитать центростремительное ускорение тела, выразив скорость через период или частоту обращения:

$$a_ц = \frac{4\pi^2 R}{T^2} = 4\pi^2 R\nu^2. \quad (4)$$

В настоящее время в различных отраслях промышленности широко используют *шкивы*, являющиеся необходимой частью многих механизмов. **Шкивом** называется колесо, имеющее ободок или маленькую канавку по длине окружности. Основное применение шкива — *ремённая передача*. Простейшая ремённая передача состоит из двух шкивов — ведущего колеса и ведомого колеса, которые соединяет приводной ремень.



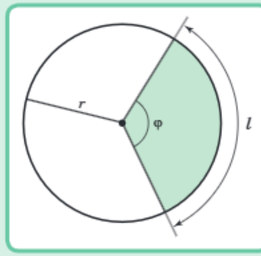
УГЛОВАЯ СКОРОСТЬ. Движение тела по окружности можно характеризовать *углом поворота* радиуса, соединяющего движущееся тело с центром окружности.

Угловая скорость ω — это отношение угла φ поворота радиуса, соединяющего движущуюся точку с центром окружности, ко времени поворота t:

$$\omega = \frac{\varphi}{t}.$$

Угол поворота в СИ измеряют не в градусах, а в *радианах* (рад). Поэтому единицей угловой скорости является *радиан в секунду* (рад/с).

Вы знаете, что углы обычно измеряют в градусах. В физике и математике, кроме градусной меры угла, часто пользуются *радианной мерой*.



Из геометрии известно, что отношение длины дуги l, на которую опирается угол φ, к радиусу r окружности не зависит от радиуса. Поэтому это отношение может быть характеристикой и мерой данного угла:

$$\varphi = \frac{l}{r}.$$

Говорят, что угол равен определённому числу радиан. Так как длина всей окружности с радиусом r равна $2\pi r$, то всей окружности соответствует угол $2\pi r/r = 2\pi$ радиан (рад).

Поскольку вся окружность содержит 360°, то

$$2\pi \text{ рад} = 360°.$$

Следовательно, один радиан соответствует

$$1 \text{ рад} = \frac{360°}{2\pi} = \frac{180°}{\pi} \approx 57°.$$

И наоборот,

$$1° = \frac{\pi}{180°} \text{ рад}.$$

Таким образом, можно записать следующие формулы перехода от градусного измерения к радианному и от радианного измерения к градусному:

$$\varphi = \frac{\pi}{180°}\varphi° \text{ рад} \quad \text{и} \quad \varphi° = \frac{180°}{\pi}\varphi.$$

Обозначение «рад» при записи часто опускают и вместо, например, $180° = \pi$ рад пишут: $180° = \pi$.

Градусная мера	0°	30°	45°	60°	90°	180°	270°	360°
Радианная мера	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3\pi}{2}$	2π

Полный оборот по окружности составляет 360°, или 2π радиан ($\varphi = 2\pi$), а время, затраченное на один оборот, — это период обращения. Поэтому

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \qquad (5)$$

Учитывая формулы (2) и (5) можно найти связь между линейной и угловой скоростями:

$$v = \frac{2\pi R}{T} = \omega R. \qquad (6)$$

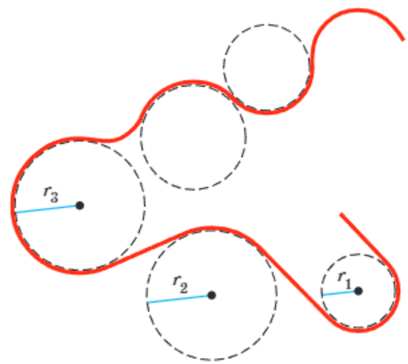
Из формулы (6) видно, что чем больше радиус окружности, по которой движется тело, тем больше значение его линейной скорости.

Модуль ускорения тела, движущегося по окружности, также можно выразить через угловую скорость:

$$a = \frac{4\pi^2 R}{T^2} = \omega^2 R. \tag{7}$$

КРИВОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ. Умение описывать движение тела по окружности чрезвычайно важно, так как движение по произвольной криволинейной траектории можно приближённо представить как движение по дугам окружностей различных радиусов.

При этом следует помнить, что вектор мгновенной скорости всегда направлен по касательной к траектории движения. Зная радиус окружности и скорость в данный момент времени, можно найти остальные характеристики движения.



ВЫВОДЫ

- Время, в течение которого тело совершает один полный оборот при движении по окружности, называется периодом обращения.
- Число оборотов в единицу времени, которое совершает тело при движении по окружности, называется частотой обращения.
- Мгновенная скорость движения по окружности называется линейной скоростью.
- Угловая скорость характеризует изменение угла поворота радиуса, соединяющего движущееся тело с центром окружности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Движение по окружности; период, частота; линейная скорость; угловая скорость

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что такое период обращения и каковы его единицы?
2. Что такое частота обращения и каковы её единицы?
3. Как вычислить скорость и ускорение тела, движущегося по окружности, если известны его период и частота обращения?
4. Что такое линейная и угловая скорости?
5. Две частицы движутся по концентрическим окружностям с разными линейными скоростями, которые в любой момент времени остаются параллельными. Каков должен быть характер движения частиц, чтобы расстояние между ними оставалось неизменным?

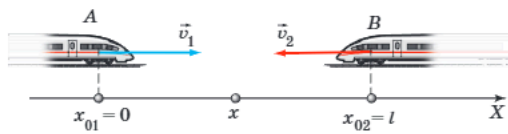
§ 15 РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

ЗАДАЧА 1. Со станции A по направлению к станции B выехал поезд со скоростью 54 км/ч. В это же время со станции B по направлению к станции A отправился другой поезд со скоростью 72 км/ч. Расстояние между станциями равно 33,6 км. Определите время, через которое поезда встретятся, и место встречи.

Дано:	СИ
$v_1 = 54$ км/ч	15 м/с
$v_2 = 72$ км/ч	20 м/с
$l = 33{,}6$ км	33 600 м
t — ?	
x — ?	

Решение.

В качестве тела отсчёта выберем станцию A. Проведём горизонтальную ось OX, параллельную траектории движения поездов и направленную от станции A к станции B.



Запишем уравнения движения для каждого из движущихся тел:

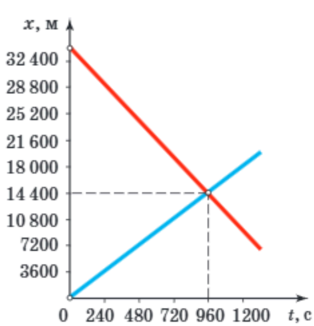
$$x_1 = x_{01} + v_{1x}t;$$
$$x_2 = x_{02} + v_{2x}t.$$

Проекция скорости первого поезда положительна. Проекция скорости второго поезда отрицательна. Начальная координата первого поезда равна нулю: $x_{01} = 0$. Начальная координата второго поезда находится в точке B и равна $x_{02} = l$. Поэтому

$$x_1 = v_1t;$$
$$x_2 = l - v_2t.$$

В момент встречи координата одного поезда будет равна координате другого поезда: $x_1 = x_2 = x$. Поэтому

$$v_1t = l - v_2t.$$



Из полученного уравнения выразим время, через которое произойдёт встреча поездов:

$$t = \frac{l}{v_1 + v_2};$$

$$t = \frac{33\,600 \text{ м}}{15 \text{ м/с} + 20 \text{ м/с}} = 960 \text{ с} = 16 \text{ мин.}$$

Координата места встречи $x = v_1t$;
$x = 15 \text{ м/с} \cdot 960 \text{ с} = 14\,400 \text{ м} = 14{,}4 \text{ км}$.

Построим графики зависимости координат тел от времени: $x_1 = 15t$ и $x_2 = 33\,600 - 20t$.

Моменту встречи соответствует точка пересечения графиков: $t = 960$ с; $x = 14\,400$ м.

Ответ: 16 мин; 14,4 км.

ЗАДАЧА 2. Поезд в метро движется со скоростью 16 м/с. Для того чтобы полностью остановиться, ему требуется время, равное 20 с. Определите ускорение поезда во время торможения и его тормозной путь.

Дано:
$v_0 = 16$ м/с
$v = 0$
$t = 20$ с

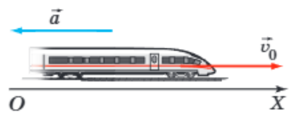
a_x — ?
s — ?

Решение.

Проведём горизонтальную ось OX, параллельную траектории движения поезда и направленную в сторону его движения. Так как направление оси совпадает с направлением векторов скорости, то их проекции положительны.

Ускорение

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}.$$



Поезд останавливается.
Поэтому $v_x = 0$.
Тогда ускорение во время торможения

$$a_x = \frac{0 - 16 \text{ м/с}}{20 \text{ с}} = -0{,}8 \text{ м/с}^2.$$

Ускорение имеет отрицательный знак, это означает, что оно направлено противоположно оси OX и противоположно направлению скорости движения поезда: во время торможения скорость поезда уменьшается.

Пройденный путь изменяется со временем:

$$s = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}.$$

До полной остановки поезд пройдёт путь

$$s = 16 \text{ м/с} \cdot 20 \text{ с} - \frac{0{,}8 \text{ м/с}^2 \cdot (20 \text{ с})^2}{2} = 160 \text{ м}.$$

Ответ: –0,8 м/с^2; 160 м.

ЗАДАЧА 3. Лифт из состояния покоя начинает подниматься с ускорением 2 м/с^2. Через какой промежуток времени его скорость станет равна 2,4 м/с?

Дано:
$v_0 = 0$ м/с
$v = 2{,}4$ м/с
$a = 2$ м/с^2

t — ?

Решение.

Проведём ось OX, параллельную траектории движения лифта и направленную вверх, в сторону его движения. Так как направление оси совпадает с направлением вектора скорости, то его проекция положительна.

Скорость движения лифта возрастает, поэтому направление вектора ускорения совпадает с направлением вектора скорости, и проекция ускорения также положительна. Поэтому $v_x = v_{0x} + a_x t$; $t = \dfrac{v_x - v_{0x}}{a_x}$;

$$t = \frac{2{,}4 \text{ м/с} - 0}{2 \text{ м/с}^2} = 1{,}2 \text{ с}.$$

Ответ: 1,2 с.

ЗАДАЧА 4. С какой высоты был брошен вертикально вниз камень, если его начальная скорость составляла 2 м/с, а время полёта — 1,5 с?

Дано:
$v_0 = 2$ м/с
$t = 1{,}5$ с

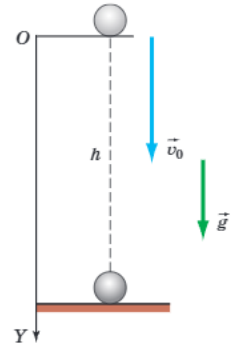
h — ?

Решение.

Направим ось OY вертикально вниз. Проекции начальной скорости и ускорения свободного падения положительны, поэтому можно записать:

$$h = v_0 t + \frac{gt^2}{2};$$

$$h = 2 \cdot 1{,}5 + \frac{10 \cdot 1{,}5^2}{2} = 14{,}25 \text{ (м)}.$$



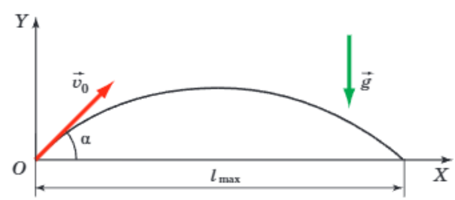
Ответ: 14,25 м.

ЗАДАЧА 5. Теннисист при подаче запускает мяч под углом 45° к горизонту. Определите наибольшую дальность полёта мяча, если он находился в воздухе 3 с.

Дано:
$\alpha = 45°$
$t = 3$ с

l — ?

Решение.



Направим ось OX горизонтально в сторону полёта мяча, ось OY — вертикально вверх.

В момент времени, когда мяч достиг максимальной высоты подъёма,

$t_{под} = t/2;\ \ v_y = 0.$

Проекция скорости на ось OY

$v_y = v_{0y} - gt_{под};\ \ v_{0y} = gt_{под}.$

Так как мяч был брошен под углом $\alpha = 45°$, то

$v_{0y} = v_{0x} = gt_{под} = gt/2;$

$$l = v_{0x} t = \frac{gt^2}{2};$$

$$l = \frac{10 \cdot 3^2}{2} = 45 \text{ (м)}.$$

Ответ: 45 м.

ЗАДАЧА 6. На стене висят часы, у которых длина часовой стрелкой составляет 15 см, а минутная и секундная стрелки имеют одинаковую длину 20 см. Определите линейные и угловые скорости движения кончиков каждой из стрелок.

Дано:
$R_ч = 15$ см
$R_м = R_с = 20$ см
$T_ч = 12$ ч
$T_м = 60$ мин
$T_с = 60$ с

$v_ч$ — ?
$v_м$ — ?
$v_с$ — ?
$\omega_ч$ — ?
$\omega_м$ — ?
$\omega_с$ — ?

СИ
0,15 м
0,2 м
43 200 с
3600 с

Решение.

$v = \dfrac{2\pi R}{T}$ — линейная скорость;

$$v_ч = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}15}{43\,200} \approx 2{,}2 \cdot 10^{-5}\ (\text{м/с});$$

$$v_м = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}2}{3600} \approx 3{,}5 \cdot 10^{-4}\ (\text{м/с});$$

$$v_с = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}2}{60} \approx 0{,}02\ (\text{м/с});$$

$\omega = \dfrac{2\pi}{T}$ — угловая скорость;

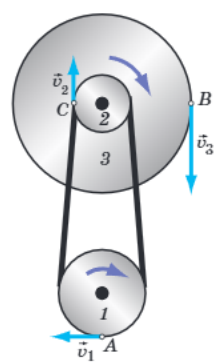
$$\omega_ч = \frac{2 \cdot 3{,}14}{43\,200} \approx 1{,}5 \cdot 10^{-4}\ (\text{рад/с});$$

$$\omega_м = \frac{2 \cdot 3{,}14}{3600} \approx 0{,}002\ (\text{рад/с});$$

$$\omega_с = \frac{2 \cdot 3{,}14}{60} \approx 0{,}1\ (\text{рад/с}).$$

Ответ: $v_ч \approx 2{,}2 \cdot 10^{-5}$ м/с; $v_м \approx 3{,}5 \cdot 10^{-4}$ м/с; $v_с \approx 0{,}02$ м/с; $\omega_ч \approx 1{,}5 \cdot 10^{-4}$ рад/с; $\omega_м \approx 0{,}002$ рад/с; $\omega_с \approx 0{,}1$ рад/с.

ЗАДАЧА 7. Шкив *1* приводит во вращение шкив *3* при помощи ремённой передачи и шкива *2*, жёстко закреплённого на шкиве *3*. Определите скорость, с которой движется точка *B* шкива 3 относительно оси шкива, если скорость точки *A* относительно оси шкива *1* составляет 1 м/с. Считайте, что ремень движется без проскальзывания. Радиусы шкивов $R_1 = 15$ см, $R_2 = 6$ см, $R_3 = 30$ см.



Дано:
$v_A = 1$ м/с
$R_1 = 15$ см
$R_2 = 6$ см
$R_3 = 30$ см

v_B — ?

Решение.

Поскольку шкивы *2* и *3* скреплены друг с другом, то периоды их обращения равны: $T_2 = T_3$.

Шкивы *1* и *2* связаны ремённой передачей, причём при вращении шкива *1* ремень не проскальзывает, следовательно, все точки поверхности шкива *2*, соприкасающиеся с ремнём, вращаются с той же по модулю скоростью, что и точка *A* поверхности шкива *1*:

$v_2 = v_1 = v_A$.

Скорость вращения точек на поверхности шкива может быть определена по формуле $v = \frac{2\pi R}{T}$, где T — период вращения; R — радиус шкива.

Как следует из рисунка, $v_2 = \frac{2\pi R_2}{T_2}$.

Так как $v_2 = v_A$, то $T_2 = \frac{2\pi R_2}{v_A}$.

Но $T_2 = T_3$ и $v_3 = v_B$, т. е. $T_3 = \frac{2\pi R_3}{v_B}$.

Получим $\frac{2\pi R_2}{v_A} = \frac{2\pi R_3}{v_B}$.

Следовательно, $v_B = v_A \frac{R_3}{R_2}$.

Установим наименование полученной величины:

$[v_B] = \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \frac{\text{м}}{\text{м}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

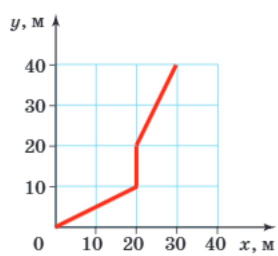
Подставив значения, получим

$v_B = 1 \cdot \frac{30}{6} = 5$ (м/с).

Ответ: 5 м/с.

Задачи для самостоятельного решения

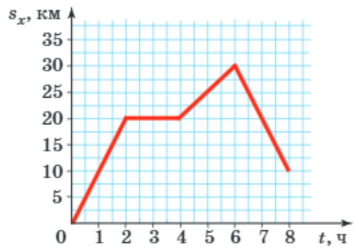
1 На графике показана траектория движения катера. Изобразите вектор перемещения катера. Определите проекции вектора перемещения на координатные оси и модуль перемещения.



2 Грузовой и легковой автомобили движутся равномерно и прямолинейно в одном направлении. Зависимости координаты от времени заданы уравнениями: для грузового автомобиля $x_1(t) = 20 + 70t$, для легкового автомобиля $x_2(t) = 90t$. Определите, через какое время и на каком расстоянии от начала координат легковой автомобиль нагонит грузовой, считая, что скорости автомобилей измеряются в километрах в час, а время движения — в часах.

3 Из пунктов A и B по шоссе навстречу друг другу движутся два автомобиля. Один выехал в 10 ч из пункта A, а другой — в 10 ч 45 мин из пункта B. Первый движется со скоростью 60 км/ч, второй — со скоростью 80 км/ч. Расстояние между пунктами *A* и *B* равно 185 км. В какое время и на каком расстоянии от пункта *A* автомобили встретятся?

4 На графике приведена зависимость проекции перемещения прямолинейно движущейся мототележки от времени. Постройте соответствующий ему график зависимости проекции скорости от времени.



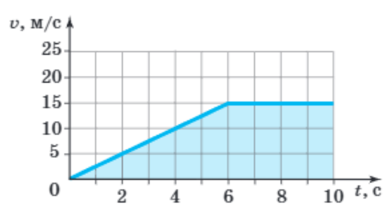
5 Мотоцикл проехал первую половину пути со скоростью 15 м/с, а вторую — со скоростью 30 м/с. Определите среднюю скорость мотоцикла.

6 Первую половину пути велосипедист проехал со скоростью 15 км/ч. С какой скоростью двигался велосипедист на оставшемся участке пути, если средняя скорость на всём пути оказалась равной 10 км/ч?

7 Электропоезд через 15 с после начала движения развил скорость 0,5 м/с. Через какое время после начала движения скорость электропоезда станет 3 м/с? Какой путь пройдёт электропоезд за это время? Движение поезда считайте равноускоренным.

8 При экстренном торможении на сухом асфальте автомобиль движется с отрицательным ускорением –7 м/с^2, а на мокром асфальте — с отрицательным ускорением –3 м/с^2. Определите тормозной путь автомобиля, движущегося со скоростью 100 км/ч, на сухом и на мокром асфальте.

9 Рассмотрите график зависимости скорости от времени для прямолинейного движения тележки. Охарактеризуйте движение тележки за всё время наблюдения. Определите ускорение тележки в первые 6 с движения. Определите скорость тележки с 6-й по 10-ю секунды и перемещение тележки за время 10 с. Постройте графики зависимости координаты от времени $x(t)$ и ускорения от времени $a(t)$.



10 Свободно падающее тело за последнюю секунду проходит половину своего пути. Определите время и высоту падения.

11 Постройте график зависимости скорости от времени, если тело:
а) из состояния покоя свободно падает вниз;
б) падает вниз с начальной скоростью 10 м/с;
в) брошено вертикально вверх с начальной скоростью 15 м/с.

12 Пуля выпущена горизонтально из ствола ружья со скоростью 700 м/с. На каком расстоянии от точки выстрела упадёт пуля и сколько времени она будет находиться в воздухе, если в момент выстрела ствол располагался на высоте 1,5 м от земли?

13 Теннисист при подаче запускает мяч с высоты 2 м над землёй. На каком расстоянии от спортсмена мяч ударится о корт, если начальная скорость мяча равна 10 м/с и направлена под углом 40° к горизонту?

14 Земля делает один оборот вокруг Солнца за 365 суток. Расстояние от Солнца до Земли составляет $149{,}6 \cdot 10^6$ км. Определите линейную скорость движения Земли вокруг Солнца, считая орбиту окружностью.

15 Тело движется по окружности с постоянной скоростью 6 м/с. Вектор скорости изменяет своё направление на 30° за 5 с. Определите значение центростремительного ускорения тела.

16 Радиус колёс автомобиля 50 см. Чему равны линейная и угловая скорости точек на колесе, если оно совершает 250 оборотов в минуту? Чему равна при этом скорость движения автомобиля?

17 Диск циркулярной пилы имеет диаметр 20 см. Вместе с диском на ось циркулярной пилы насажен шкив диаметром 6 см, который соединён посредством ремённой передачи со шкивом диаметром 12 см на двигателе. Определите скорость зубьев циркулярной пилы, если вал двигателя совершает 1800 оборотов в минуту.

18 Вычислите линейные скорости и центростремительные ускорения планет Солнечной системы. Необходимые данные найдите в Интернете. Какая планета движется вокруг Солнца: с наибольшей скоростью; с наименьшей скоростью? Какие из планет Солнечной системы движутся быстрее Земли?

ЛАБОРАТОРНЫЕ И ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ §16

Лабораторная работа № 1

Измерение ускорения тела при равноускоренном прямолинейном движении

Цель работы

Измерить ускорение движения тела по наклонной плоскости.

Оборудование и материалы

Лабораторный штатив, наклонная плоскость длиной 1—1,5 м, небольшой брусок, секундомер, мерная лента.

Ход работы

- С помощью штатива подберите такой угол наклона плоскости, чтобы брусок ускоренно соскальзывал вниз (примерно 20—30°).
- Измерьте время t соскальзывания бруска и пройденный им путь s.
- Используя формулу $s = \frac{at^2}{2}$, вычислите ускорение бруска: $a = \frac{2s}{t^2}$.
- Повторите измерения времени соскальзывания бруска 3 раза.
- Вычислите ускорение бруска в каждом опыте.
- Вычислите среднее значение ускорения.
- Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу в своей тетради.

№ опыта	s, м	t, с	a, м/с^2	$a_{ср}$, м/с^2

- Увеличьте угол наклона плоскости к горизонту (примерно на 5—10°). Повторите все измерения и вычисления для ещё одного угла наклона плоскости.
- Сравните полученные значения ускорений. Сделайте вывод.

Лабораторная работа № 2

Изучение движения тела по окружности

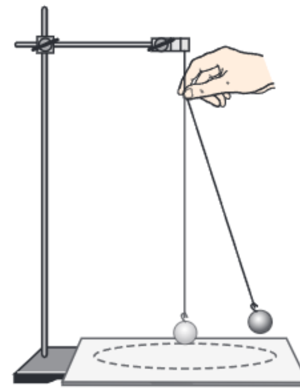
Цель работы

Научиться измерять скорость и ускорение тела, движущегося по окружности, определять его период и частоту обращения.

Оборудование и материалы

Штатив с муфтой и лапкой, шарик с прикреплённой к нему нитью, секундомер (или часы с секундной стрелкой), линейка, лист бумаги с начерченной окружностью радиусом 10 см.

Ход работы



- Закрепите нить с привязанным к ней шариком в штативе таким образом, чтобы длина нити оказалась равна 60 см. Расположите лист бумаги с нарисованной окружностью так, чтобы шарик оказался над центром окружности.
- Держа рукой нить у точки подвеса, приведите шарик в движение, чтобы он описывал окружность заданного радиуса R.
- Измерьте время t, за которое шарик совершит 20 оборотов.
- Вычислите период T и частоту ν обращения шарика по формулам:

$$T = \frac{t}{N}; \quad \nu = \frac{1}{T},$$

где N — число оборотов.

- Вычислите скорость и центростремительное ускорение шарика, движущегося по окружности, по формулам:

$$v = \frac{2\pi R}{T}; \quad a = \frac{v^2}{R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2}.$$

- Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу в своей тетради.

R, м	t, с	N	T, с	ν, с$^{-1}$	v, м/с	a, м/с^2

Примечание. Данную работу можно провести в виде коллективного исследования по группам из двух-трёх человек. В этом случае каждая группа подвешивает свой шарик на нить длиной 60 см, приводит его в движение по окружности радиусом 10 см и заполняет свою таблицу измерений. После окончания индивидуальных измерений необходимо сравнить результаты, полученные различными группами, а также вычислить средний период и погрешность измерений.

- Сделайте вывод.

Практические работы-исследования

Изучаем механическое движение

ИЗУЧЕНИЕ РАВНОМЕРНОГО ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ

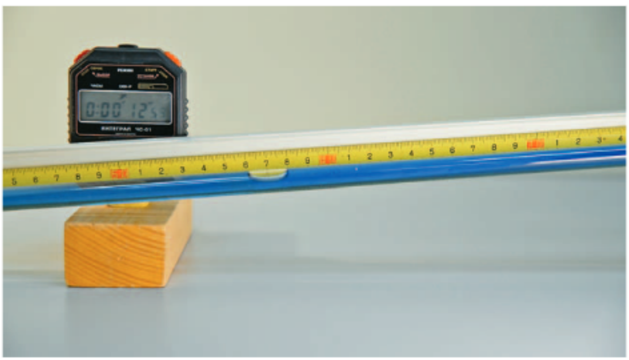
Равномерное прямолинейное движение на практике встречается редко. В данной работе в качестве равномерно движущегося тела используем пузырёк воздуха, который движется в трубке с водой.

Цель работы

Изучить равномерное прямолинейное движение воздушного пузырька в трубке с водой; определить скорость его движения; построить графики зависимости скорости, перемещения и координаты от времени.

ПОМОЩНИК

- В качестве оборудования можно использовать стеклянную трубку длиной 20—25 см и диаметром 7—8 мм, закрытую с обеих сторон пробками, воду, линейку, полоску белой бумаги, метроном, скотч.
- Наполните трубку водой так, чтобы в ней остался небольшой пузырёк воздуха. Герметично закройте трубку с обеих сторон пробками.
- Положите на линейку полоску белой бумаги, а сверху трубку с пузырьком воздуха, с помощью скотча закрепите положение трубки и линейки.
- Расположите линейку так, чтобы пузырёк находился на одном конце трубки, а другой конец трубки немного приподнимите, чтобы угол наклона трубки к поверхности стола составлял примерно 5°.



- Включите метроном. С каждым ударом метронома отмечайте положение воздушного пузырька на полоске бумаги.
- Снимите полоску бумаги. Проведите на ней координатную ось OX. По линейке определите координату x каждой точки.
- В каждой точке вычислите перемещение s и скорость v движения пузырька воздуха.
- Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу в своей тетради.

t, с									
x, см									
s, см									
v, см/с									

- Постройте графики зависимости координаты, перемещения и скорости от времени. По графикам сделайте вывод о характере движения пузырька воздуха.
- Закрепите на линейке ещё одну полоску бумаги и повторите опыт с бóльшим углом наклона стеклянной трубки (примерно 7—8°). Постройте графики зависимости координаты, перемещения и скорости от времени для второго опыта.
- Сравните построенные графики для разных углов наклона трубки.

- Подумайте, почему движение пузырька воздуха в воде близко к равномерному. Какие силы действуют на пузырёк воздуха в трубке?
- Сделайте вывод.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ПО НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ

Повторим эксперименты Галилея по изучению равноускоренного движения шаров с наклонной плоскости. Известно, что Галилей изготовил несколько наклонных плоскостей с вырезанными желобами. На пути скатывания шара Галилей установил поперечные порожки на определённом расстоянии друг от друга. Причём, когда шар катился по жёлобу и пересекал порожек, раздавался характерный звук. Галилей подобрал такое расстояние между порожками, чтобы при скатывании шара звуки раздавались через равные интервалы времени. Измерив расстояние между порожками, Галилей установил (см. § 9), что они относятся как последовательные нечётные числа:

$$s_1 : s_2 : s_3 : \ldots = 1 : 3 : 5 : \ldots . \quad (1)$$

Цель работы

Доказать, что при равноускоренном движении без начальной скорости отношение путей, проходимых за последовательные равные промежутки времени, относятся как последовательные нечётные числа.

Теоретическая справка

Пусть Δt — фиксированный интервал времени.

Тогда путь, пройденный шариком за время Δt, $s_{\Delta t} = \frac{a\Delta t^2}{2}$.

Путь, пройденный шариком за время $2\Delta t$, $s_{2\Delta t} = \frac{a(2\Delta t)^2}{2} = 4s_{\Delta t}$.

Согласно соотношению (1): $s_{2\Delta t} = s_{\Delta t} + 3s_{\Delta t} = 4s_{\Delta t}$.

Найдём отношение $\frac{s_{2\Delta t}}{s_{\Delta t}} = 4 = \frac{\Delta t_2^2}{\Delta t_1^2}$; $\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} = 2$.

Проверим отношение (1) экспериментально.

Пусть $s_1 = 0{,}25$ м; $s_2 = 0{,}25 \cdot 3$ м $= 0{,}75$ м.

Тогда $s_{\Delta t} = 0{,}25$ м; $s_{2\Delta t} = s_1 + s_2 = 1{,}0$ м.

Время прохождения пути $s_{2\Delta t} = 1{,}0$ м должно быть вдвое больше времени прохождения пути $s_{\Delta t} = 0{,}25$ м.

Проверим также соотношение (1) для пути, пройденного шариком за время Δt, $s_1 = s_{\Delta t}$ и пути, пройденного шариком за время $3\Delta t$, $s_{3\Delta t} = s_1 + s_2 + s_3 = s_1 + 3s_1 + 5s_1 = 9s_1$.

Найдём отношение $\frac{s_{3\Delta t}}{s_{\Delta t}} = 9 = \frac{\Delta t_3^2}{\Delta t_1^2}$; $\frac{\Delta t_3}{\Delta t_1} = 3$.

Проверим это отношение экспериментально для $s_{\Delta t} = 0{,}1$ м и $s_{3\Delta t} = 0{,}9$ м.

Время прохождения пути $s_{3\Delta t} = 0{,}9$ м должно быть втрое больше времени прохождения пути $s_{\Delta t} = 0{,}1$ м.

ПОМОЩНИК

- В качестве оборудования можно использовать штатив, наклонную плоскость, электронный таймер, снабжённый датчиками, линейку, металлический шарик.

- С помощью электронного таймера измерьте время прохождения шариком пути 0,25 м и пути 1,0 м при скатывании по наклонной плоскости. Повторите измерения 5 раз. Результаты измерений заносите в таблицу в своей тетради.

$s_{\Delta t}$, м	Δt_1, с	$\Delta t_{ср}$, с	$2\Delta t_{1ср}$, с	$s_{2\Delta t}$, м	Δt_2, с	$\Delta t_{2ср}$, с

- Вычислите среднее время скатывания шарика.
- Сделайте вывод.
- С помощью электронного таймера измерьте время прохождения шариком пути 0,1 м и пути 0,9 м при скатывании по наклонной плоскости. Повторите измерения 5 раз.
- Вычислите среднее время скатывания шарика.
- Сделайте вывод.

ИЗУЧЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

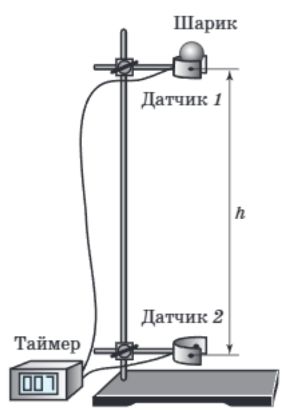
Для того чтобы изучить законы свободного падения и опровергнуть учение Аристотеля о том, что более тяжёлые предметы падают быстрее, чем лёгкие, Галилею пришлось использовать Пизанскую башню высотой 57 м. Изучим свободное падение шарика с высоты несколько десятков сантиметров, используя электронный таймер.

Цель работы

Оценить ускорение свободного падения тела при падении с небольшой высоты.

ПОМОЩНИК

- В качестве оборудования можно использовать штатив, электронный таймер, снабжённый двумя фотоэлектрическими датчиками, позволяющий измерять временны́е интервалы длительностью несколько миллисекунд, мерную ленту (рулетку), шарик.



- Укрепите на штативе оптический датчик запуска таймера на высоте $h \approx 0{,}5$—$0{,}6$ м. Оптический датчик остановки таймера, фиксирующий момент падения шарика, укрепите непосредственно у поверхности стола. В момент отпускания шарик пересекает световой луч первого датчика и запускает таймер. В момент падения шарик пересекает световой луч второго датчика и таймер отключается.
- Измерьте высоту h — расстояние между двумя датчиками.
- С помощью электронного таймера измерьте время падения шарика (время прохождения шарика между датчиками), отпуская шарик без начальной скорости. Проведите 5—6 измерений времени для заданной высоты. Определите среднее время движения.

- Зная высоту, с которой падает шарик, и среднее время падения, оцените ускорение свободного падения, предполагая, что шарик в эксперименте двигался равноускоренно.
- Сделайте вывод.

ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВОДЯНЫХ СТРУЙ, НАПРАВЛЕННЫХ ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ

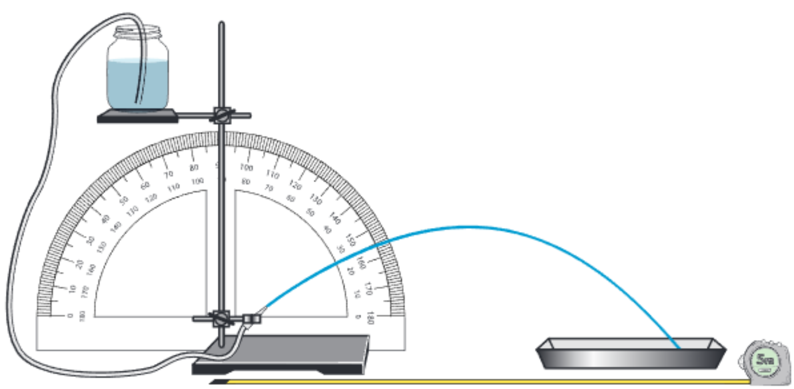
При одном и том же значении начальной скорости v_0 дальность полёта тела (или капелек водяной струи) зависит от значений проекций v_{0x} и v_{0y}. Значения самих проекций зависят от угла α, под которым в начальном положении струя направлена к горизонту. В данной работе определим угол, при котором дальность полёта водяной струи максимальна.

Цель работы

Исследовать зависимость расстояния, на которое бьёт водяная струя, от угла наклона сопла к горизонту.

ПОМОЩНИК

- В качестве оборудования можно использовать сосуд с водой, гибкий шланг диаметром 8—10 мм и длиной 3—3,5 м, сопло с сужением на конце, зажим для регулировки скорости истечения воды, штатив, поддоны для сбора воды, рулетку, транспортир демонстрационный. В качестве сосуда удобно использовать пластиковую канистру для воды объёмом 5—6 л.
- Установите сосуд с водой на высоте примерно 2—2,5 м от уровня пола. Соберите установку согласно приведённому рисунку.



- С помощью транспортира установите нужный угол наклона α сопла.
- С помощью зажима отрегулируйте скорость истечения воды из сопла.
- Измерьте дальность l полёта водяной струи для углов 15°, 30°, 45°, 60°.
- Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу в своей тетради.

№ опыта	α, град	l, м

- Изменяя высоту, на которой установлен сосуд с водой, исследуйте, как дальность полёта водяной струи зависит от скорости её истечения.
- Сделайте выводы.

ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ

Определим, от каких факторов зависит дальность полёта мяча на уроках физкультуры.

Цель работы

Изучить движение тела, брошенного под углом к горизонту, на примере упражнения «метание мяча».

ПОМОЩНИК

- В качестве оборудования можно использовать секундомер, стометровую рулетку, теннисный мяч. В качестве места проведения работы целесообразно использовать школьный стадион. Рекомендуется проводить работу в сухую, безветренную погоду.
- Повторите правила выполнения упражнения «метание мяча». Определитесь с направлением метания и порядком следования участников, составьте список участников. Каждому участнику даётся три попытки.
- Измерьте дальность l броска и время t полёта мяча. Результаты занесите в таблицу в своей тетради. Выберите наилучший результат по дальности полёта мяча среди трёх попыток.

№ попытки	l, м	t, с	α, °	v_0, м/с

- Зная дальность l полёта и время t полёта мяча, вычислите тангенс угла и сам угол α, под которым был брошен мяч, для каждой из попыток, выделите наилучший результат.
- По формуле $v_0 = \dfrac{l}{t\cos\alpha}$ вычислите начальную скорость в момент броска.
- По результатам измерений и вычислений определите, за счёт чего был достигнут наилучший результат в серии из трёх бросков.
- Объясните, за счёт чего вы могли бы улучшить ваш личный результат в данном виде упражнения. Как повлиял бы на результат встречный ветер; попутный ветер?
- Проведите анализ результатов бросков всего класса. Составьте список наилучших результатов всех участников эксперимента.
- Определите наибольшую и среднюю дальность полёта в вашем классе. За счёт чего был достигнут лучший результат в вашей группе?
- Какой бы совет вы дали товарищам, показавшим результаты ниже среднего? Обоснуйте свои советы с точки зрения физики.
- Сделайте выводы.

КЕЙС

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СРЕДЫ НА ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА

После выполнения практической работы по изучению движения воздушного пузырька в трубке с водой учитель поручил учащимся проделать опыт с заменой пузырька на стальной шарик. Как при этом отметил учитель, чтобы оценить влияние среды на характер движения шарика, целесообразно сначала провести опыт с трубкой без воды.

Осуществите и вы эти опыты.

Этапы выполнения задания

- В качестве оборудования можно использовать стеклянную или пластиковую трубку длиной около 1 м и диаметром примерно 1 см, стальной шарик, таймер или электронный секундомер, транспортир демонстрационный, рулетку, штатив и воду.
- Закрепите конец трубки в штативе и с помощью транспортира установите трубку наклонно под углом 5° к поверхности стола.
- С помощью рулетки и маркера нанесите метку на середине трубки.
- В верхний конец трубки поместите шарик и, отпустив его, одновременно включите секундомер. Измерьте время t_1 движения шарика, а также пройденное им расстояние s_1 до метки на трубке.
- Проделайте аналогичные измерения времени t_2 и расстояния s_2 при движении шарика от верхнего конца трубки до её нижнего конца.
- Предполагая, что характер движения шарика является равноускоренным, вычислите его ускорение для каждого опыта:

$$a_1 = \frac{2s_1}{t_1^2}; \quad a_2 = \frac{2s_2}{t_2^2}.$$

- Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу в тетради.
- Нижнее отверстие трубки закройте пластилиновой пробкой и заполните трубку водой.
- Измерьте время t_1 и t_2 движения шарика в трубке с водой.
- Предполагая, что движение шарика по-прежнему является равноускоренным, вычислите ускорения a_1 и a_2 для каждого опыта.
- Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу в своей тетради.

Среда	s_1, м	t_1, с	a_1, м/с^2	s_2, м	t_2, с	a_2, м/с^2
Воздух						
Вода						

- По результатам измерений сделайте вывод о характере движения шарика в каждом случае.
- Как вы думаете, может ли характер движения шарика в трубке с водой зависеть от угла наклона трубки?

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Механическим движением тела называется изменение положения тела в пространстве относительно других тел с течением времени.
- Тело отсчёта, связанная с ним система координат и часы для отсчёта времени образуют систему отсчёта.
- Существует три способа описания механического движения: табличный, графический и аналитический.
- Перемещение — направленный отрезок, соединяющий начальное и конечное положения тела.
- Форма траектория, скорость, пройденный путь и другие характеристики зависят от выбора системы отсчёта.
- Скорость равномерного прямолинейного движения — это векторная величина, равная отношению перемещения тела ко времени, за которое это перемещение произошло.
- Уравнение зависимости координаты тела от времени называется уравнением движения.
- График зависимости модуля вектора скорости от времени при прямолинейном равномерном движении — это прямая, параллельная оси абсцисс.
- При прямолинейном равномерном движении модуль вектора перемещения численно равен площади прямоугольника под графиком скорости.
- График зависимости перемещения тела от времени при прямолинейном равномерном движении — это прямая, проходящая через начало координат.
- Средняя скорость неравномерного движения — это физическая величина, равная отношению пути, пройденного телом, ко времени, за которое этот путь был пройден.
- Скорость тела в данный момент времени или в данной точке траектории называется мгновенной скоростью.
- Модуль перемещения при неравномерном движении численно равен площади под графиком зависимости скорости от времени.
- Если за любые одинаковые промежутки времени скорость тела увеличивается на одно и то же значение, то в течение времени t тело двигалось равноускоренно.
- Ускорение — это физическая величина, характеризующая быстроту изменения скорости тела.
- Проекция перемещения пропорциональна квадрату времени движения тела.
- График зависимости координаты тела от времени при равноускоренном движении представляет собой параболу.
- Движение тела только под действием силы тяжести называется свободным падением. При свободном падении все тела движутся с одинаковым ускорением — ускорением свободного падения.
- Максимальная высота подъёма тела, брошенного вертикально вверх, пропорциональна квадрату его начальной скорости.
- Движение тела, брошенного горизонтально, можно представить как сложение двух независимых движений: движения вдоль горизонтальной оси OX и движения вдоль вертикальной оси OY.

- Траекторией движения тела, брошенного под углом к горизонту, является парабола.
- Максимальное значение дальности полёта тела достигается при угле $\alpha = 45°$.
- При движении по окружности мгновенная скорость тела в любой точке траектории направлена по касательной к траектории в этой точке. Ускорение тела, движущегося с постоянной по модулю скоростью, направлено по радиусу окружности к её центру.
- Время, в течение которого тело совершает один полный оборот, называется периодом обращения.
- Число оборотов в единицу времени, которое совершает тело при движении по окружности, называется частотой обращения.
- Мгновенная скорость движения по окружности называется линейной скоростью.
- Угловая скорость характеризует изменение угла поворота радиуса, соединяющего движущееся тело с центром окружности.

Вопросы для обсуждения

? Может ли мгновенная скорость быть равной средней скорости?

? Почему нельзя говорить о средней скорости переменного движения вообще, а можно говорить только о средней скорости за данный промежуток времени или о средней скорости на данном участке пути?

? Объясните, почему прыжок с разбега всегда будет дальше, чем прыжок с места.

Темы исследовательских и проектных работ

- Системы координат для описания движения.
- Система координат для атома.
- История изучения движения тел.
- Равномерное движение в природе.
- Относительность движения.
- Скорость: от самой маленькой до самой большой.
- Как развивалась баллистика.
- Движение по окружности в природе и технике.
- Кинематика в спорте.

Глава 2

ОСНОВЫ ДИНАМИКИ

Сила проявляется единственно только в действии и по прекращении действия в теле не остаётся. Тело продолжает затем удерживать своё новое состояние вследствие одной только инерции.

Происхождение силы может быть различное: от удара, от давления...

И. Ньютон

§ 17 ИНЕРЦИЯ И ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое инерциальные и неинерциальные системы отсчёта.
- Как формулируется первый закон Ньютона.
- В чём заключается принцип относительности Галилея.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое механическое движение и почему оно относительно?
- Что такое система отсчёта?
- Что такое движение по инерции?

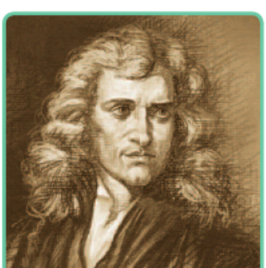
Кинематика описывает, как движутся тела. Раздел механики, который называется **динамикой**, изучает причины движения. Мы знаем, что всякое движение относительно. Для его описания нужно выбрать систему отсчёта. Начнём изучение динамики, выбрав наиболее естественную для нас систему отсчёта — систему, связанную с Землёй.

ЗАКОН ИНЕРЦИИ. В начале XVII в. в результате тщательных опытов по изучению движения тел Галилео Галилей сформулировал **закон инерции**, согласно которому **если на тело не действуют другие тела, то оно или находится в покое, или движется прямолинейно и равномерно относительно земли**.

Галилео Галилей
(1564—1642)

Движение тела при отсутствии действия на него других тел называется **движением по инерции**. Из закона инерции следует, что, для того чтобы тело изменило свою скорость относительно земли, на него должны действовать другие тела. Следовательно, причина ускорения (изменения скорости) заключается в действии других тел.

Сформулировав закон инерции, Галилей сделал великое научное открытие. По существовавшим до него более 2000 лет представлениям, опирающимся на труды Аристотеля, считалось, что естественным положением тела по отношению к земле является покой. И всякое перемещение тела относительно земли должно иметь причину — приложенную к телу силу.



Исаак Ньютон
(1642—1727)

ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА. Закон инерции можно считать тем фундаментом, на котором основано учение о движении тел. Известно высказывание И. Ньютона о своих великих предшественниках — Галилее и Копернике. Он говорил: «Если я видел дальше других, то потому, что стоял на плечах гигантов».

В конце XVII в. Исаак Ньютон обобщил выводы Галилея и сформулировал **первый** из трёх законов механики: **всякое тело продолжает удерживаться в своём состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние**.

В 1687 г. вышла книга И. Ньютона «Математические начала натуральной философии», в которой великий учёный сформулировал основные законы движения. Эти законы легли в основу науки, которая называется *механикой*.

ВАЖНО

Первый закон Ньютона. Существуют такие системы отсчёта, относительно которых поступательно движущееся тело сохраняет свою скорость постоянной, если на него не действуют другие тела или действие других тел скомпенсировано.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Действие закона инерции и первого закона Ньютона мы наблюдаем постоянно и даже не задумываемся об этом. Например, в начале движения автомобиля пассажиры некоторое время продолжают оставаться в покое и в первый момент отклоняются назад. При резком торможении транспорта пассажиры, наоборот, в течение короткого времени продолжают своё движение и наклоняются вперёд. Именно поэтому при поездках в транспорте рекомендуется пристёгиваться ремнями безопасности. Кроме этого, в автомобилях устанавливаются подушки безопасности, которые надуваются при авариях и предотвращают удары водителя и пассажиров головой о лобовое стекло.

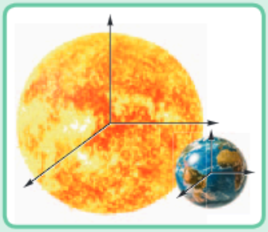
ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЁТА. Системы отсчёта, в которых выполняется закон инерции, называются **инерциальными**. Связанная с Землёй система отсчёта не единственная инерциальная система. Инерциальных систем бесконечно много. Например, система отсчёта, связанная с любым поездом, движущимся равномерно и прямолинейно относительно Земли, также является инерциальной системой. Тело, находящееся внутри поезда, может изменить свою скорость только под действием других тел. Но если поезд начинает тормозить или двигаться по искривлённому участку пути, то связанная с ним система отсчёта уже не будет являться инерциальной.

Например, лежащее на гладком столе яблоко при торможении поезда начнёт двигаться относительно стола, хотя никаких новых воздействий со стороны других тел яблоко при этом не испытывает. Получается, что в системе отсчёта, связанной с поездом, нарушился закон инерции. Однако если рассматривать движение яблока относительно системы отсчёта, связанной с Землёй, оно при торможении поезда будет продолжать своё движение по инерции.

Системы отсчёта, в которых не выполняется закон инерции, называются **неинерциальными**. Неинерциальные системы отсчёта — это системы отсчёта, которые движутся с ускорением или вращаются относительно инерциальных систем. В реальной жизни невозможно найти строго инерциальную систему, это понятие является идеализированным.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Система отсчёта, связанная с Землёй, называется **геоцентрической**, а система отсчёта, связанная с Солнцем, — **гелиоцентрической**. Если изменение скорости или поворот системы отсчёта малы за то время, пока изучается движение тела, то такую систему можно рассматривать как инерциальную. Например, за 1 с Земля поворачивается всего на 0,004 градуса. Поэтому для многих физических явлений геоцентрическую систему можно считать инерциальной.



Известно, что вокруг центра нашей Галактики Солнце делает один оборот за 226 млн лет, или $7 \cdot 10^{15}$ с. Согласно расчётам, за 1 с гелиоцентрическая система поворачивается на $6 \cdot 10^{-14}$ градуса. Поэтому гелиоцентрическую систему отсчёта с очень высокой степенью точности можно считать инерциальной. Она используется для решения задач небесной механики и космонавтики.

ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ГАЛИЛЕЯ. Существует бесчисленное множество инерциальных систем, движущихся друг относительно друга равномерно и прямолинейно. Один из важнейших законов классической физики называется **принципом относительности Галилея**. Он состоит в том, что **невозможно каким-либо опытным путём одну инерциальную систему выделить относительно остальных. Законы движения тел во всех инерциальных системах одинаковы.**

Согласно рассуждениям Галилея, невозможно, находясь в каюте корабля с завешенными шторами окнами, установить при помощи опытов, движется корабль равномерно и прямолинейно или находится в состоянии покоя. По этому поводу Галилей писал: «...заставьте теперь корабль двигаться с любой скоростью (только без толчков и качки), так же рыбы будут плавать безразлично в любых направлениях, насекомые летать с одной и той же скоростью в разные стороны, капли падать в узкое отверстие, как и раньше! Во всех названных явлениях вы не обнаружите ни малейшего изменения!»

ВЫВОДЫ

- Первый закон Ньютона: существуют такие системы отсчёта, относительно которых поступательно движущееся тело сохраняет свою скорость постоянной, если на него не действуют другие тела или действие других тел скомпенсировано.
- Системы отсчёта, в которых выполняется закон инерции, называются инерциальными.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Закон инерции; первый закон Ньютона; принцип относительности Галилея

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Как движется тело, если на него не действуют другие тела?
2. Как формулируется первый закон Ньютона?
3. Какие системы отсчёта называются инерциальными, а какие — неинерциальными? Приведите примеры инерциальных и неинерциальных систем.
4. Чем объяснить опускание столбика ртути при встряхивании медицинского термометра?
5. Можно ли считать инерциальной систему отсчёта, связанную с отъезжающим от остановки маршрутным такси? Объясните свой ответ.
6. Если на гладкий столик в вагоне поезда положить мячик, то при трогании вагона с места мячик начнёт двигаться относительно стола в сторону, противоположную направлению движения поезда. Не противоречит ли это закону инерции?

ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА §18

НОВОЕ В УРОКЕ

- Как связаны между собой сила и ускорение.
- Как формулируется второй закон Ньютона.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что является причиной изменения скорости тела?
- Как формулируется первый закон Ньютона?

В случае, когда на тело не действуют силы или равнодействующая всех сил, действующих на тело, равна нулю, тело может двигаться только равномерно, т. е. без ускорения. Действие на тело других тел с некоторой силой приводит к изменению скорости тела. А если изменяется скорость, значит, возникает ускорение.

СИЛЫ В МЕХАНИКЕ. Напомним, что **сила** — векторная физическая величина, характеризующая взаимодействие тел. Результат действия силы на тело зависит от её модуля, направления и точки приложения.

Понятие силы обязательно относится к двум телам. Всегда существует тело, со стороны которого на данное тело действует та или иная сила. Например, сила тяжести действует на камень со стороны Земли; на гирьку, подвешенную на нити, действует сила упругости со стороны нити; на тормозящий автомобиль действует сила трения со стороны дороги и т. п.

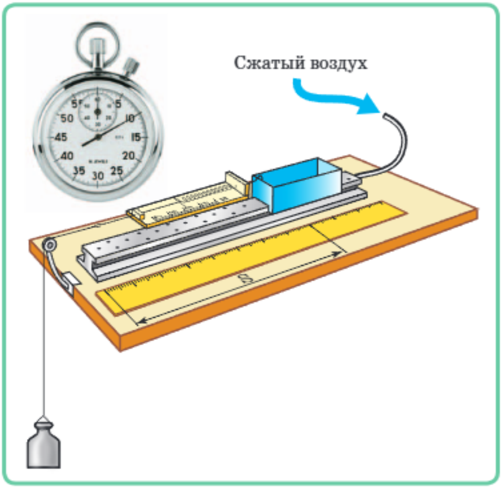
Силы в механике условно можно разделить на *контактные* (сила трения, сила упругости, вес) и *действующие на расстоянии* (сила тяжести). Контактные силы возникают при непосредственном соприкосновении тел. Гравитационные силы действуют в том числе между небесными телами, находящимися на огромных расстояниях друг от друга.

ВЗАИМОСВЯЗЬ СИЛЫ И УСКОРЕНИЯ. Если тело движется, то в направлении движения на него действует, как правило, сила тяги, а в противоположном направлении — сила трения или сопротивления воздуха. Сила тяги приводит к ускорению тела, а сила трения — к торможению. Эти две силы противоположно направлены, поэтому направление их равнодействующей совпадает с направлением большей из сил. Если же эти две силы уравновешивают друг друга, тело движется равномерно или покоится. Если направление равнодействующей силы совпадает с направлением силы тяги, то скорость тела увеличивается, а если эта сила направлена противоположно, то скорость тела уменьшается.

Направление ускорения всегда совпадает с направлением равнодействующей сил, действующих на тело. При этом ускорение, сообщаемое телу, тем больше, чем больше эта равнодействующая сила.

ИССЛЕДОВАНИЕ

Изучение взаимосвязи силы и ускорения удобно проводить на дорожке с воздушной подушкой, обеспечивающей движение тележки с малым трением. Выходящий из маленьких отверстий сжатый воздух, нагнетаемый с помощью компрессора, обеспечивает положение тележки в приподнятом состоянии.



При помощи пружинного динамометра соединим тележку с перекинутой через блок нитью, на которой закреплён груз. При движении тележки пружина будет растягиваться под действием силы натяжения нити, которая зависит от силы тяжести, действующей на груз: чем больше сила тяжести, тем сильнее натяжение нити и растяжение пружины.

Опыт показывает, что при движении тележки показания динамометра не меняются, т. е. сила F, действующая на тележку, постоянна. Измеряя путь s, пройденный тележкой за определённое время t, можно вычислить её ускорение.

Результаты измерений показывают, что путь, пройденный тележкой, пропорционален квадрату промежутка времени, прошедшего от начала движения: $s \sim t^2$. Следовательно, тележка движется равноускоренно.

Если начальная скорость тележки равна нулю, то модуль перемещения $s = \dfrac{at^2}{2}$.

Отсюда можно выразить ускорение: $a = \dfrac{2s}{t^2}$.

Подвешивая грузы различной массы и определяя в каждом случае силы и ускорения, можно сделать вывод: **ускорение, с которым движется тело, прямо пропорционально приложенной к этому телу силе: $a \sim F$.**

ВЗАИМОСВЯЗЬ МАССЫ И УСКОРЕНИЯ. Сила, действуя на разные тела, придаёт им различные ускорения. Почему?

В курсе физики 7 класса мы говорили, что **инертность** — свойство, присущее всем телам. Из двух тел, изменяющих скорость на одно и то же значение, более инертно то, которому для этого изменения требуется большее время. Инертность характеризуется физической величиной, называемой **массой** тела. Более инертное тело имеет бóльшую массу, менее инертное тело — меньшую массу.

Описанный выше опыт можно видоизменить, если сцепить вместе две одинаковые тележки. При этом оказывается, что сила F сообщает им ускорение, вдвое меньшее того, которое она сообщала одной тележке. Использование двух связанных тележек равносильно увеличению массы тележки вдвое. Измерения показывают, что **ускорения, приобретаемые телами при взаимодействии, обратно пропорциональны их массам**:

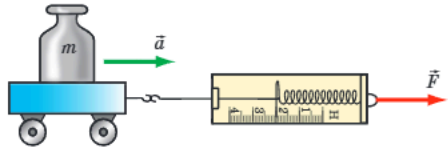
$$a \sim \frac{1}{m}.$$

Конечно, опыты, в которых используется простейшее оборудование, слишком грубы для точного установления закона пропорциональности между силами и ускорениями. Однако при помощи всё более и более точных методов измерений этот закон был подтверждён.

ПОНЯТИЕ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ. При решении задач динамики часто не важно знать ни размеры тела, ни его геометрическую форму. В этих случаях мы можем рассматривать тело как материальную точку, т. е. будем считать, что оно обладает массой, но не имеет геометрических размеров.

ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА.

Обобщив выводы, получим, что **ускорение тела прямо пропорционально действующей силе, приложенной к телу, и обратно пропорционально его массе**:



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

Закон, устанавливающий связь ускорения с массой тела и действующей на него силой, называется **основным законом динамики** или **вторым законом Ньютона**.

В векторном виде его записывают следующим образом:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (1)$$

ВАЖНО

Второй закон Ньютона. Ускорение тела прямо пропорционально действующей силе, приложенной к телу, и обратно пропорционально его массе:

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

Второй закон Ньютона справедлив только в инерциальных системах отсчёта.

Если на тело действует несколько сил, то под $\vec{F}$ следует понимать их равнодействующую. Из формулы (1) видно, что направление ускорения тела всегда совпадает с направлением вектора равнодействующей сил, действующих на тело.

Если на тело не действуют силы или их равнодействующая равна нулю ($\vec{F} = 0$), то ускорение тела равно нулю ($\vec{a} = 0$), и, следовательно, скорость тела не меняется, т. е. оно движется равномерно и прямолинейно.

Важно понимать, что ускорение пропорционально действующей силе и обратно пропорционально массе тела и не зависит ни от каких других свойств тела.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

В окружающем нас мире есть множество примеров, иллюстрирующих второй закон Ньютона. Брошенный мяч движется с ускорением в направлении приложенной силы. Причём чем сильнее бросить мяч, тем дальше он улетит.

Толкать легковой автомобиль гораздо легче, чем грузовик, так как масса первого меньше, чем масса второго. Чтобы разогнаться до одной и той же скорости, грузовику требуется бóльшая сила тяги, а следовательно, и больше бензина, чем легковому автомобилю. Инженеры стараются максимально уменьшить массу гоночных автомобилей, поскольку при действии одинаковой силы автомобили с меньшей массой имеют большее ускорение при разгоне.

ЕДИНИЦЫ СИЛЫ. Из второго закона Ньютона можно найти равнодействующую сил, действующих на тело: $\vec{F} = m\vec{a}$.

За единицу силы в СИ принимают такую силу, которая сообщает телу массой 1 кг ускорение 1 м/с^2. В честь И. Ньютона эта единица названа *ньютоном* (Н).

$$1\ \text{Н} = 1\ \text{кг} \cdot 1\ \text{м/с}^2.$$

СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА ТЕЛО ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ОКРУЖНОСТИ. Согласно второму закону Ньютона, причиной любого ускорения является сила, действующая на тело, при этом направление силы совпадает с направлением ускорения. Природа сил, действующих на тело при его движении по окружности с постоянной по модулю скоростью, может быть различна. Если тело, закреплённое на нити, движется по окружности, причиной центростремительного ускорения является сила упругости нити. В том случае, когда тело вращается на диске вокруг его оси, такой силой является сила трения. Если сила прекратит своё действие, тело начнёт двигаться по прямой, касательной к данной окружности.

При равномерном движении по окружности сила направлена к центру окружности и, согласно второму закону Ньютона, равна

$$F = ma_{\text{ц}} = \frac{mv^2}{R},$$

где m — масса тела; $a_{\text{ц}}$ — центростремительное ускорение; R — радиус окружности; v — линейная скорость.

ВЫВОД

Второй закон Ньютона имеет следующую формулировку: ускорение тела прямо пропорционально действующей силе, приложенной к телу, и обратно пропорционально его массе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Второй закон Ньютона; масса; инертность; равнодействующая сил

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что является причиной ускоренного движения тел?
2. Как формулируется второй закон Ньютона?
3. Что является единицей силы в СИ?
4. Для каких систем отсчёта справедлив второй закон Ньютона? Объясните свой ответ.
5. На движущийся прямолинейно по горизонтальному участку трассы автомобиль действует постоянная сила тяги двигателя, равная силе трения. Можно ли в данном случае движение автомобиля считать движением по инерции?
6. К стальному шарику, лежащему на гладкой горизонтальной поверхности, подносят постоянный магнит. Будет ли движение шарика являться равноускоренным? Сопротивлением со стороны воздуха можно пренебречь.

ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА §19

Со стола на пол упал карандаш, подпрыгнул и остался лежать на полу. Почему он упал, вы уже сможете объяснить. А вот почему он отскочил? Всё дело в том, что карандаш подействовал на пол, а пол подействовал на карандаш.

НОВОЕ В УРОКЕ

- Как формулируется третий закон Ньютона.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое взаимодействие тел?
- Что такое сила тяжести, вес и сила реакции опоры?

СИЛЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ. В инерциальных системах отсчёта все силы возникают (или исчезают) *только парами*, т. е. если одно тело действует на другое (действие), то и второе тело, в свою очередь, действует на первое (противодействие).

Тела действуют друг на друга с силами, противоположно направленными.

Наиболее ярко это может быть проиллюстрировано на опыте в космическом пространстве. Если космонавт в открытом космосе бросит какой-либо предмет, то не только предмет начнёт движение, но и космонавт будет двигаться в противоположном направлении. Это означает, что космонавт подействовал на тело с некоторой силой, а тело, в свою очередь, подействовало на космонавта с противоположно направленной силой.

Может ли одна из пары сил, возникающих при взаимодействии двух тел, быть больше другой?

Два динамометра крючками цепляют друг за друга. После этого, взявшись за кольца, динамометры растягивают в разные стороны. Наблюдая за показаниями обоих динамометров, можно увидеть, что при любых растяжениях они будут совпадать.

Следовательно, сила, с которой первый динамометр действует на второй, равна по модулю силе, с которой второй динамометр действует на первый.

Равенство сил по модулю при взаимодействии выполняется всегда и не зависит от того, движутся ли взаимодействующие тела или находятся в покое относительно друг друга.

ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА. Анализируя взаимодействие двух тел, И. Ньютон писал: «Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе взаимодействия двух тел друг на друга между собой равны и направлены в противоположные стороны».

Это утверждение теперь называется **третьим законом Ньютона** и формулируется следующим образом: **силы, с которыми два тела действуют друг на друга, равны по модулю и противоположны по направлению.**

Математическая запись этого закона:

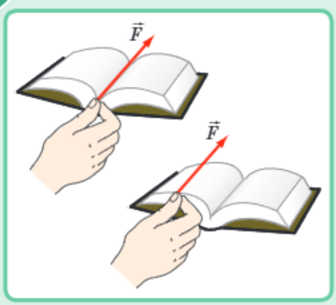
$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2. \quad (1)$$

Знак «−» показывает, что силы направлены в противоположные стороны.

ВАЖНО

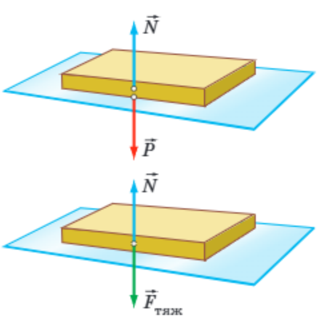
Третий закон Ньютона. Силы, с которыми два тела действуют друг на друга, равны по модулю и противоположны по направлению:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$



Сила — это векторная величина. Два вектора называются *равными*, если они одинаково направлены и равны по модулю. Однако в физике этим определением надо пользоваться с осторожностью, так как, например, одна и та же сила, приложенная к различным точкам тела, может приводить к разным результатам. Например, если мы двигаем книгу по столу, прикладывая силу, то результат зависит от того, в какую точку книги мы надавим пальцем.

Два вектора называются *противоположными*, если их модули равны и они противоположно направлены. Записывают: $\overrightarrow{AB} = -\overrightarrow{BA}$.



ОСОБЕННОСТИ СИЛ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ. Важно понимать, что **силы**, о которых идёт речь в третьем законе Ньютона, **приложены к разным телам**, и, следовательно, они не могут уравновешивать друг друга. Их нельзя складывать или вычитать.

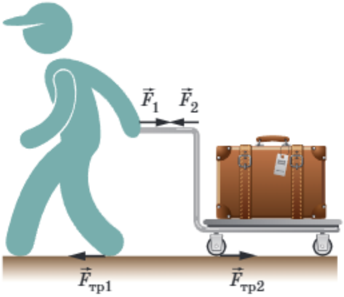
Например, брусок, лежащий на опоре, действует на неё с силой, называемой весом ($\vec{P}$). Опора, в свою очередь, действует на брусок с силой, называемой силой реакции опоры или силой упругости ($\vec{N}$). Из курса физики 7 класса вы уже знаете, что эти силы противоположно направлены, равны по модулю и приложены к разным телам: вес — к опоре, а сила реакции опоры — к самому телу. Теперь, зная третий закон Ньютона, мы можем записать это в векторной форме:

$$\vec{P} = -\vec{N}.$$

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

При ходьбе человек действует на Землю с силой $\vec{F}_1$, т. е. толкает её назад, а Земля с равной по модулю силой $\vec{F}_2$ отталкивает человека вперёд. Так как масса Земли намного больше массы человека, Земля остаётся на месте, а человек делает шаг вперёд.

Приведём ещё один пример. Мальчик тянет за верёвку тележку. Если действие равно противодействию, т. е. силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ равны по модулю, то почему тележка движется? Дело в том, что в этом примере существенную роль играет сила трения. Она действует как на мальчика, так и на тележку. Когда мальчик делает шаг, то сила трения $\vec{F}_{тр1}$, толкающая его вперёд, несколько превышает силу натяжения верёвки $\vec{F}_1$, связывающей мальчика с тележкой, поэтому тележка будет перемещаться вслед за мальчиком. При этом сила трения $\vec{F}_{тр2}$, действующая на тележку и препятствующая её движению, не должна превышать силу трения $\vec{F}_{тр1}$, действующую на мальчика.



Третий закон Ньютона справедлив не только в случае взаимодействия при непосредственном соприкосновении тел, но и в случае взаимодействия на расстоянии.

Следует отметить, что **силы, возникающие в результате взаимодействия тел, являются силами одной и той же природы**. Например, Земля и Луна взаимодействуют в результате действия силы всемирного тяготения, железо и магнит притягиваются в результате действия магнитных сил. Два одноимённо заряженных тела отталкиваются в результате действия электрических сил.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Третий закон Ньютона объясняет, как движутся ракеты. При сгорании ракетного топлива образуются горячие газы, которые с силой выбрасываются из сопла. В то же время с равной по модулю и противоположно направленной силой газы толкают ракету вперёд.

При гребле вёсла действуют на воду, толкая её назад, а вода действует на лодку, толкая её вперёд.

Когда мяч падает на землю, он действует на неё с некоторой силой. Земля также действует на мяч с равной по модулю силой реакции опоры, в результате чего мяч отскакивает вверх.

Когда мы забиваем гвоздь, молоток передаёт усилие нашей руки, и гвоздь входит в древесину. Но гвоздь также действует на молоток в противоположном направлении, и наша рука чувствует удар.

УСКОРЕНИЯ ТЕЛ ПОСЛЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ. Используя второй закон Ньютона, равенство (1) можно переписать в виде

$$m_1\vec{a}_1 = -m_2\vec{a}_2, \qquad (2)$$

где m_1 и m_2 — массы взаимодействующих тел; $\vec{a}_1$ и $\vec{a}_2$ — ускорения, сообщённые телам.

Из формулы (2) следует, что

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1} = \text{const},$$

т. е. отношение модулей a_1 и a_2 ускорений взаимодействующих тел равно обратному отношению их масс и не зависит от природы сил, действующих между ними.

Из последнего равенства следует, что в результате взаимодействия более массивное тело получает меньшее ускорение, чем более лёгкое тело. Например, при ударе футболиста ногой по мячу наблюдается заметное изменение скорости мяча, а вот обратное воздействие мяча на футболиста не приводит к сколько-нибудь существенному изменению характера его движения.

ВЫВОД

Третий закон Ньютона имеет следующую формулировку: силы, с которыми два тела действуют друг на друга, равны по модулю и противоположны по направлению.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Взаимодействие тел; третий закон Ньютона

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Как формулируется третий закон Ньютона?
2. Каковы особенности сил, о которых говорится в третьем законе Ньютона?
3. Какие примеры демонстрируют выполнение третьего закона Ньютона?
4. Можно ли утверждать, что сила, с которой боксёр бьёт по груше, равна по модулю и противоположна по направлению силе, действующей со стороны груши на кулак боксёра? Эти силы уравновешивают друг друга? Объясните свой ответ.
5. О ветровое стекло мотоцикла ударился майский жук. Сравните силы, действующие на жука и на мотоцикл.
6. Рассказывая о своих приключениях, барон Мюнхгаузен утверждал, что вытащил себя и лошадь из болота за свою косичку. Правду ли говорил барон Мюнхгаузен? Объясните свой ответ.

ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ. СИЛА ТЯЖЕСТИ

§ 20

НОВОЕ В УРОКЕ

- Как формулируется закон всемирного тяготения.

Закон всемирного тяготения является одним из фундаментальных законов природы. Он является всеобщим, так как всё вещество во Вселенной подчиняется этому закону.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое сила тяжести?
- Что такое свободное падение и ускорение свободного падения?
- Куда направлено ускорение тела при его движении по окружности и как вычислить это ускорение?

ОТКРЫТИЕ ЗАКОНА ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ. Польский астроном Николай Коперник первым показал, что планеты вращаются вокруг Солнца, и предложил свою, гелиоцентрическую, систему мира. После этого усилия многих учёных были направлены на поиски закономерностей, которым подчиняется движение планет относительно Солнца. В начале XVII в. немецкий астроном Иоганн Кеплер на основе наблюдений датского астронома Тихо Браге установил закономерности движения планет вокруг Солнца. Сам Кеплер не нашёл причину, объясняющую эти закономерности, но его работы стали основой для открытия закона всемирного тяготения.

Иоганн Кеплер
(1571—1630)

Существует *легенда*, согласно которой к идее существования всемирного тяготения Исаак Ньютон пришёл, отдыхая в саду и увидев падающее яблоко. Именно в этот момент Ньютон придумал гипотезу о том, что силы одной и той же природы заставляют и яблоко падать на землю, и Луну двигаться по своей околоземной орбите. Датируя в своих воспоминаниях это открытие 1666 г., лишь в 1687 г. учёный сформулировал, записал и опубликовал этот закон. И. Ньютон писал: «Силы, с которыми... планеты постоянно отклоняются от прямолинейного движения и удерживаются на своих орбитах, направлены к Солнцу и обратно пропорциональны квадратам расстояний до центра его... Тяготение существует ко всем телам вообще и пропорционально массе каждого из них». Таким образом, Ньютон сделал великое открытие, согласно которому всякое тело во Вселенной притягивается к любому другому телу с тем большей силой, чем больше масса этих тел и чем меньше расстояние между ними. Это также и та самая сила, которая заставляет тела падать на землю.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Для проверки своей гипотезы о том, что силы, которые заставляют яблоко падать на землю, и Луну двигаться по околоземной орбите, имеют одну и ту же природу, Ньютону нужно было установить связь между ускорением свободного падения на Земле и центростремительным ускорением Луны.

Центростремительное ускорение Луны можно вычислить по известной формуле:

$$a_Л = \frac{v^2}{R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2}.$$

Во времена Ньютона уже были известны расстояние от Земли до Луны R = 384 000 км и период обращения Луны вокруг Земли T = 27,3 сут. Подставим эти данные:

$$a_Л = \frac{4 \cdot 3{,}14^2 \cdot 3{,}84 \cdot 10^6 \text{ м}}{(27{,}3 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ с})^2} \approx 2{,}7 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2.$$

Это значение приблизительно в 3600 = 60^2 раз меньше ускорения свободного падения тел вблизи поверхности Земли:

$$\frac{g}{a_Л} = 60^2.$$

Но расстояние R между Землёй и Луной больше радиуса Земли $R_З$ = 6400 км как раз в 60 раз:

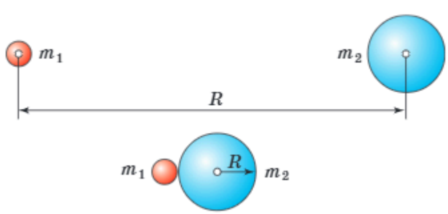
$$\frac{R}{R_З} = 60.$$

Таким образом, при увеличении расстояния между притягивающимися телами в 60 раз ускорение уменьшается в 60^2 раз. Отсюда можно заключить, что ускорения, сообщаемые телам силой всемирного тяготения, а следовательно, и сама эта сила обратно пропорциональны квадрату расстояния между взаимодействующими телами.

ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ. Окончательно **закон всемирного тяготения** формулируется следующим образом: **два тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной массе каждого из них и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними**:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{R^2},$$

где G — универсальная константа, названная **гравитационной постоянной.**



Строго говоря, такая формулировка закона всемирного тяготения верна тогда, когда собственные размеры тел много меньше расстояния между ними. Например, радиус Земли составляет 6371 км, а расстояние от Земли до Солнца составляет 149 600 000 км. Однако путём сложных математических вычислений Ньютон доказал справедливость этого закона для шаров, плотность которых симметрично распределена относительно их центров. В этом случае R — расстояние между центрами шарообразных тел. В случае, когда одно из тел является шарообразным и его радиус существенно больше размеров тела, находящегося на его поверхности (или вблизи неё), в качестве расстояния между телами надо взять радиус шара. Именно так применяется формула тяготения для вычисления силы притяжения Землёй тела, находящегося на её поверхности, при этом за расстояние R принимают радиус Земли.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Попытки понять и описать математически законы гравитации предпринимались физиками и до Ньютона. Очень важный результат получил английский учёный Роберт Гук, который в 1674 г. писал, что «все небесные тела имеют притяжение, или силу тяготения». Именно Гуку принадлежит открытие *закона обратных квадратов*», согласно которому «притяжение обратно пропорционально квадрату расстояния до центра».

ГРАВИТАЦИОННАЯ ПОСТОЯННАЯ. Коэффициент пропорциональности G в законе всемирного тяготения одинаков для всех тел в природе. **Гравитационная постоянная** численно равна силе притяжения двух точечных тел массой по 1 кг, расположенных на расстоянии 1 м друг от друга:

$$G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \text{Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2.$$

ВАЖНО

Если обозначить величины: массы тел — m_1 и m_2, расстояние между ними — R, гравитационная постоянная — G, то **закон всемирного тяготения** для этих двух тел можно записать так:

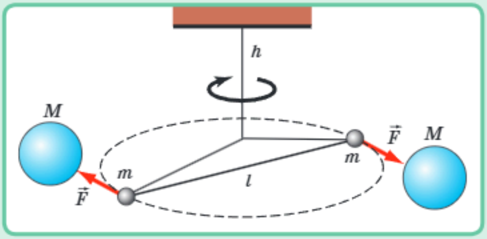
$$F = G\frac{m_1 m_2}{R^2},$$

где $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ Н · м^2/кг^2 — гравитационная постоянная.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Первые измерения гравитационной постоянной осуществил в XVIII в. английский учёный Г. Кавендиш. Опыты проводились при помощи так называемых крутильных весов, к концам коромысла которых были прикреплены небольшие свинцовые шары. Вблизи них закреплялись большие тяжёлые шары. В результате притяжения малых шаров к большим коромысло немного поворачивалось. По углу закручивания нити Кавендиш сумел измерить ничтожно малую силу притяжения между маленьким и большим металлическими шарами. Результаты опыта позволили определить гравитационную постоянную.

Генри Кавендиш
(1731—1810)



При постановке своих экспериментов Г. Кавендиш не задавался целью измерить гравитационную постоянную. Его задачей было определить среднюю плотность Земли. Она оказалась в 5,48 раза больше плотности воды. На основании полученных данных была вычислена также масса Земли — приблизительно $5{,}97 \cdot 10^{24}$ кг.

УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ. Одно из проявлений силы всемирного тяготения — *сила тяжести*. Так принято называть силу притяжения тел к Земле вблизи её поверхности.

Рассмотрим свободное падение тела массой m, находившегося на высоте h над поверхностью Земли. При свободном падении, когда движение происходит только под действием силы тяжести, все тела движутся с одинаковым ускорением — *ускорением свободного падения*. Поскольку на тело действует только сила тяготения, уравнение второго закона Ньютона можно записать в виде

$$ma = mg_h = G\frac{mM_З}{(R_З + h)^2}, \qquad (1)$$

где g_h — ускорение свободного падения на высоте h; $M_З$ и $R_З$ — масса и радиус Земли.

Из формулы (1) получим

$$g_h = G\frac{M_З}{(R_З + h)^2}. \qquad (2)$$

Таким образом, **ускорение свободного падения не зависит от массы тела, но существенно зависит от его положения над поверхностью Земли**. Как следует из равенства (2), ускорение свободного падения обратно пропорционально квадрату расстояния тела от центра Земли. На поверхности Земли ($h = 0$) формулу (2) для ускорения можно записать в виде

$$g = G\frac{M_З}{R_З^2}. \qquad (3)$$

Модуль ускорения свободного падения вблизи поверхности Земли и на высотах до 100 км можно считать равным 9,8 м/с^2.

Ускорение свободного падения зависит от географической широты места на земном шаре. Прежде всего это связано с вращением Земли вокруг своей оси. Формула (3) для ускорения свободного падения, полученная на основе второго закона Ньютона, справедлива только в инерциальной системе отсчёта. Система отсчёта, связанная с Землёй, в отличие от гелиоцентрической, не является инерциальной. Однако в подавляющем большинстве случаев эффектами, связанными с неинерциальностью геоцентрической системы отсчёта, обычно пренебрегают.

Другой, не такой существенной причиной зависимости ускорения свободного падения от географической широты является то, что земной шар несколько сплюснут у полюсов. Экваториальный радиус Земли больше полярного на 21 км. Влияние вращения Земли и её сплюснутость у полюсов приводят к тому, что ускорение свободного падения меняется от значения $g_п \approx 9{,}83$ м/с^2 на полюсах до значения $g_э \approx 9{,}78$ м/с^2 на экваторе, причём на широте 45° $g = 9{,}81$ м/с^2.

Зная ускорение свободного падения, из формулы (3) можно вычислить массу Земли:

$$M_З = \frac{gR_З^2}{G}. \qquad (4)$$

Подставив в формулу (4) известные численные значения $g \approx 9{,}8$ м/с^2, $R \approx 6{,}4 \cdot 10^6$ м и $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ Н · м^2/кг^2, получим $M_З \approx 6{,}0 \cdot 10^{24}$ кг.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

«Взвешивание» Земли оказалось возможным потому, что гравитационная постоянная была измерена на основе независимого эксперимента. На самом деле не существует никаких астрономических методов, которые позволили бы определить массы Земли и других планет.

СИЛА ТЯЖЕСТИ. Ускорение свободного падения является коэффициентом пропорциональности, который связывает силу тяжести и массу тела. Действительно, согласно закону всемирного тяготения, силу тяжести выражают в виде формулы:

$$F_{тяж} = G\frac{mM_З}{(R_З + h)^2}. \qquad (5)$$

Как видно из формулы (5), сила тяжести, действующая на тело, зависит от положения тела относительно поверхности Земли. Если высота h над поверхностью Земли не превышает 100 км, то изменением силы тяжести с высотой можно пренебречь, считая её равной значению силы тяжести на поверхности Земли.

Ещё со времён Г. Галилея было известно, что тело, движущееся под действием силы тяжести по гладкой дуге круга, соскальзывает быстрее, чем по стягивающей её хорде. Поэтому была поставлена задача о поиске формы линии быстрейшего спуска. Результаты решения этой задачи до сих пор используются инженерами при проектировании трасс для бобслея и «американских горок».

ВЫВОД

Закон всемирного тяготения: два тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной массе каждого из них и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Закон всемирного тяготения; гравитационная постоянная; сила тяжести

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. От каких физических величин зависит сила гравитационного взаимодействия?
2. Чему равна гравитационная постоянная?
3. Объясните высказывание Иоганна Кеплера: «Не камень стремится к Земле, а, скорее, Земля его влечёт к себе».
4. Изменится ли сила гравитационного взаимодействия между двумя телами, если между ними поместить третье тело?
5. Опишите движение Луны в случае, если бы внезапно исчезло гравитационное взаимодействие между Луной и Землёй.

§ 21 ДВИЖЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое искусственный спутник Земли.
- Что такое первая космическая скорость.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Как формулируется второй закон Ньютона?
- Как формулируется закон всемирного тяготения?
- Как найти скорость и ускорение при движении тела по окружности?

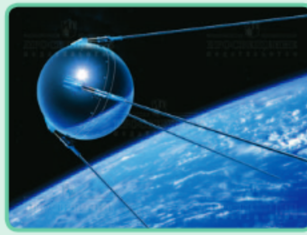
Естественным спутником Земли является Луна. *Искусственными спутниками* Земли называются космические летательные аппараты, выведенные с помощью ракет на околоземные орбиты. При помощи искусственных спутников возможно решение различных научных и прикладных задач.

ЧТО НУЖНО СДЕЛАТЬ, ЧТОБЫ ВЫЙТИ ЗА ПРЕДЕЛЫ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ? Если тело выведено за пределы земной атмосферы, на него действуют только силы тяготения со стороны Земли, Солнца и других небесных тел. Многочисленные опыты по запуску различных летательных аппаратов показали, что, для того чтобы тело вышло за пределы земной атмосферы, у него должна быть достаточно большая начальная скорость. Действительно, тело, брошенное вверх с небольшой начальной скоростью, быстро упадёт на Землю. Чем больше начальная скорость, тем на бóльшую высоту поднимется тело. При некоторой начальной скорости тело покинет пределы земной атмосферы и превратится в искусственный спутник Земли. Очевидно, что при дальнейшем увеличении начальной скорости тело будет всё больше удаляться от поверхности Земли и может превратиться в искусственный спутник Солнца. При ещё большем увеличении скорости тело может покинуть Солнечную систему.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Рассмотрим рисунок И. Ньютона, приведённый в одной из его работ. На рисунке изображён земной шар, а на нём — высокая гора. Ньютон пишет о том, что брошенный с такой горы камень отклонится под действием силы тяжести от прямолинейного пути и, описав криволинейную траекторию, упадёт на Землю. Чем с большей скоростью будет брошен камень, тем дальше он упадёт. В отсутствие сопротивления воздуха и при достаточно большой скорости камень вообще может не упасть, а начнёт двигаться вокруг Земли по некоторой орбите.

ЭТО ИНТЕРЕСНО



Запуск первого искусственного спутника Земли, ставшего первым искусственным небесным телом, созданным человеком, был осуществлён в Советском Союзе 4 октября 1957 г. Спутник был выведен на околоземную орбиту ракетой-носителем Р-7. Спутник имел сферическую форму и состоял из двух полусферических оболочек из алюминиевого сплава диаметром 58 см. Масса спутника составляла 83,6 кг, период обращения вокруг Земли — 96,2 мин. Спутник осуществил примерно 1400 витков вокруг Земли, пролетев расстояние приблизительно 60 млн км. Наибольшая высота полёта относительно Земли составила 947 км. Первым человеком, совершившим полёт в космос на корабле-спутнике «Восток», был Юрий Гагарин. Это знаменательное событие произошло 12 апреля 1961 г.

СКОРОСТЬ ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА. Рассчитаем скорость, с которой должно лететь тело, чтобы стать искусственным спутником Земли. Согласно второму закону Ньютона,

$$F = ma, \tag{1}$$

где m — масса спутника, a — ускорение спутника на высоте h.

Так как спутник движется по окружности, это ускорение — центростремительное, и его можно найти по формуле

$$a = \frac{v^2}{R_З + h}, \tag{2}$$

где $R_З$ — радиус Земли.

На спутник действует сила тяжести, которая по закону всемирного тяготения равна

$$F_{тяж} = G\frac{mM_З}{(R_З + h)^2}. \tag{3}$$

Подставив формулы (2) и (3) в формулу (1), получим

$$G\frac{mM_З}{(R_З + h)^2} = m\frac{v^2}{R_З + h} \quad \Rightarrow \quad v^2 = G\frac{M_З}{R_З + h}.$$

Отсюда

$$v = \sqrt{G\frac{M_З}{R_З + h}}. \tag{4}$$

Формула (4) позволяет рассчитать **скорость v, которую надо сообщить телу, поднятому на высоту h над Землёй, чтобы оно стало искусственным спутником Земли**.

Спутник, вращающийся вокруг Земли вблизи её поверхности, имеет ускорение $\vec{g}$, направленное к центру Земли, т. е. такое же ускорение свободного падения, которое имеет и тело, свободно летящее по параболической траектории или падающее по вертикали вблизи земной поверхности. Значит, движение спутника есть просто свободное падение.

Это движение отличается от движения тел, брошенных под углом к горизонту, тем, что скорость спутника настолько велика, что радиус кривизны его траектории равен радиусу Земли.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Искусственные спутники Земли используются не только в космонавтике и обороне. Благодаря им осуществляется телевещание, создаются системы слежения и навигации (например, системы GPS и ГЛОНАСС), осуществляются научные исследования и собираются метеоданные, которые используются для предсказания погоды и т. д.

Высóты полёта над Землёй искусственных спутников разнообразны — от 200—300 км до нескольких десятков тысяч километров. В качестве примера можно привести так называемые геостационарные спутники, которые как бы «зависают» над определёнными районами земной поверхности. Это возможно только в случае, когда спутник движется в направлении вращения Земли, и его угловая скорость равна угловой скорости вращения Земли вокруг своей оси. Орбиты таких спутников расположены на высотах около 36 000 км над поверхностью Земли.

Искусственные спутники выводятся на орбиты с помощью автоматических управляемых многоступенчатых ракет-носителей, которые от старта до некоторой расчётной точки в пространстве движутся благодаря тяге, развиваемой реактивными двигателями. После достижения ракетой на нужной высоте расчётной скорости (по значению и направлению) работа реактивных двигателей прекращается; это так называемая точка выведения спутника на орбиту. Запускаемый космический аппарат, который несёт последняя ступень ракеты, автоматически отделяется от неё и начинает своё движение по некоторой орбите относительно Земли, становясь искусственным небесным телом.

ПЕРВАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ. Минимальная скорость, которую необходимо сообщить телу у поверхности Земли, чтобы оно преодолело притяжение планеты и стало искусственным спутником, называется **первой космической скоростью.**

Чтобы найти первую космическую скорость v_{I}, следует учесть, что она определяется как скорость спутника вблизи поверхности Земли, т. е. когда значение высоты h над поверхностью много меньше радиуса $R_З$ и этим значением в формуле (4) можно пренебречь:

$$v_{\text{I}} = \sqrt{G\frac{M_З}{R_З}}. \qquad (5)$$

Подставив в формулу (5) значения $M_З = 6 \cdot 10^{24}$ кг, $R_З = 6400$ км $= 6{,}4 \cdot 10^6$ м, получим $v_{\text{I}} \approx 7900$ м/с $= 7{,}9$ км/с.

Значение первой космической скорости можно получить и другим способом. Движение искусственного спутника происходит только под действием силы тяжести, следовательно, его центростремительное ускорение совпадает с ускорением свободного падения вблизи поверхности Земли:

$$a_{\text{ц}} = g = \frac{v_{\text{I}}^2}{R_З + h} \approx \frac{v_{\text{I}}^2}{R_З}.$$

Отсюда получаем

$$v_{\text{I}} = \sqrt{gR_З} = \sqrt{9{,}8\,\text{м/с}^2 \cdot 6{,}4 \cdot 10^6\,\text{м}} \approx 7{,}9\ \text{км/с}.$$

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Тело может стать искусственным спутником Земли, только если его скорость больше, чем 7,9 км/с и меньше чем 11,2 км/с. При скорости, меньшей первой космической, тело упадёт на Землю. А при скорости, большей v_{II} = 11,2 км/с, которая называется *второй космической скоростью*, оно преодолеет притяжение Земли и окажется в межпланетном пространстве. Именно с такой скоростью космические корабли достигли Луны, Венеры и Марса. При достижении телом *третьей космической скорости* v_{III} = 16,7 км/с тело преодолеет притяжение Солнца и покинет Солнечную систему.

ПОЛЁТЫ К ДРУГИМ ПЛАНЕТАМ. По формуле (5) можно вычислить первую космическую скорость не только для Земли, но и для любого другого космического объекта, если известны его масса и радиус.

Космический корабль, взлетающий с поверхности Луны, чтобы улететь от неё, может двигаться значительно медленнее, чем такой же корабль, взлетающий с Земли.

Венера имеет размеры примерно такие же, как Земля, поэтому её первая космическая скорость близка к первой космической скорости Земли. Такие планеты, как Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, имеют огромные размеры и массы, их первые космические скорости существенно больше, чем для Земли.

Небесное тело	v_I, км/с	v_{II}, км/с
Луна	1,7	2,4
Меркурий	3,0	4,3
Венера	7,3	10,4
Земля	7,9	11,2
Марс	3,5	5,0
Юпитер	42,6	59,5
Сатурн	25,5	35,5
Уран	15,1	21,3
Нептун	16,7	23,5
Солнце	437,5	618,1

Одна из трудностей при планировании космических путешествий к другим планетам заключается в том, что требуется огромное количество топлива не только чтобы преодолеть гравитационное притяжение Земли, но и чтобы взлететь потом с другой планеты при возвращении на Землю.

ВЫВОД

Минимальная скорость, которую необходимо сообщить телу у поверхности Земли, чтобы оно стало искусственным спутником, называется первой космической скоростью.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Искусственный спутник Земли; первая космическая скорость

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что такое искусственный спутник Земли?
2. Что такое первая космическая скорость?
3. Искусственный спутник, вращающийся вокруг Земли, перевели на более высокую орбиту. Как при этом изменится его скорость?
4. Спутник движется по круговой орбите вблизи поверхности шарообразной планеты. Какая физическая характеристика планеты определяет период обращения этого спутника по орбите?

§ 22 ГРАВИТАЦИЯ И ВСЕЛЕННАЯ

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое гравитация и какую роль она играет во Вселенной.

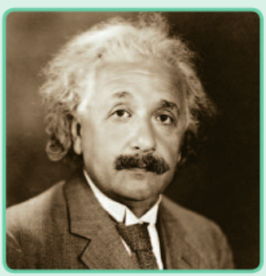
ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Как формулируется закон всемирного тяготения?

Под словом «Вселенная» мы обычно имеем в виду весь окружающий нас мир. Это понятие используется и тогда, когда хотят сказать о самом большом объекте реального мира, который можно наблюдать и изучать. Все тела во Вселенной, доступной для наблюдения, подчиняются закону всемирного тяготения.

ГРАВИТАЦИЯ. Фундаментальное свойство всех тел притягиваться друг к другу называется **всемирным тяготением** или **гравитацией** (от лат. *gravitas* — тяжесть). Свойство гравитации связано с массой тел.

ЭТО ИНТЕРЕСНО



Альберт Эйнштейн
(1879—1955)

Одним из самых выдающихся открытий в физике стало объяснение природы гравитации, которое впервые дал в общей теории относительности Альберт Эйнштейн.
Общая теория относительности, опубликованная в 1915—1916 гг., по существу является обобщённой теорией тяготения. Можно сказать, что теория относительности Эйнштейна произвела в науке революционный переворот.
Даже после того как теория тяготения Эйнштейна получила признание в научном мире, предпринимались попытки построения теории гравитации, основанной на других принципах. Однако всякий раз оказывалось, что именно теория Эйнштейна подтверждается астрономическими наблюдениями и экспериментальными проверками.

Силы гравитационного притяжения (силы тяготения) между окружающими нас телами обычных размеров чрезвычайно малы. Отметим также, что силы гравитации между двумя заряженными частицами намного меньше сил их электрического притяжения или отталкивания. Но именно силы гравитационного притяжения между нейтральными атомами водорода на ранней стадии развития Вселенной привели к образованию звёзд.

По мере увеличения массы силы притяжения между телами становятся всё более заметными, и при переходе к масштабам космических тел они начинают играть главную роль и достигают огромных значений. Например, сила взаимного притяжения Земли и Луны составляет около 10^{20} Н.

Именно благодаря гравитации отдельные космические тела организуются в системы. Размеры таких систем различны: от сравнительно небольших (с астрономической точки зрения) и простых систем, например таких, как система Земля—Луна, Солнечная система и двойные (кратные) звёзды, до больших звёздных скоплений, насчитывающих сотни тысяч звёзд.

Считается, что гравитация лежит в основе структуры Вселенной.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

По современным представлениям науки, возраст Вселенной составляет примерно 13,75 млрд лет, размер наблюдаемой части Вселенной — примерно 46 млрд световых лет, или 10^{26} м, средняя плотность вещества — примерно 10^{-29} г/см^3, масса наблюдаемой части Вселенной — больше 10^{50} т.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Во Вселенной имеются объекты, являющиеся источниками колоссальной гравитации: на их поверхности сила тяжести достигает огромных значений. Такими объектами являются, например, *белые карлики* и *нейтронные звёзды* (сверхплотные остатки некоторых звёзд). Ещё больше сила тяготения вблизи объектов, называемых *чёрными дырами*. Притяжение этих космических тел так велико, что они не отпускают от себя даже собственный свет, т. е. они не светятся, а остаются чёрными.

СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА. Солнце — это звезда, возраст которой составляет около 5 млрд лет. Солнечная система — это система космических тел, состоящая из самого́ Солнца, а также планет, спутников планет, астероидов, метеорных тел, комет и космической пыли. Все тела Солнечной системы движутся в области преобладающего гравитационного влияния Солнца.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Гелиоцентрическая система Коперника впервые дала возможность определить относительные расстояния планет от Солнца и от Земли. После изобретения Галилеем телескопа появилась возможность изучения физических характеристик космических тел, входящих в Солнечную систему. В 1609 г. Галилей впервые направил изготовленный им телескоп на Луну, Венеру, Юпитер и Сатурн и сделал ряд поразительных для его эпохи открытий. Наблюдая солнечные пятна, Галилей обнаружил вращение Солнца вокруг своей оси.

Планеты Солнечной системы разделяют на *планеты земной группы* (Меркурий, Венера, Земля, Марс) и *планеты-гиганты* (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун). Плутон, который ранее называли девятой планетой, в настоящее время считается *карликовой планетой* и крупнейшим объектом *пояса Койпера* (пояса астероидов).

Закон всемирного тяготения даёт возможность вычислить массы планет и их спутников, объяснить такие явления, как приливы и отливы в океанах, а также понять многие другие явления. Именно благодаря закону всемирного тяготения стало возможным открытие Нептуна и Плутона сначала при помощи теоретических вычислений, и только позже эти открытия были подтверждены астрономическими наблюдениями.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

В 1781 г. английский астроном У. Гершель открыл планету Уран. Была вычислена её орбита и составлена таблица положений этой планеты на много лет вперёд. Однако проверка этой таблицы на основе астрономических наблюдений показала, что её данные не совпадают с реальными. Была выдвинута гипотеза, что отклонение в движении Урана вызвано притяжением неизвестной планеты, находящейся от Солнца ещё дальше, чем Уран. Анализируя данные наблюдений, англичанин Дж. Адамс и француз У. Леверье вычислили положение гипотетической планеты на небе. По просьбе Леверье немецкий астроном И. Галле занялся проверкой гипотезы, и 28 сентября 1846 г. Галле, направив телескоп на указанное место, обнаружил новую планету, которую назвали Нептуном.
Подобным образом 14 марта 1930 г. был открыт и Плутон.

ПРИЛИВЫ И ОТЛИВЫ. *Приливами* и *отливами* называются периодические повышения и понижения уровня воды в океанах и морях. Причиной возникновения приливов и отливов является сила гравитационного притяжения Луны, движущейся по орбите вокруг Земли, а также Солнца, хотя его действие вдвое слабее. Под действием притяжения Луны земной шар немного деформируется, «вытягиваясь» вдоль линии Луна—Земля. В результате на поверхности Земли, обращённой к Луне, вода поднимается и возникает приливной «горб». Такой же приливной «горб» появляется на обратной стороне Земли. За счёт вращения Земли вокруг своей оси приливные волны движутся по поверхности Земли, обходя её примерно за 25 ч (лишний час связан с движением Луны по орбите). За это время в каждой точке Земли дважды происходит прилив и отлив.

СИЛА ТЯЖЕСТИ И УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ НА РАЗНЫХ ПЛАНЕТАХ. Говоря о силе тяжести, ранее мы имели в виду силу, с которой Земля взаимодействует с другими телами. В общем случае под силой тяжести можно понимать силу, создаваемую тяготением массивного тела, и поэтому имеет смысл говорить о силе тяжести на других планетах.

Силу тяжести на данной планете можно вычислить по формуле

$$F = mg,$$

где g — ускорение свободного падения вблизи поверхности планеты, которое можно рассчитать, зная массу M планеты и её радиус R:

$$g = \frac{GM}{R^2}.$$

Космическое тело	Ускорение свободного падения, м/с^2
Солнце	274
Луна	1,62
Меркурий	3,70
Венера	8,87
Земля	9,81
Марс	3,71
Юпитер	24,79
Сатурн	10,44
Уран	8,87
Нептун	11,15

ВЫВОДЫ

! Фундаментальное свойство всех тел притягиваться друг к другу называется всемирным тяготением или гравитацией.

! Благодаря гравитации отдельные космические тела организуются в системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Всемирное тяготение; гравитация; Вселенная; Солнечная система; приливы и отливы; сила тяжести на других планетах

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Какие процессы происходят во Вселенной в результате действия сил тяготения?
2. От чего зависит сила гравитационного притяжения?
3. Существует ли такая точка между Землёй и Луной, в которой гравитационная сила, действующая на тело, равна нулю?
4. Как показывает расчёт, Солнце притягивает Луну почти в 2 раза сильнее, чем Земля. Почему Луна остаётся при этом спутником Земли, а не самостоятельной планетой?

§ 23 СИЛА УПРУГОСТИ. ЗАКОН ГУКА

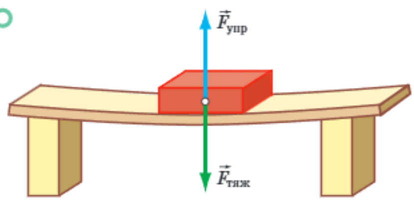
НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое сила упругости.
- В чём заключается закон Гука.
- Как определяется жёсткость системы последовательно или параллельно соединённых пружин.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое сила тяжести?
- Как можно записать уравнение второго закона Ньютона, если на тело действует несколько сил?

Почему покоятся тела, подвешенные на нити или лежащие на опоре? На эти тела действует сила, которая по значению равна силе тяжести, но направлена в противоположную сторону и уравновешивает её.



СИЛА УПРУГОСТИ. Напомним, что деформации, которые полностью исчезают, как только прекращается действие деформирующей силы, называются **упругими.** Деформации, которые не исчезают после прекращения действия деформирующей силы, называются **пластическими.**

Если на деревянную доску, лежащую на двух опорах, положить тяжёлый кирпич, то сначала под действием силы тяжести кирпич начнёт двигаться вниз, прогибая доску. Однако через короткое время движение прекратится. Доска прогнётся, или, другими словами, доска деформируется. Кирпич не упадёт на землю, так как деформированная доска действует на него с силой, направленной вертикально вверх. Эта сила называется *силой упругости*. Сила упругости изображена стрелкой, приложенной к центру кирпича, хотя такое изображение является достаточно условным. В реальности сила упругости, действующая со стороны доски на кирпич, распределена по всей площади соприкосновения.

Силы, возникающие в любом сечении упруго деформированного тела и стремящиеся вернуть его в первоначальное недеформированное состояние, называются **силами упругости.**

Упругая сила, действующая на тело со стороны опоры, называется **силой реакции опоры.**

ЗАКОН ГУКА. Английский физик Роберт Гук, современник И. Ньютона, в 1660 г. экспериментально установил, как зависит сила упругости $F_{упр}$ от деформации Δl.

ВАЖНО

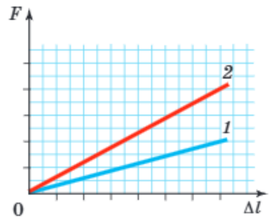
Закон Гука. Для упругих деформаций модуль силы упругости при растяжении (или сжатии) тела прямо пропорционален изменению длины тела:

$$F_{упр} = k|\Delta l|.$$

Коэффициент пропорциональности k называется **коэффициентом упругости** тела (стержня, пружины и т. п.) или **жёсткостью.** Он зависит от формы и размеров тела, а также от материала, из которого оно изготовлено. Коэффициент упругости в СИ выражается в *ньютонах на метр* (Н/м).

Закон Гука справедлив только для *упругих* деформаций, т. е. деформаций, которые полностью исчезают, как только прекращается действие деформирующей силы.

Закон Гука можно представить в виде графика зависимости силы упругости от изменения длины пружины. Эта зависимость является прямо пропорциональной. Если взять любую точку, лежащую на прямой, и определить её координаты, то по оси абсцисс мы получим значение Δl, а по оси ординат — значение $F_{\text{упр}}$. Разделив одно значение на другое, получим коэффициент упругости (жёсткость) пружины. Чем больше угол наклона графика к оси абсцисс, тем больше коэффициент упругости.

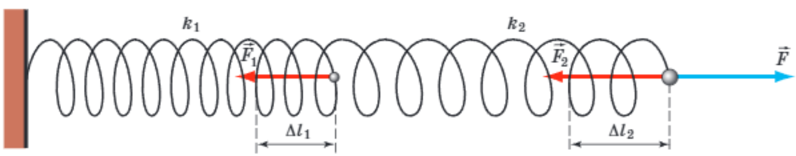


В инженерной практике при проектировании и расчётах различных конструкций наряду с понятием коэффициента упругости (тросов, стержней и т. п.) широко используется понятие **модуля упругости**, который определяется отношением (F/S) нагрузки, приходящейся на единицу площади S поперечного сечения тела, к относительной деформации тела (относительная деформация — это отношение $\frac{\Delta l}{l}$ модуля деформации к первоначальной длине тела).

Введение модуля упругости позволяет записать закон Гука в более общем виде, чем в случае пружин или упругих нитей.

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРУЖИН. Довольно часто в различных механизмах используется не одна пружина, а системы последовательно и параллельно соединённых пружин. Рассмотрим, как найти суммарную (или эффективную) жёсткость нескольких пружин при их последовательном и параллельном соединениях.

Пусть две *последовательно соединённые* безмассовые пружины, жёсткости которых k_1 и k_2 известны, расположены на гладкой горизонтальной поверхности. Причём свободный конец одной из пружин прикреплён к неподвижной опоре. Подействуем на свободный конец другой пружины некоторой силой $\vec{F}$. Обозначим Δl_1 и Δl_2 — деформации каждой из пружин, F_1 и F_2 — модули сил упругости в витках пружин.



Последовательное соединение пружин

В соответствии с законом Гука $F_1 = k_1\Delta l_1$ и $F_2 = k_2\Delta l_2$.

Так как система находится в равновесии, то

$$F = F_1 = F_2, \tag{1}$$

т. е. сила упругости в каждом витке любой из пружин одна и та же.

Найдём деформации пружин:

$$\Delta l_1 = \frac{F_1}{k_1}; \quad \Delta l_2 = \frac{F_2}{k_2}. \tag{2}$$

Суммарная деформация двух пружин:

$$\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2. \tag{3}$$

Обозначим $k_{эф1}$ — *эффективная жёсткость* системы двух последовательно соединённых пружин.

Для системы пружин, находящихся в равновесии, $F = k_{эф1}\Delta l$; $\Delta l = \dfrac{F}{k_{эф1}}$.

С учётом выражений (2) и (3):

$$\frac{F}{k_{эф1}} = \frac{F_1}{k_1} + \frac{F_2}{k_2}.$$

Учитывая равенство (1), получим

$$\frac{1}{k_{эф1}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}. \tag{4}$$

Отсюда $k_{эф1} = \dfrac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$.

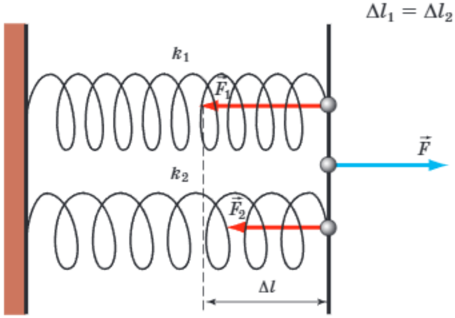
Для трёх последовательно соединённых пружин с жёсткостями k_1, k_2 и k_3

$$\frac{1}{k_{эф1}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3}. \tag{5}$$

Если жёсткости двух последовательно соединённых пружин одинаковы ($k_1 = k_2 = k$), то $k_{эф1} = \dfrac{k}{2}$, т. е. эффективная жёсткость пружин в 2 раза меньше, чем жёсткость каждой из них. Если последовательно соединены N одинаковых пружин, то эффективная жёсткость будет в N раз меньше: $k_{эф1} = \dfrac{k}{N}$.

При вычислении жёсткости двух *параллельно соединённых* пружин необходимо учитывать, что их дли́ны в недеформированном состоянии должны быть одинаковыми. В этом случае, очевидно, деформации пружин будут равны:

$$\Delta l_1 = \Delta l_2 = \Delta l.$$



Параллельное соединение пружин

Обозначим жёсткости пружин k_1 и k_2 и запишем условие равновесия системы под действием некоторой силы $\vec{F}$:

$$\vec{F} + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0.$$

Поскольку по закону Гука

$$F_1 = k_1\Delta l_1 \quad \text{и} \quad F_2 = k_2\Delta l_2,$$

то условия равновесия можно переписать в виде

$$F = (k_1 + k_2)\Delta l.$$

Заменив систему двух пружин на пружину с *эффективной жёсткостью* $k_{эф2}$, запишем $F = k_{эф2}\Delta l$.

Следовательно, $k_{эф2}\Delta l = (k_1 + k_2)\Delta l$, или

$$k_{эф2} = k_1 + k_2. \quad (6)$$

При параллельном соединении трёх пружин с коэффициентами упругости k_1, k_2 и k_3 аналогично получим

$$k_{эф2} = k_1 + k_2 + k_3.$$

При параллельном соединении N одинаковых пружин с жёсткостью k

$$k_{эф2} = Nk.$$

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Пружины — важный элемент различных механизмов и конструкций. Они применяются в мягкой мебели, лифтах, часах, детских игрушках и т. д. Упругие элементы в транспортных средствах обеспечивают передачу нагрузки с рамы на колёса и смягчают толчки и удары при проезде по неровной дороге. Эти элементы называются рессорами. В железнодорожном транспорте используются пружинные рессоры.

При использовании пружин важно учитывать их жёсткость, а также то, каким образом пружины соединяются между собой. Если пружины соединяются последовательно, то жёсткость системы уменьшается, однако это позволяет увеличить максимальное удлинение. Параллельное соединение пружин используется, когда нужно существенно повысить жёсткость создаваемой системы.

ВЫВОДЫ

- Силы упругости — это силы, возникающие в любом сечении упруго деформированного тела и стремящиеся вернуть тело в первоначальное недеформированное состояние.
- Закон Гука: для упругих деформаций модуль силы упругости при растяжении (или сжатии) тела прямо пропорционален изменению длины тела.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Сила упругости; закон Гука; параллельное соединение пружин; последовательное соединение пружин

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Как возникает сила упругости?
2. Как определить жёсткость пружины?
3. Как вычислить эффективную жёсткость системы последовательно или параллельно соединённых пружин?
4. Упругую пружину разрезали на 3 равные части, которые затем соединили параллельно. Во сколько раз изменилась при этом жёсткость системы пружин?

§ 24 ВЕС ТЕЛА

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое вес тела.
- Как вес тела зависит от ускорения опоры или подвеса.
- Что такое невесомость.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое сила тяжести и сила упругости?
- Как формулируются второй и третий законы Ньютона?

С понятием «вес» вы познакомились в курсе физики 7 класса. Теперь нам предстоит это понятие расширить и установить, какое влияние на вес оказывает движение тела с ускорением.

ВЕС ТЕЛА И СИЛА ТЯЖЕСТИ. Рассмотрим тело, подвешенное к пружине, верхний конец которой закреплён в лапке штатива. При этом на тело действуют сила тяжести и сила упругости пружины. Поскольку тело находится в равновесии, то эти силы уравновешивают друг друга.

Таким образом, если тело и подвес неподвижны или движутся равномерно и прямолинейно, т. е. без ускорения, то согласно второму закону Ньютона

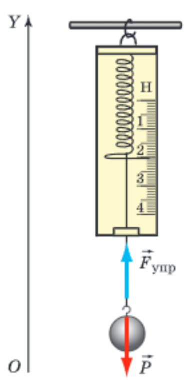
$$\vec{F}_{тяж} + \vec{F}_{упр} = 0. \quad (1)$$

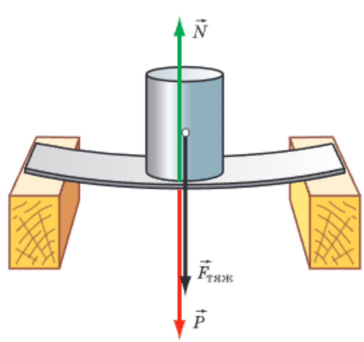
Если пружина действует на тело с силой упругости $\vec{F}_{упр}$, то согласно третьему закону Ньютона тело действует на крючок пружины с некоторой силой $\vec{P}$, причём

$$\vec{P} = -\vec{F}_{упр}. \quad (2)$$

Здесь $\vec{P}$ и есть **вес** тела.

Если тело находится на опоре, то в этом случае также происходит взаимодействие опоры и тела. Опора действует на тело с силой реакции опоры, а тело действует на опору с силой, называемой весом $\vec{P}$ тела.





ВАЖНО

Сила, с которой тело в результате его притяжения Землёй растягивает подвес или действует на опору, называется **весом тела**.

Из равенств (1) и (2) следует:

$$\vec{P} = \vec{F}_{тяж} = m\vec{g}, \qquad (3)$$

т. е. если опора или подвес покоятся или движутся без ускорения, то вес тела равен силе тяжести.

Однако вес нельзя отождествлять с силой тяжести: это разные физические понятия. Сила тяжести и вес тела имеют различную физическую природу: сила тяжести возникает вследствие взаимодействия тела и Земли, а вес — в результате взаимодействия тела и опоры (подвеса). Именно поэтому **сила тяжести приложена к телу, а вес — к опоре или подвесу**. Следовательно, вес тела связан с проявлениями сил упругости.

ЗАВИСИМОСТЬ ВЕСА ТЕЛА ОТ УСКОРЕНИЯ ОПОРЫ (ПОДВЕСА). Рассмотрим теперь случай, когда динамометр с прикреплённым к нему телом движется относительно Земли в вертикальном направлении с некоторым ускорением. Согласно второму закону Ньютона:

$$m\vec{g} + \vec{F}_{упр} = m\vec{a}. \qquad (4)$$

Если тело движется *вниз* и ось OY также направлена вниз, то в проекциях на ось OY уравнение (4) примет вид

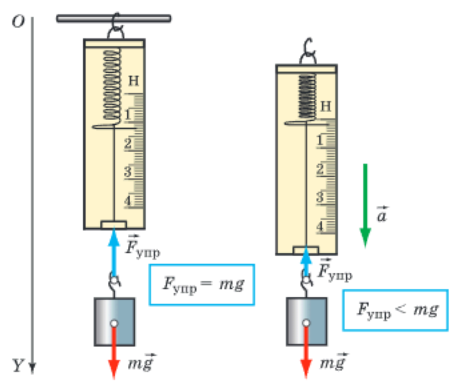
$$mg - F_{упр} = ma,$$

откуда $F_{упр} = mg - ma$.

Поскольку вес P тела по модулю равен силе $F_{упр}$, то

$$P = mg - ma. \qquad (5)$$

Из равенства (5) следует, что **при движении вниз с ускорением $a < g$ вес тела меньше силы тяжести mg, т. е. меньше веса покоящегося тела**.



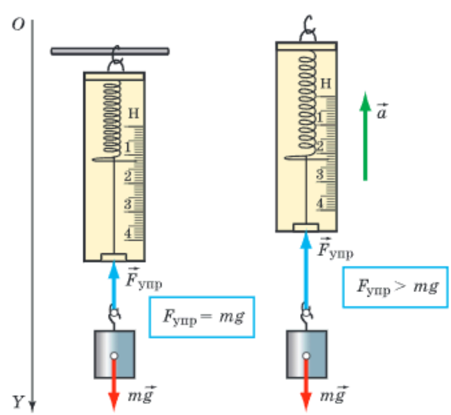
Если динамометр с подвешенным к нему телом поднимать с ускорением *вверх*, то выражение (4) принимает вид

$$mg - F_{упр} = -ma,$$

откуда $F_{упр} = mg + ma$. Следовательно,

$$P = mg + ma. \qquad (6)$$

Таким образом, **при ускоренном движении вверх вес тела больше силы тяжести mg, т. е. больше веса покоящегося тела**.



НЕВЕСОМОСТЬ И ПЕРЕГРУЗКА. Из формулы (5) непосредственно следует, что при свободном падении динамометра с прикреплённым к нему телом, т. е. в случае $a = g$, вес тела $P = mg - mg = 0$.

В этом случае говорят о состоянии **невесомости**: тело не давит на опору и не растягивает подвес. Земля по-прежнему притягивает и тело, и подвес, сообщая им одинаковые ускорения свободного падения.

Любое тело находится в состоянии невесомости, если на него действует только сила тяжести. Например, все тела, находящиеся в космическом корабле, свободно обращающемся вокруг Земли, невесомы.

В состоянии невесомости космонавты могут столкнуться с рядом физиологических проблем. Например, уменьшается частота сердечных сокращений и частота дыхания, происходит перераспределение жидкостей в организме человека: в нижних конечностях её становится меньше, а в верхней части тела — больше, мышцы на ногах становятся слабее. Для поддержания здоровья космонавты должны выполнять специальные физические упражнения. После возвращения на Землю у космонавтов могут наблюдаться слабость и потеря чувства равновесия, однако восстановление от последствий невесомости происходит в течение нескольких дней.

Увеличение веса при ускоренном движении вверх тела вместе с подвесом (или опорой) называется **перегрузкой**. С учётом формулы (6) перегрузку определяют отношением веса ускоренно движущегося тела к весу покоящегося тела:

$$k = \frac{m(g + a)}{mg} = 1 + \frac{a}{g}.$$

Например, при взлёте реактивного самолёта пассажир испытывает перегрузку около $1{,}5g$. Перегрузка парашютиста при раскрытии парашюта достигает $10g$, а при приземлении — $1{,}8g$. Лётчики-испытатели и космонавты способны кратковременно выдерживать почти семикратную перегрузку.

Чтобы космонавт легче переносил перегрузки, он находится в специально созданном кресле так, что увеличенный вес космонавта распределяется по возможно большей площади.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Ещё 2000 лет назад древнегреческий учёный Аристотель писал: «Вода не выливается из сосуда, который вращается, — не выливается даже тогда, когда сосуд перевёрнут дном вверх, ибо этому мешает вращение». Действительно, если достаточно быстро вращать ведёрко с водой, вода не будет из него выливаться, даже когда оно находится в верхней точке.

А с какой минимальной скоростью надо вращать ведёрко, чтобы вода из него не выливалась?

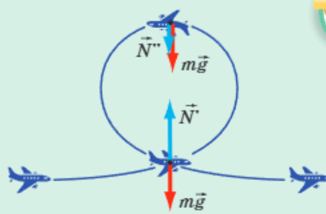
Ведёрко движется по окружности, значит, имеет центростремительное ускорение $a = v^2/R$, где v — скорость движения ведёрка по окружности радиусом R. В верхней точке ведёрко и вода находятся в состоянии невесомости: дно ведёрка не оказывает воздействия на воду. Тогда на воду действует только сила тяжести и по второму закону Ньютона $m\frac{v^2}{R} = mg$.

Поэтому скорость должна быть такой, чтобы центростремительное ускорение ведёрка было не меньше ускорения свободного падения:

$$\frac{v^2}{R} \geqslant g, \quad \text{или} \quad v \geqslant \sqrt{gR}.$$

Законы динамики применяют в том числе для расчётов аэродинамических сил при выполнении лётчиками фигур высшего пилотажа.

Оценим, какие перегрузки испытывает пилот самолёта при выполнении трюка «мёртвая петля». Пусть скорость самолёта в нижней точке петли равна 280 км/ч (78 м/с), скорость самолёта в верхней точке петли — 150 км/ч (42 м/с), радиус петли — 100 м, масса пилота — 80 кг.



На пилота в самолёте действуют сила тяжести и сила реакции опоры, равная весу. Наибольшую перегрузку лётчик будет испытывать в нижней точке траектории.

Запишем второй закон Ньютона в проекции на вертикальную ось, направленную вверх.

Для нижней точки петли: $N' - mg = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow N' = mg + \frac{mv^2}{R}$.

Для верхней точки петли: $N'' + mg = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow N'' = \frac{mv^2}{R} - mg$.

Подставив числовые значения, получим, что вес пилота в нижней точке петли равен 5651 Н, а в верхней точке петли — 627 Н.

ВЫВОДЫ

- Сила, с которой тело в результате его притяжения Землёй растягивает подвес или действует на опору, называется весом тела. Значение веса зависит от ускорения, с которым движется тело.
- Если на тело действует только сила тяжести, оно находится в состоянии невесомости: не давит на опору и не растягивает подвес.
- Увеличение веса при ускоренном движении вверх тела вместе с подвесом (или опорой) называется перегрузкой.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Вес; сила тяжести; невесомость; перегрузка

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что такое вес тела?
2. Чему равен вес тела, движущегося с известным ускорением: вниз; вверх?
3. Чем отличается вес тела от силы тяжести?
4. Что такое невесомость и перегрузка?

§ 25 СИЛА ТРЕНИЯ

НОВОЕ В УРОКЕ

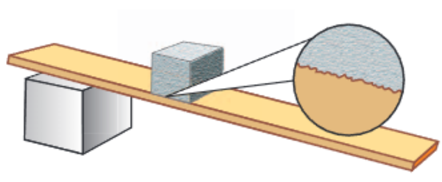
- Какова природа сил трения.
- В чём заключается различие сил трения и сил упругости.
- Что такое трение покоя и трение скольжения.
- Что такое коэффициент трения.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

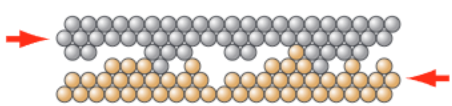
- Что такое сила упругости?
- Как движется тело, если проекции сил на направление движения равны по модулю и противоположны по знаку?

Изучая законы механики, вы уже познакомились с двумя типами сил: с силами упругости и силами тяготения. Однако существует ещё один тип сил, без действия которых невозможно представить себе движение тел. Это **силы трения**, которые возникают между поверхностями соприкасающихся тел и всегда препятствуют их относительному перемещению.

ПРИРОДА СИЛ ТРЕНИЯ. Одна из отличительных особенностей сил трения заключается в том, что эти силы всегда направлены вдоль поверхностей соприкосновения тел, в то время как силы упругости направлены перпендикулярно этим поверхностям. Вместе с тем и силы трения, и силы упругости имеют электрическую природу.

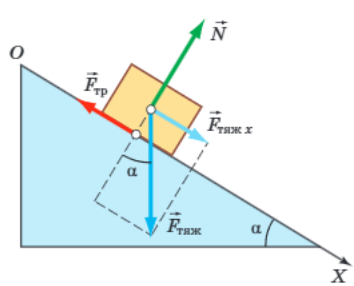


Шероховатость поверхностей



Обсудим, почему тело, лежащее на наклонной плоскости, не соскальзывает вниз. Причина обусловлена наличием многочисленных неровностей на соприкасающихся поверхностях тел. Эти неровности цепляются друг за друга и препятствуют соскальзыванию тела. То же самое происходит в случае, если одно тело пытаются перемещать по поверхности другого под действием внешней силы.

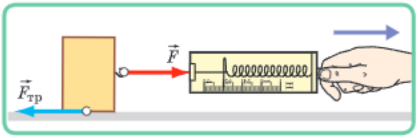
Однако при возникновении проскальзывания тел относительно друг друга шероховатости и неровности начинают разрушаться, что является следствием разрыва молекулярных связей. На этом явлении основаны методы *шлифовки* различных поверхностей.



ТРЕНИЕ ПОКОЯ. Рассмотрим тело, покоящееся на наклонной поверхности. Почему оно не соскальзывает вниз? В направлении, параллельном наклонной плоскости, на тело действует сила, которая компенсирует проекцию силы тяжести $F_{тяж.\ x}$ на это направление. Эта сила называется **силой трения покоя**.

Возникновение и изменение силы трения покоя легко проследить на опыте, используя брусок, помещённый на горизонтальную подставку, и динамометр.

ИССЛЕДОВАНИЕ



Подействуем на брусок посредством пружины динамометра некоторой горизонтальной силой $\vec{F}$. Опыт показывает, что, пока эта сила меньше некоторого значения F_{max}, брусок сохраняет состояние покоя. Это означает, что одновременно с внешней силой $\vec{F}$ на брусок со стороны поверхности начинает действовать сила трения $\vec{F}_{тр}$, равная по модулю внешней силе и направленная противоположно.

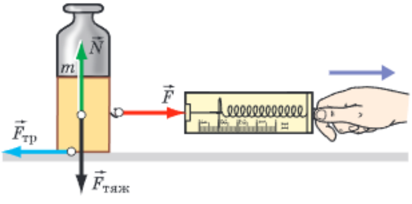
Пока тело не сдвинулось с места, **сила трения покоя равна по модулю и направлена противоположно силе, приложенной к телу параллельно поверхности соприкосновения его с другим телом**.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Мы можем наблюдать вокруг нас множество примеров проявления силы трения покоя. Из-за трения покоя трудно сдвинуть с места шкаф, автомобиль, тяжёлый камень и др. Сила трения покоя не даёт развязываться бантам и узлам, расстёгиваться застёжкам-липучкам. Благодаря силе трения покоя нитка удерживается в иголке, когда мы шьём, на конвейерной ленте не падают грузы при подъёме, гвоздь может держаться в стене, а автомобиль стоять на тормозе на крутом склоне и не соскальзывать вниз.

Если тело лежит на горизонтальной поверхности и параллельно этой поверхности на тело не действуют никакие силы, то *сила трения покоя равна нулю*.

Таким образом, **сила трения покоя может изменяться от нуля до некоторого максимального значения $F_{тр.\ max}$**. Только в том случае, когда параллельная поверхности сила $\vec{F}$ превысит это значение, тело начнёт перемещаться.



Опытным путём можно установить, от чего зависит максимальное значение силы трения покоя. Для этого будем помещать на брусок дополнительные грузы, увеличивая тем самым силу, прижимающую брусок к поверхности. Опыт показывает, что максимальная сила трения покоя прямо пропорциональна этой силе. Поскольку сила, прижимающая брусок к поверхности, уравновешивается силой реакции опоры N, то можно записать:

$$F_{тр.\ max} = \mu N,$$

где коэффициент пропорциональности μ не зависит от прижимающей силы, но зависит от материалов, из которых изготовлены поверхности соприкасающихся тел, а также от качества обработки поверхностей и их состояния. Он называется **коэффициентом трения**.

ТРЕНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ. Когда действующая на брусок со стороны динамометра сила упругости $\vec{F}_{упр}$ незначительно превысит силу трения покоя $\vec{F}_{тр.\ max}$, брусок начнёт скользить по поверхности. Если брусок движется равномерно, то это означает, что на него в горизонтальном направлении действует ещё одна сила, равная по модулю силе упругости, но направленная противоположно ей. Эта сила называется **силой трения скольжения**.

Важная особенность силы трения скольжения заключается в том, что она направлена всегда противоположно направлению скорости движения одного тела относительно соприкасающегося с ним другого тела.

Так же как и максимальная сила трения покоя, сила трения скольжения пропорциональна силе нормального давления, модуль которой равен модулю *силы реакции опоры* $\vec{N}$.

Многочисленные опыты показали, что при малых относительных скоростях движения тел сила трения скольжения незначительно отличается от максимальной силы трения покоя. Поэтому в большинстве случаев силу трения скольжения считают постоянной и равной значению $F_{тр.\ max}$:

$$F_{тр} \approx F_{тр.\ max} = \mu N.$$

ВАЖНО

Если обозначить величины: сила трения — $F_{тр}$, коэффициент трения — μ, сила реакции опоры — N, то **силу трения скольжения** рассчитывают по формуле

$$F_{тр} = \mu N.$$

Эту формулу часто называют **законом Амонтона—Кулона.**

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Шарль Кулон занимался не только электричеством, но и технической механикой. В 1781 г. он писал: «При скольжении дерева по дереву без смазки с некоторой скоростью сила трения также пропорциональна нормальному давлению».

Как показывают опыты, **сила трения скольжения не зависит от площади соприкасающихся поверхностей тел**. Например, если три одинаковых кирпича лежат на трёх разных гранях, то, чтобы сдвинуть их с места, необходимо приложить одинаковые силы.

Коэффициент трения скольжения зависит от материалов трущихся поверхностей и от их обработки. В таблице приведены коэффициенты трения скольжения для некоторых пар материалов.

Пары материалов	Коэффициент трения скольжения
Металл по металлу	0,15—0,20
Металл по металлу при смазке	0,07—0,1
Дерево по металлу	0,20—0,50
Дерево по льду	0,035
Железо по льду	0,020
Сталь заточенная по льду (коньки)	0,015
Шина по сухому асфальту	0,50—0,75

Окончание

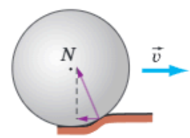
Пары материалов	Коэффициент трения скольжения
Шина по влажному асфальту	0,35—0,45
Шина по гладкому льду	0,15—0,25

ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ. Трение качения возникает в случае, когда одно тело катится по поверхности другого тела. Например, такое трение возникает при движении колёс велосипеда или автомобиля, при перекатывании по земле мяча или другого круглого предмета.

Сила трения качения имеет направление, противоположное направлению движения тела.

При равных нагрузках сила трения качения всегда меньше силы трения скольжения.

О ПРИРОДЕ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ. В окружающем нас мире не существует абсолютно недеформируемых тел. Когда колесо железнодорожного вагона катится по рельсу, деформируются и рельс, и колесо. Это изображено на рисунке в сильно увеличенном масштабе. Колесо при своём движении всё время как бы накатывается на своеобразный «бугорок», который образуется в результате деформации рельса. При этом сила упругости $\vec{N}$, действующая на колесо со стороны рельса, не будет направлена вертикально вверх, а будет несколько отклонена назад. Опустим перпендикуляр из конца вектора $\vec{N}$ на направление движения колеса. Отрезок, соединяющий начало вектора $\vec{N}$ и перпендикуляр, назовём горизонтальной составляющей силы реакции опоры. Именно она оказывает тормозящее воздействие на катящееся колесо и представляет собой искомую силу трения качения.



ВЫВОД

Сила, возникающая между поверхностями соприкасающихся тел и препятствующая их относительному перемещению, называется силой трения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Сила трения; трение покоя; трение скольжения; трение качения; коэффициент трения

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Какая сила называется силой трения?
2. В чём сходство и в чём различия сил трения и сил упругости?
3. От каких факторов зависит сила трения скольжения?
4. Может ли сила трения действовать на тело в направлении его движения? Поясните и приведите примеры.
5. Приведите примеры полезного и вредного трения.

§ 26 ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕСКОЛЬКИХ СИЛ. ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ СИЛ

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое принцип суперпозиции сил.
- Какие силы действуют на тело, находящееся на наклонной плоскости
- Как найти ускорение тела, движущегося по наклонной плоскости под действием силы тяжести.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое равнодействующая сила и как её определить?
- Как формулируется второй закон Ньютона?

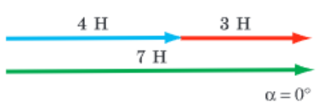
Обычно тела движутся под действием не одной, а сразу нескольких сил. При этом силы, действующие на тело, могут быть направлены как вдоль одной прямой, так и под углом друг к другу.

ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ СИЛ. Если на тело действует несколько сил, то под $\vec{F}$ во втором законе Ньютона следует понимать их **равнодействующую**, равную векторной сумме всех сил, действующих на тело:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_\text{р}}{m}; \quad \vec{F}_\text{р} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ldots .$$

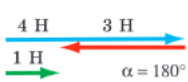
Это положение называется **принципом суперпозиции сил.**

Результат как сложения, так и вычитания двух векторов зависит от угла между ними. В качестве примера рассмотрим, чему может быть равна равнодействующая двух сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, значения которых равны соответственно 4 Н и 3 Н, в зависимости от угла между этими силами.



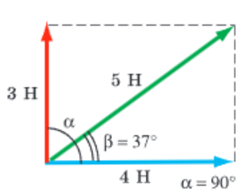
Если силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ направлены в одну и ту же сторону (вдоль одной прямой), то угол между ними составляет 0°. В этом случае направление равнодействующей силы $\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ совпадает с направлением этих сил, а её модуль равен

$$R = F_1 + F_2 = 4\ \text{Н} + 3\ \text{Н} = 7\ \text{Н}.$$



Если силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ направлены в противоположные стороны, то угол α между ними составляет 180°. В этом случае направление равнодействующей силы $\vec{R}$ совпадает с направлением большей по модулю силы $\vec{F}_1$. Модуль равнодействующей в этом случае равен

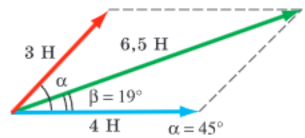
$$R = F_1 - F_2 = 4\ \text{Н} - 3\ \text{Н} = 1\ \text{Н}.$$



Пусть угол α между силами $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ прямой. Тогда вектор $\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ является гипотенузой треугольника, и его длину можно найти по теореме Пифагора:

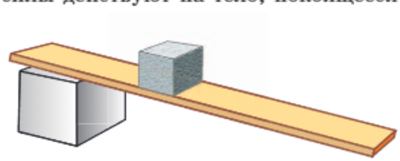
$$R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5\ (\text{Н}).$$

Если угол α между силами $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ составляет произвольный угол α, то равнодействующую силу можно построить, используя либо правило треугольника, либо правило параллелограмма для сложения векторов.



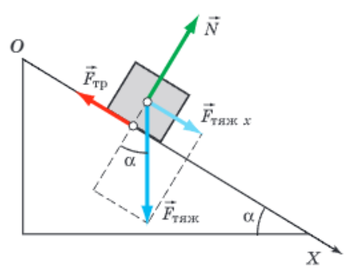
Основной задачей механики является определение положения тела в любой момент времени. Зная массу тела и равнодействующую сил, действующих на него, по второму закону Ньютона можно найти ускорение тела, а далее с помощью кинематических уравнений определить его скорость и координаты. Инженеры на производстве часто решают обратные задачи. Зная параметры движения различных деталей конструкций, они рассчитывают силы, действующие на отдельные детали, и определяют оптимальные для них материалы и размеры.

ТЕЛО, НАХОДЯЩЕЕСЯ В ПОКОЕ НА НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ. Одним из примеров движения тела под действием нескольких сил является движение по наклонной плоскости. Рассмотрим сначала, какие силы действуют на тело, покоящееся на наклонной плоскости.



Пусть на наклонной плоскости с углом наклона $\alpha = 30°$ лежит деревянный брусок массой 200 г. Брусок не движется относительно наклонной плоскости, т. е. находится в состоянии равновесия. Определим силу трения покоя, действующую на этот брусок.

Свяжем систему отсчёта с Землёй (инерциальная система отсчёта). Направим ось OX вдоль наклонной плоскости вниз. Брусок покоится, т. е. его ускорение $\vec{a} = 0$.



Изобразим силы, действующие на брусок: сила тяжести $\vec{F}_{тяж}$, сила трения $\vec{F}_{тр}$ и сила реакции опоры $\vec{N}$. Сила трения препятствует движению бруска вниз под действием силы тяжести.

Запишем второй закон Ньютона:

$$\vec{F}_{тяж} + \vec{F}_{тр} + \vec{N} = m\vec{a}.$$

В проекциях на ось OX:

$$F_{тяж\,x} + F_{тр\,x} + N_x = ma_x.$$

Поскольку сила реакции опоры $\vec{N}$ перпендикулярна поверхности наклонной плоскости, то $N_x = 0$. Направление силы трения противоположно направлению оси OX, поэтому $F_{тр\,x} = -F_{тр}$. Согласно рисунку $F_{тяж\,x} = mg \sin \alpha$. Учитывая, что при отсутствии движения $a_x = 0$, получаем:

$$mg \sin \alpha - F_{тр} = 0.$$

$$F_{тр} = mg \sin \alpha.$$

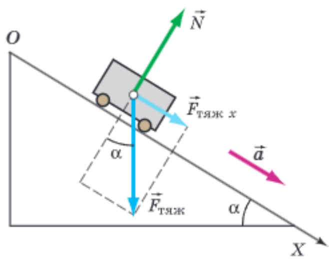
Установим наименование полученной величины:

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

Подставим числовые значения:

$$F_{тр} = 0{,}2 \cdot 9{,}8 \cdot 0{,}5 = 0{,}98 \text{ (Н)}.$$

ДВИЖЕНИЕ ПО НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ. Пусть по наклонной плоскости движется тележка массой 270 г. Её движение обусловлено действием силы тяжести.



Рассмотрим движение тележки с учётом того, что силы трения малы и ими можно пренебречь. Ответим на вопрос, с каким ускорением движется тележка по наклонной плоскости, угол наклона α которой составляет 30°.

Свяжем систему отсчёта с наклонной плоскостью. Направим ось OX вдоль наклонной плоскости по направлению движения тележки. Обозначим через $\vec{a}$ ускорение, с которым движется тележка. Так как силой трения мы пренебрегаем, то можно сказать, что на тележку действуют две силы: сила тяжести $\vec{F}_{тяж}$ и сила реакции опоры $\vec{N}$.

Согласно второму закону Ньютона:

$$\vec{F}_{тяж} + \vec{N} = m\vec{a}.$$

Запишем это уравнение в проекциях на ось OX. Поскольку сила $\vec{N}$ перпендикулярна поверхности наклонной плоскости, то её проекция на ось OX будет равна 0. Тогда:

$$F_{тяж\ x} = ma_x,$$

откуда:

$$a_x = \frac{F_{тяж\ x}}{m}.$$

Согласно рисунку $F_{тяж\ x} = mg \sin \alpha$.

Следовательно,

$$a = a_x = g \sin \alpha.$$

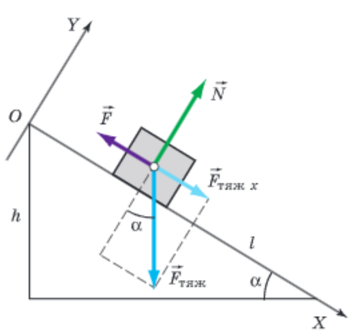
Установим наименование полученной величины: $[a] = \frac{м}{с^2}$.

Подставив числовые значения, получим:

$$a = 9{,}8\ м/с^2 \cdot \frac{1}{2} = 4{,}9\ м/с^2.$$

Таким образом, ускорение, с которым движется тележка, составляет 4,9 м/с².

НАКЛОННАЯ ПЛОСКОСТЬ И ВЫИГРЫШ В СИЛЕ. Груз массой m поднимают по наклонной плоскости длиной l и высотой h. Определим выигрыш в силе, получаемый благодаря использованию наклонной плоскости. Трением пренебрегаем. Свяжем систему отсчёта с Землёй. Направим ось OX вдоль наклонной плоскости вниз, а ось OY перпендикулярно оси OX. Для того чтобы поднять груз по наклонной плоскости, необходимо подействовать на него с силой $\vec{F}$, направленной вверх вдоль наклонной плоскости. Выигрыш в силе n показывает, во сколько раз значение приложенной силы при использовании простого механизма (наклонной плоскости) меньше силы, которую следовало бы приложить для преодоления силы тяжести, действующей на тело при его подъёме:



$$n = \frac{F_{тяж}}{F}.$$

Поскольку силой трения пренебрегаем, то второй закон Ньютона имеет вид:

$$\vec{F}_{тяж} + \vec{N} + \vec{F} = m\vec{a},$$

где $\vec{F}_{тяж}$ — сила тяжести, действующая на тело; $\vec{N}$ — сила реакции опоры; $\vec{F}$ — сила, действующая на тело. Допустим, что значение силы $\vec{F}$ таково, что груз поднимается равномерно, т. е. $\vec{a} = 0$. Тогда

$$\vec{F}_{тяж} + \vec{N} + \vec{F} = 0.$$

В выбранной системе отсчёта:

$$F_{тяж\,x} = mg\sin\alpha; \quad F_{тяж\,y} = -mg\cos\alpha;$$
$$N_x = 0; \quad N_y = N;$$
$$F_x = -F; \quad F_y = 0.$$

В проекциях на оси OX и OY получим систему уравнений:

$$mg\sin\alpha - F = 0;$$
$$N - mg\cos\alpha = 0.$$

Из первого уравнения выразим силу: $F = mg\sin\alpha$.

По определению синуса $\sin\alpha = \dfrac{h}{l}$.

Тогда выигрыш в силе $n = \dfrac{F_{тяж}}{F} = \dfrac{mg}{mg\cdot\dfrac{h}{l}} = \dfrac{l}{h}$.

Выигрыш в силе тем больше, чем больше длина наклонной плоскости по отношению к её высоте.

ВЫВОДЫ

- Равнодействующая сил равна векторной сумме сил, действующих на тело.
- Если на тело действуют несколько сил, то второй закон Ньютона следует записывать для проекций сил на координатные оси.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Наклонная плоскость; выигрыш в силе; принцип суперпозиции сил

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Как определить ускорение тела, движущегося по наклонной плоскости под действием силы тяжести?
2. Чему равен выигрыш в силе при использовании наклонной плоскости?
3. На наклонной плоскости с углом наклона α лежит брусочек массой m. Чему равна сила реакции, действующая на брусочек со стороны плоскости? Чему равна при этом сила трения?

§ 27 РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

ЗАДАЧА 1. Под действием силы 3 Н мячик приобретает ускорение 5 м/с^2. Под действием какой силы ускорение мячика составит 9,8 м/с^2?

Дано:
$F_1 = 3$ Н
$a_1 = 5$ м/с^2
$a_2 = 9{,}8$ м/с^2

F_2 — ?

Решение.

$$F_1 = ma_1; \quad m = \frac{F_1}{a_1}.$$

$$F_2 = ma_2 = F_1\frac{a_2}{a_1}.$$

$$F_2 = 3\text{ Н} \cdot \frac{9{,}8\text{ м/с}^2}{5\text{ м/с}^2} = 5{,}88\text{ Н}.$$

Ответ: 5,88 Н.

ЗАДАЧА 2. Скорость автомобиля, движущегося по прямой, изменяется по закону $v(t) = 2{,}5t + 10$ (все величины выражены в единицах СИ). Определите результирующую силу, действующую на автомобиль, если масса автомобиля равна 1300 кг.

Дано:
$v(t) = 2{,}5t + 10$
$m = 1300$ кг

F — ?

Решение.

Будем считать, что система отсчёта, в которой написано выражение для скорости автомобиля, связана с Землёй, т. е. является инерциальной.

Ось OX направлена по направлению движения автомобиля.

По условию задачи движение автомобиля является прямолинейным и равноускоренным.

Значение ускорения получим из выражения для $v(t)$: $a = 2{,}5$ м/с^2.

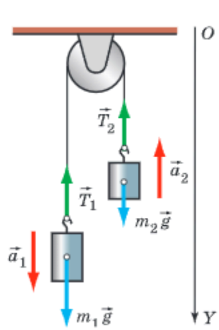
Согласно второму закону Ньютона, результирующая сила, действующая на автомобиль, прямо пропорциональна его ускорению:

$F = ma$.

$F = 1300$ кг $\cdot$ 2,5 м/с^2 = 3250 Н.

Ответ: 3250 Н.

ЗАДАЧА 3. Через неподвижный лёгкий блок перекинута невесомая нерастяжимая нить, к концам которой подвешены два груза массами 0,7 кг и 0,5 кг. Определите силу натяжения нити и ускорения грузов. Трение не учитывайте.



Дано:
$m_1 = 0{,}7$ кг
$m_2 = 0{,}5$ кг

T — ?
a_1 — ?
a_2 — ?

Решение.

На каждый из грузов действуют сила тяжести и сила упругости.

Так как $m_1 > m_2$, то левый груз будет двигаться вниз, а правый — вверх.

Запишем второй закон Ньютона для каждого груза:

$m_1\vec{g} + \vec{T}_1 = m_1\vec{a}_1;$

$m_2\vec{g} + \vec{T}_2 = m_2\vec{a}_2.$

Так как нить нерастяжима, то ускорения грузов одинаковы по модулю: $a_1 = a_2 = a$.

Так как массой нити, блока и трением можно пренебречь, то силы натяжения нити одинаковы: $T_1 = T_2 = T$.

Направим ось OY вертикально вниз и запишем проекции сил на эту ось:

$m_1g - T = m_1a;$

$m_2g - T = -m_2a.$

Вычтем второе уравнение из первого, получим

$$a = g\frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2};$$

$$a = 10 \cdot \frac{0{,}7 - 0{,}5}{0{,}7 + 0{,}5} = 1{,}7 \text{ (м/с}^2\text{)}.$$

Из первого уравнения получим:

$T = m_1(g - a);$

$T = 0{,}7 \cdot (10 - 1{,}6) = 5{,}9$ (Н).

Ответ: 5,9 Н; 1,7 м/с^2; 1,7 м/с^2.

ЗАДАЧА 4. Определите силу, с которой человек массой 80 кг, находясь на поверхности Земли, притягивается к Земле и к Луне. Необходимые данные найдите в справочнике.

Дано:	Решение.
$m = 80$ кг $M_Л = 7{,}4 \cdot 10^{22}$ кг $R_{Л-З} = 3{,}8 \cdot 10^8$ м	Человек притягивается к Земле с силой, равной силе тяжести: $F_З = mg;$ $F_З = 80 \cdot 10 = 800$ (Н).
$F_З$ — ? $F_Л$ — ?	Силу, с которой человек притягивается к Луне, можно найти по закону всемирного тяготения: $F_Л = G\frac{mM_Л}{R^2_{Л-З}};$ $F_Л = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{80 \cdot 7{,}4 \cdot 10^{22}}{\left(3{,}8 \cdot 10^8\right)^2} \approx 0{,}003$ (Н).

Ответ: 800 Н; 0,003 Н.

ЗАДАЧА 5. С какой скоростью движется международная космическая станция (МКС) по круговой орбите вокруг Земли? Высоту орбиты станции над поверхностью Земли примите равной 420 км, массу Земли — $6 \cdot 10^{24}$ кг, а её радиус — 6400 км.

Дано:	СИ	Решение.
$h = 420$ км $M_З = 6 \cdot 10^{24}$ кг $R_З = 6400$ км	420 000 м 6 400 000 м	$v = \sqrt{G\frac{M_З}{R_З + h}};$
v — ?		$v = \sqrt{6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{6 \cdot 10^{24}}{6\,400\,000 + 420\,000}} \approx 7{,}66$ (км/с).

Ответ: $v = 7{,}66$ км/с.

Задачи для самостоятельного решения

1. Шарик массой 2 кг под действием некоторой силы приобретает ускорение 0,5 м/с^2. Какое ускорение будет иметь тележка массой 8 кг, если на неё действовать такой же силой?
2. Тело массой 3 кг под действием некоторой силы за первую секунду с момента начала движения прошло путь 4 м. Определите значение силы, действовавшей на тело.
3. На тело массой 5 кг, лежащее на гладкой горизонтальной поверхности, действуют две взаимно перпендикулярные горизонтальные силы 30 Н и 40 Н. Определите направление движения тела и его ускорение.
4. На какой высоте над поверхностью Земли сила тяжести будет в 4 раза меньше, чем на Земле? Радиус Земли примите равным 6400 км.
5. Стратостат поднялся на высоту 30 км. На сколько изменилось на этой высоте ускорение свободного падения? Радиус Земли примите равным 6400 км.
6. Сравните силы, с которыми Луна притягивается Солнцем и Землёй. Если Солнце притягивает Луну сильнее, чем Земля, то почему Луна не улетает со своей орбиты? Необходимые данные найдите в Интернете.
7. Получите формулу для вычисления гравитационной постоянной, если известны масса Солнца, радиусы и периоды обращения планет Солнечной системы. Вычислите значение гравитационной постоянной и сравните его с табличным значением.
8. Определите скорость, которую необходимо сообщить искусственному спутнику Земли (ИСЗ), чтобы он двигался вокруг неё по круговой орбите на высоте 500 км. Массу Земли примите равной $6 \cdot 10^{24}$ кг, а её радиус — 6400 км.
9. Во сколько раз отличаются скорости двух искусственных спутников Земли одинаковой массы, если отношение их расстояний до центра Земли равно четырём?
10. Определите радиус орбиты геостационарного спутника Земли. Геостационарный спутник всё время находится над одной и той же точкой на экваторе.
11. К ящику массой 20 кг прикреплена пружина жёсткостью 300 Н/м. Ящик начинают равномерно и прямолинейно тянуть за пружину по горизонтальной поверхности, при этом пружина растягивается на 0,4 м. Определите коэффициент трения.
12. Тело равномерно скользит по наклонной плоскости с углом наклона 30°. Чему равен коэффициент трения?
13. В лифте на пружине жёсткостью 150 Н/м висит груз массой 0,5 кг. Определите модуль и направление ускорения лифта, если пружина растянута на 6 см.
14. Определите эффективную жёсткость трёх пружин, жёсткость каждой из которых равна 60 Н/м. Рассмотрите случаи, когда пружины соединены: 1) последовательно; 2) параллельно; 3) две пружины параллельно и одна последовательно с ними.

ЛАБОРАТОРНЫЕ И ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ § 28

Лабораторная работа № 3

Изучение равноускоренного прямолинейного движения тела под действием нескольких сил

Цель работы

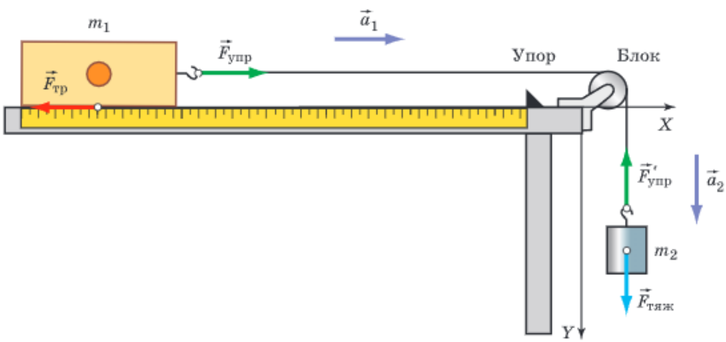
Определить ускорение равноускоренного прямолинейного движения тела с помощью второго закона Ньютона и с помощью уравнений кинематики, сравнить результаты.

Оборудование и материалы

Деревянный брусок с крючком, набор грузов, динамометр, весы с разновесами, лёгкий блок, длинная линейка, нить, секундомер.

Теоретическая справка

В работе изучается ускоренное движение бруска под действием силы натяжения нити и силы трения скольжения. На рисунке изображена экспериментальная установка, размещённая на лабораторном столе. При этом брусок скользит по доске или длинной деревянной линейке.



Запишем уравнения движения каждого из тел в проекции на соответствующие координатные оси:

на ось OX: $F_{упр} - F_{тр} = m_1a_1$;

на ось OY: $m_2g - F'_{упр} = m_2a_2$.

Так как предполагается, что нить нерастяжима, то $F_{упр} = F'_{упр}$ и $a_1 = a_2 = a$.

Из этих равенств получаем формулу для вычисления ускорения бруска:

$a = \dfrac{m_2g - F_{тр}}{m_1 + m_2}$.

Ускорение можно вычислить и другим способом, используя уравнение кинематики $s = \dfrac{a't^2}{2}$.

Отсюда $a' = \dfrac{2s}{t^2}$, где s — перемещение бруска; t — время движения бруска.

Ход работы

- С помощью весов измерьте массу m_1 бруска.
- Прикрепите динамометр к крючку бруска и, перемещая брусок равномерно вдоль доски (линейки), определите силу трения $F_{тр}$, равную силе натяжения пружины динамометра.
- Повторите измерения три раза и вычислите среднее значение силы трения $F_{тр.\ ср}$.
- Соберите экспериментальную установку согласно рисунку и опытным путём подберите перегрузы такой массы m_2, чтобы брусок массой m_1 двигался равноускоренно.
- Измерьте массу груза m_2.
- Вычислите ускорение a согласно полученной формуле.
- Придерживая брусок левой рукой, подготовьте секундомер для измерения времени t движения бруска. Отпустите брусок и одновременно включите секундомер. Одновременно с ударом бруска об упор остановите секундомер.
- Измерьте перемещение s бруска.
- Повторите опыт три раза. В каждом опыте вычислите ускорение a' и рассчитайте его среднее значение $a'_{ср}$.
- Результаты измерений и вычислений заносите в таблицу в своей тетради.

№ опыта	m_1, кг	m_2, кг	$F_{тр}$, Н	$F_{тр.\ ср}$, Н	a, м/с^2	t, с	s, м	a', м/с^2	$a'_{ср}$, м/с^2

- Сравните значения ускорений a и a'. Сделайте вывод.

Практические работы-исследования

Изучаем динамику

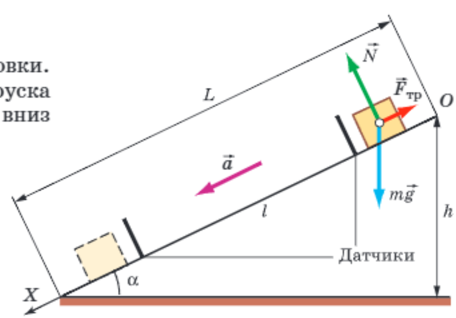
ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

В курсе физики 7 класса вы научились измерять силу трения и определять коэффициент трения скольжения при движении тела по горизонтальной поверхности. Теперь исследуем движение тела по наклонной плоскости.

Цель работы

Измерить силу трения скольжения при ускоренном движении бруска по наклонной плоскости.

Теоретическая справка



На рисунке изображена схема установки.

Запишем уравнение движения бруска в проекциях на ось OX, направленную вниз вдоль наклонной плоскости:

$$mg\sin\alpha - F_{тр} = ma,$$

где a — ускорение бруска, которое можно найти, зная время t движения бруска и расстояние l между датчиками: $a = \dfrac{2l}{t^2}$.

Тогда $F_{тр} = mg\sin\alpha - ma = mg\sin\alpha - m\frac{2l}{t^2}$.

Учитывая, что $\sin\alpha = \frac{h}{L}$, где L — длина наклонной плоскости, получим следующее выражение:

$$F_{тр} = m\left(\frac{gh}{L} - \frac{2l}{t^2}\right).$$

ПОМОЩНИК

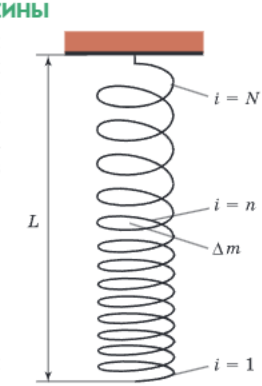
- В качестве оборудования можно использовать штатив, наклонную плоскость, брусок, электронный таймер с датчиками, электронные весы и линейку.
- Соберите установку. К штативу прикрепите наклонную плоскость. На наклонной плоскости закрепите датчики.
- С помощью весов измерьте массу m бруска.
- Изменяя угол наклона плоскости, добейтесь ускоренного движения бруска.
- Измерьте высоту h и длину L наклонной плоскости. Измерьте расстояние l между датчиками.
- Измерьте время соскальзывания бруска с наклонной плоскости. Повторите опыт 5 раз. Вычислите среднее время движения.
- Вычислите ускорение бруска и силу трения. Результаты измерений и вычислений заносите в таблицу в своей тетради.

№ опыта	m, кг	L, м	h, м	l, м	t, с	$t_{ср}$, с	a, м/с^2	$F_{тр}$, Н

- Повторите опыты с другим углом наклона плоскости.
- Сделайте выводы.

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УПРУГОСТИ МЯГКОЙ ПРУЖИНЫ

Измерение коэффициента упругости мягкой пружины осложняется тем обстоятельством, что подвешенная к лапке штатива пружина растягивается даже под действием собственного веса. Поэтому использовать в данном случае стандартный метод измерения коэффициента упругости путём подвешивания к пружине перегрузов небольшой массы не представляется возможным.



Цель работы

Измерить коэффициент упругости мягкой пружины, изготовленной из мягкой тонкой проволоки.

Теоретическая справка

Введём обозначение: k — коэффициент упругости (жёсткость) всей пружины.

Поскольку жёсткость k пружины обратно пропорциональна её длине, то жёсткость Δk отдельного витка пружины связана с величиной k соотношением $k = \frac{\Delta k}{N}$, где N — число витков пружины.

Масса одного витка пружины $\Delta m = \dfrac{M}{N}$.

На основании второго закона Ньютона запишем условие равновесия ($\vec{a} = 0$) витка пружины с номером n:

$\Delta k \cdot \Delta l_n - \Delta mgn = 0$, где Δl_n — деформация n-го витка.

Из условия равновесия находим $\Delta l_n = \dfrac{\Delta mg}{\Delta k} n = \dfrac{\Delta mg}{kN} n$.

Деформация ΔL пружины равна сумме деформаций всех её витков:

$$\Delta L = \sum_{n=1}^{N} \Delta l_n = \frac{\Delta mg}{kN} \sum_{n=1}^{N} n.$$

(Знак Σ — знак суммирования элементов от $n = 1$ до $n = N$.)

Используя формулу суммы N членов арифметической прогрессии и учитывая, что $N \gg 1$, получим:

$$\Delta L = \frac{\Delta mg}{kN} \cdot \frac{N(N+1)}{2} \approx \frac{Mg}{2k}.$$

Из последней формулы получим выражение для коэффициента упругости:

$$k = \frac{Mg}{2\Delta L}.$$

ПОМОЩНИК

- В качестве оборудования можно использовать спиральную пружину, электронные весы, металлическую линейку с ценой деления 0,5 мм, штатив с лапкой.
- С помощью весов измерьте массу M пружины.
- С помощью линейки измерьте длину L_0 пружины в недеформированном состоянии.
- Подвесьте пружину к лапке штатива и измерьте её длину L в растянутом состоянии.
- Вычислите значение деформации пружины: $\Delta L = L - L_0$.
- Результаты измерений запишите в таблицу в своей тетради.

M, г	L_0, см	L, см	ΔL, см	k, Н/м

- Сделайте вывод.

КЕЙС

ФИЗИКА НА СПОРТИВНОЙ ПЛОЩАДКЕ

Хорошо знакомые нам по предыдущим сюжетам ученики Петя и Саша продолжили своё обучение теперь уже в 9 инженерном классе. При этом любознательные школьники успешно сочетали хорошую учёбу с активными занятиями спортом. Поскольку на предыдущих уроках физики Петя и Саша познакомились с законами Ньютона, то они решили опытным путём найти соотношение своих масс, используя в качестве измерительного инструмента только рулетку. Поэтому однажды после уроков ребята отправились на своих роликовых коньках на баскетбольную площадку, чтобы провести необходимые измерения. Идея опыта, задуманного школьниками, заключалась в следующем: на ровной площадке ученики располага-

КЕЙС

ются на своих роликах напротив друг друга, удерживая соединяющую их ленту рулетки в горизонтальном положении. Затем один из них начинает равномерно наматывать ленту на барабан рулетки таким образом, чтобы сила натяжения ленты оставалась приблизительно постоянной. Поскольку сила трения качения, действующая на ролики, достаточно мала, то ученики начнут ускоренно двигаться навстречу друг другу.

Вместе с Петей и Сашей проделайте все необходимые измерения.

Этапы выполнения задания

- Введём обозначения:

m_1, m_2 — массы учеников;

s — первоначальное расстояние между школьниками;

s_1, s_2 — расстояния, на которые переместятся ученики до встречи друг с другом, причём $s = s_1 + s_2$.

- При равноускоренном движении из состояния покоя $s_1 = \frac{a_1 t_1^2}{2}$; $s_2 = \frac{a_2 t_2^2}{2}$, где a_1, a_2 — ускорения школьников.
- Пренебрегая трением качения, запишем уравнения динамики согласно второму закону Ньютона:

$$m_1 a_1 = F_1; \quad m_2 a_2 = F_2,$$

где $F_1 = F_2$ — сила натяжения ленты рулетки.
- Исходя из равенства $m_1 a_1 = m_2 a_2$ и выражая ускорения a_1 и a_2 через модули перемещений s_1 и s_2, получим:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{s_2}{s_1}.$$

- Измерим перемещения s_1 и s_2 для 5—6 различных значений первоначального расстояния s.
- Вычислим среднее значение отношения $\frac{s_2}{s_1}$.
- В качестве оценки отношения масс $\frac{m_1}{m_2}$ применим значение $\left(\frac{s_2}{s_1}\right)_{ср}$.
- Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу в своей тетради.

№ опыта	s, м	s_1, м	s_2, м	s_2/s_1	$(s_2/s_1)_{ср}$	m_1/m_2

- Проверим точность использованного метода посредством прямого измерения масс учеников. Для этих целей используем весы, входящие в комплект оборудования спортивного зала школы.
- По результатам измерений сделайте выводы.
- Можно ли предложенный метод использовать для оценки отношения масс, если проводить опыт на коньках на ледовом катке?

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Первый закон Ньютона: существуют такие системы отсчёта, относительно которых поступательно движущееся тело сохраняет свою скорость постоянной, если на него не действуют другие тела или действие других тел скомпенсировано.
- В инерциальных системах отсчёта выполняется закон инерции.
- Второй закон Ньютона: ускорение тела прямо пропорционально действующей силе, приложенной к телу, и обратно пропорционально его массе.
- Третий закон Ньютона: силы, с которыми два тела действуют друг на друга, равны по модулю и противоположны по направлению.
- Закон всемирного тяготения: два тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной массе каждого из них и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.
- Первая космическая скорость — минимальная скорость, которую необходимо сообщить телу у поверхности Земли, чтобы оно стало искусственным спутником.
- Фундаментальное свойство всех тел притягиваться друг к другу называется всемирным тяготением или гравитацией. Благодаря гравитации отдельные космические тела организуются в системы.
- Сила упругости — это сила, возникающая в любом сечении упруго деформированного тела, стремящаяся вернуть его в первоначальное недеформированное состояние. Закон Гука: для упругих деформаций модуль силы упругости при растяжении (или сжатии) тела прямо пропорционален изменению его длины.
- Сила, с которой тело в результате его притяжения Землёй растягивает подвес или действует на опору, называется весом тела.
- Сила, возникающая между поверхностями соприкасающихся тел и препятствующая их относительному перемещению, называется силой трения.
- Равнодействующая сил равна векторной сумме сил, действующих на тело.

Вопросы для обсуждения

? Как известно, силы, с которыми тела действуют друг на друга, равны по модулю и направлены противоположно. Можно ли утверждать, что равнодействующая этих сил равна нулю?

? Влияет ли на происходящие дорожно-транспортные происшествия сила притяжения, действующая согласно закону всемирного тяготения между автомобилями? Ответ обоснуйте.

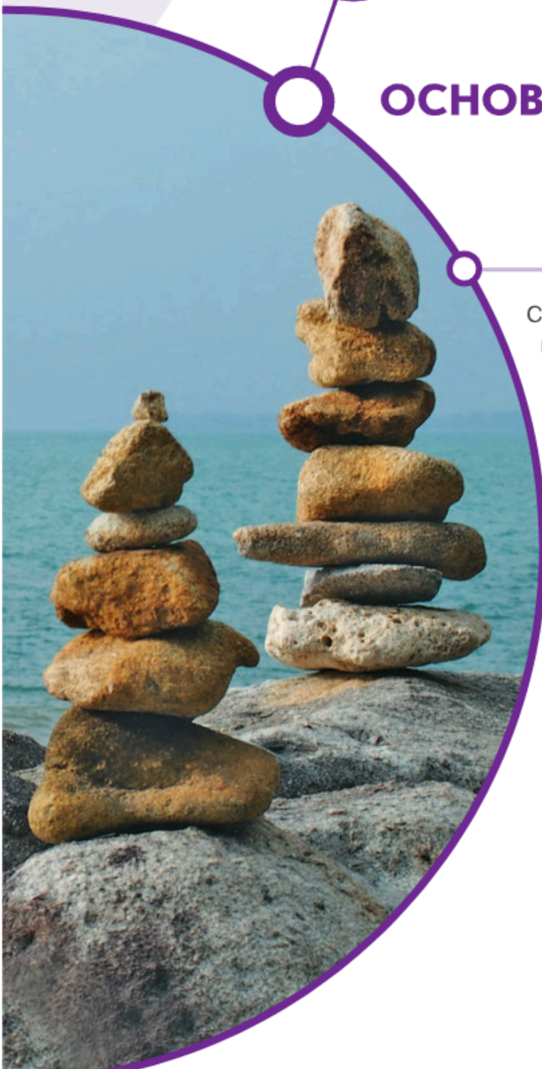
? Можно ли утверждать, что человек притягивает Землю с такой же силой, с которой Земля притягивает человека? Ответ обоснуйте

Темы исследовательских и проектных работ

- Инерциальные системы отсчёта в природе.
- Законы Ньютона и спорт.
- Почему все планеты вращаются.
- История открытия закона всемирного тяготения.
- Везде ли справедлив закон всемирного тяготения.
- Космическая гонка.
- Искусственные спутники Земли.
- Сила тяжести на других планетах.
- Закон всемирного тяготения и природные процессы.

Глава 3

ОСНОВЫ СТАТИКИ



Соизмеримые величины уравновешиваются, если длины, на которых они подвешены, находятся в обратном отношении к тяжестям.

Архимед

§ 29 РАВНОВЕСИЕ ТВЁРДОГО ТЕЛА

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое абсолютно твёрдое тело.
- Как формулируются условия равновесия невращающегося тела.
- Как можно записать условие равновесия тела с закреплённой осью вращения.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое материальная точка?
- Что такое поступательное движение?
- Как формулируется второй закон Ньютона?
- Что такое плечо силы?

Раздел механики, в котором изучаются условия равновесия тел, называется **статикой**. В основе статики лежат законы механики Ньютона.

РАВНОВЕСИЕ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ. На практике часто важно знать, при каких условиях тело, на которое действуют те или иные силы, находится в **состоянии равновесия**, т. е. не движется с ускорением. Одним из вариантов состояния равновесия является состояние покоя. В общем случае тело (или материальная точка) находится в равновесии, если оно (она) сохраняет состояние покоя или движется равномерно и прямолинейно.

Условия равновесия тел необходимо учитывать при постройке различных инженерных сооружений: зданий, мостов, опор, при конструировании и изготовлении машин и механизмов.

ПОНЯТИЕ АБСОЛЮТНО ТВЁРДОГО ТЕЛА. Выяснение условий равновесия реальных тел является довольно сложной задачей, поскольку все реальные тела под действием приложенных к ним сил изменяют свои размеры и форму, т. е. деформируются.

Деформации оказывают существенное влияние на равновесие тел прежде всего потому, что в результате деформаций происходит смещение точек приложения сил, действующих на тело. Деформации могут быть как значительными, например растяжение пружины, так и малыми, которые без специальных средств наблюдения обнаружить невозможно.

Во многих случаях малыми деформациями можно пренебречь и рассматривать тело как недеформируемое. Такое тело называется **абсолютно твёрдым.** Его форма и размеры остаются неизменными при любых внешних воздействиях. В действительности недеформируемых тел не существует, поэтому **абсолютно твёрдое тело — это физическая модель**. Таким образом, в тех случаях, когда деформации малы, при описании равновесия реальных тел можно использовать модель абсолютно твёрдого или просто твёрдого тела.

Понятие твёрдого тела появилось в механике достаточно давно. Однако с тех пор смысл этого понятия углублялся и расширялся, что привело к формированию целого направления в физике — *физики твёрдого тела*. Строение кристаллов и аморфных тел, создание новых композитных материалов и высокотемпературная сверхпроводимость, разработка транзисторов нового поколения и лазеров на твёрдом теле и т. п. — вот далеко не полный перечень предметов физики твёрдого тела.

РАВНОВЕСИЕ НЕВРАЩАЮЩИХСЯ ТЕЛ. Если тело движется поступательно, то при описании его движения тело можно рассматривать как материальную точку. Согласно второму закону Ньютона, ускорение материальной точки равно нулю, если геометрическая сумма всех действующих на точку сил равна нулю.

Аналогично формулируется условие равновесия невращающегося тела.

ВАЖНО

Условие равновесия невращающегося тела. Невращающееся тело находится в равновесии, если векторная сумма сил, действующих на тело, равна нулю:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \ldots = 0.$$

Это выражение называется **первым условием равновесия** твёрдого тела.

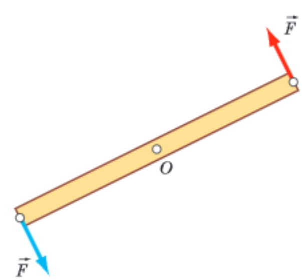
При решении физических задач на равновесие твёрдых тел интересуются, как правило, их равновесием относительно определённой оси. Поэтому можно сформулировать эквивалентное **условие равновесия тела:** **невращающееся тело находится в равновесии, если сумма проекций приложенных к нему сил на произвольную ось равна нулю**.

Например, можно записать первое условие равновесия в виде проекций сил на ось OX:

$$F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} + \ldots = 0.$$

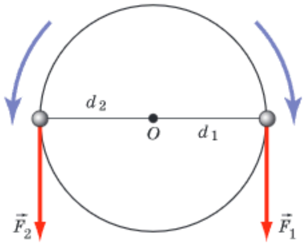
Находящееся в равновесии тело или покоится, или движется равномерно и прямолинейно. Такое движение характерно, например, для парашютиста, опускающегося с постоянной скоростью с большой высоты.

РАВНОВЕСИЕ ТЕЛ С ЗАКРЕПЛЁННОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ. Сформулированное выше условие равновесия тела не является достаточным. Например, если к концам лежащей на столе линейки приложить равные, но противоположно направленные силы $\vec{F}$ и $-\vec{F}$, то их векторная сумма будет равна нулю, однако линейка начнёт поворачиваться.



Рассмотрим следующий случай (см. рисунок вверху с. 128). Пусть на тело действуют силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, причём тело не может перемещаться поступательно. Например, это может быть фигура, вырезанная из плотного картона, прикреплённая булавкой к поверхности стола в точке O.

Как видно из рисунка, сила $\vec{F}_1$ оказывает на тело вращающее воздействие по часовой стрелке, тогда как сила $\vec{F}_2$ оказывает вращающее воздействие против часовой стрелки.



Если фигура симметрична относительно точки закрепления и модули этих сил одинаковы (см. рисунок), то вращающее воздействие сил на тело взаимно скомпенсировано и тело остаётся неподвижным.

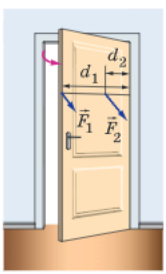
Если модули сил неодинаковы, но вращающее воздействие на тело скомпенсировано, то можно поставить вопрос: какая физическая характеристика сил ответственна за их вращающее воздействие?

Опыт показывает, что для обеспечения равновесия тéла должны быть одинаковы произведения модуля силы на расстояние от оси вращения до линии действия силы. Это расстояние называется **плечом силы**, оно равно длине перпендикуляра, опущенного из центра вращения на направление действия силы.

На рисунках отрезок d_1 — плечо силы $\vec{F}_1$, отрезок d_2 — плечо силы $\vec{F}_2$. Используя понятие плеча силы, её вращающее воздействие можно охарактеризовать как произведение модуля силы на её плечо.

Величина, равная произведению модуля силы на её плечо, называется **вращательным моментом** или **моментом силы** относительно оси вращения:

$$M = Fd. \qquad (1)$$



Из определения момента силы следует, что один и тот же момент силы может быть создан малой силой, но с большим плечом или большой силой, но с малым плечом. По этой причине тяжёлую дверь можно открыть сравнительно лёгким нажатием, если силу прикладывать как можно ближе к её краю, противоположному креплению. Именно поэтому дверные ручки обычно крепят у края двери.

В СИ за единицу вращательного момента принимают момент силы, равный 1 Н, линия действия которого отстоит от оси вращения на расстояние 1 м. Эта единица — *ньютон-метр* (Н · м).

Принято моментам сил, вращающих тело по часовой стрелке, приписывать *положительный* знак, а вращающих против часовой стрелки — *отрицательный*. Тогда моменты сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ относительно оси O имеют противоположные знаки и их алгебраическая сумма равна нулю.

Условие равновесия тела с закреплённой осью можно записать в виде

$$F_1d_1 - F_2d_2 = 0, \quad \text{или} \quad M_1 + M_2 = 0. \qquad (2)$$

Равенство (2) позволяет сформулировать *правило моментов*, которое является условием равновесия тела с закреплённой осью вращения.

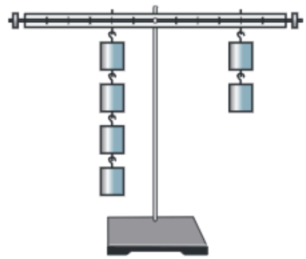
ВАЖНО

Второе условие равновесия твёрдого тела с закреплённой осью вращения. При равновесии твёрдого тела, способного вращаться вокруг закреплённой оси, алгебраическая сумма моментов действующих на него сил относительно этой оси равна нулю:

$$M_1 + M_2 + M_3 + ... = 0.$$

Это выражение называется также **правилом моментов**.

Равновесие *рычага* основано на правиле моментов сил, приложенных к его плечам. **Рычаг находится в равновесии, если момент силы, вращающей его по часовой стрелке, равен моменту силы, вращающей его против часовой стрелки.**



Проверьте правило равновесия рычага

ПОМОЩНИК. Закрепите на столе кусок пластилина. На пластилин положите цилиндрическое тело (например, клей-карандаш). На округлую сторону цилиндрического тела установите линейку так, чтобы она могла свободно раскачиваться. Подберите такое положение линейки, чтобы она находилась в равновесии.

На одну из сторон линейки положите монетку 5 р. на расстоянии 10 см от центра. Опытным путём определите, на каком расстоянии от центра нужно расположить монетку 10 р., чтобы линейка вернулась в состояние равновесия.

ВЫВОДЫ

- Раздел механики, в котором изучаются условия равновесия тел, называется статикой.
- Абсолютно твёрдое тело — физическая модель. Его форма и размеры остаются неизменными при любых внешних воздействиях.
- Первое условие равновесия: невращающееся тело находится в равновесии, если векторная сумма сил, действующих на тело, равна нулю.
- Второе условие равновесия: для равновесия твёрдого тела, способного вращаться вокруг закреплённой оси, алгебраическая сумма моментов действующих на него сил относительно этой оси должна быть равна нулю.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Равновесие материальной точки; абсолютно твёрдое тело; условия равновесия

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Какое тело называется абсолютно твёрдым?
2. В чём заключается условие равновесия тела, движущегося поступательно?
3. Обязательно ли тело, находящееся в равновесии, покоится?
4. Известно, что векторная сумма сил, приложенных к телу, равна нулю. Чему равна при этом алгебраическая сумма проекций этих сил на некоторое направление?
5. Почему первого условия равновесия недостаточно для равновесия тела?
6. В чём заключается условие равновесия тела, которое может вращаться вокруг закреплённой оси?

§ 30 ЦЕНТР ТЯЖЕСТИ. ВИДЫ РАВНОВЕСИЯ

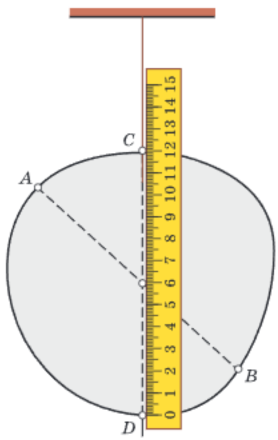
НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое центр тяжести.
- Какие существуют виды равновесия.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

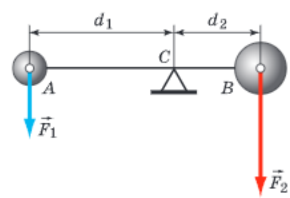
- Что такое равновесие тела?
- Как формулируются условия равновесия?

В курсе физики 7 класса мы ввели понятие центра тяжести. Остановимся на нём более подробно.



ЦЕНТР ТЯЖЕСТИ ТЕЛА. Равнодействующая всех параллельно направленных сил тяжести, действующих на отдельные элементы тела, является силой тяжести тела. При этом **центром тяжести** тела называется точка приложения этой силы независимо от положения тела в пространстве. Положение центра тяжести произвольной плоской фигуры можно определить экспериментально. Для этого нужно подвесить фигуру за любую точку и провести через линию подвеса вертикаль, а затем подвесить фигуру за другую точку и также провести вертикаль. Точка пересечения линий даст искомое положение центра тяжести фигуры.

Рассмотрим, как найти центр тяжести тела, состоящего, например, из двух шаров разной массы, соединённых невесомым стержнем. Если диаметры шаров малы по сравнению с длиной стрежня, тогда шары можно считать материальными точками. Пусть на шары A и B действуют силы тяжести $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$. Рассматриваемая система будет находиться в равновесии, если точка опоры C совпадает с центром тяжести.



В этом случае векторная сумма силы тяжести и силы реакции опоры равна нулю (первое условие равновесия). Согласно второму условию равновесия для тела, способного вращаться вокруг закреплённой оси, алгебраическая сумма моментов действующих на него сил относительно этой оси равна нулю. Можно записать:

$$M_2 + M_1 = 0, \quad \text{или} \quad F_1d_1 - F_2d_2 = 0,$$

где d_1 и d_2 — плечи сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$.

Тогда

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{d_2}{d_1}.$$

Таким образом, центр тяжести делит расстояние между двумя шарами на отрезки, обратно пропорциональные модулям сил F_1 и F_2.

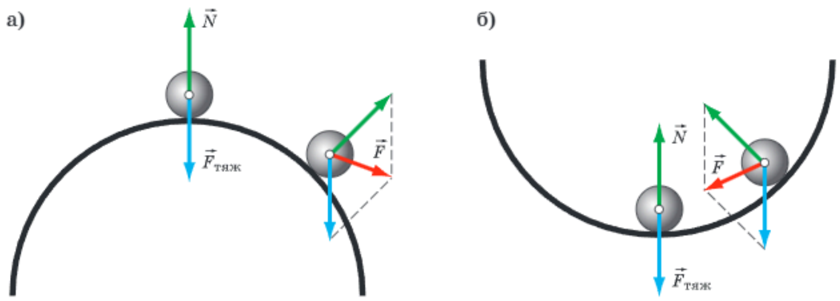
Определение центра тяжести является важной инженерной задачей. От положения центра тяжести зависит устойчивость тела, т. е. его возможность сохранять состояние равновесия при внешнем воздействии. Этот факт необходимо учитывать при проектировании мостов, плотин, зданий и других сооружений.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

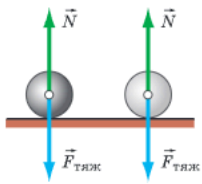
Пизанская башня — одно из наиболее известных архитектурных сооружений Европы. Высота башни составляет примерно 56 м, а диаметр основания — 15,5 м. В результате ошибок, сделанных при проектировании, и неустойчивого фундамента башня начала наклоняться уже во время строительства. К 1990 г. угол наклона башни достиг 5,5°. После ремонтных работ угол наклона уменьшился и в настоящее время составляет 3,97°. Пизанская башня находится в устойчивом положении, так как её центр тяжести находится на вертикали, проходящей через основание башни. Но тем не менее инженеры и конструкторы постоянно следят за изменениями угла наклона и прилагают усилия, чтобы башня продолжала находиться в равновесии.

УСТОЙЧИВОСТЬ РАВНОВЕСИЯ ТЕЛА. Тело находится в равновесии, если векторная сумма приложенных к нему сил равна нулю и алгебраическая сумма моментов этих сил относительно оси вращения также равна нулю. Но является ли равновесие тела устойчивым и чем определяется устойчивость равновесия?

Рассмотрим равновесие шарика в двух случаях:
а — шарик находится на вершине выпуклой подставки;
б — шарик находится в низшей точке вогнутой подставки.



В первом случае при малейшем отклонении шарика от первоначального положения равнодействующая $\vec{F}$ сил тяжести $\vec{F}_{тяж}$ и реакции опоры $\vec{N}$ будет удалять его от положения равновесия. Следовательно, такое равновесие тела является **неустойчивым.**



В случае вогнутой поверхности при отклонении шарика от положения равновесия равнодействующая $\vec{F}$ сил тяжести $\vec{F}_{тяж}$ и реакции опоры $\vec{N}$ будет возвращать его в первоначальное положение. Равновесие шарика в этом случае является **устойчивым.**

Существует также **безразличное** равновесие. Например, шарик, лежащий на горизонтальной поверхности, находится в состоянии безразличного равновесия. Если его переместить по поверхности в какую-либо сторону, он всё так же останется в равновесии.

Таким образом, **устойчивость равновесия тела зависит от того, возникает или нет сила, возвращающая тело в исходное равновесное положение.**

Возможность сохранять состояние равновесия при внешнем воздействии зависит от площади опоры тела: чем больше площадь опоры, тем устойчивее тело. Если тело наклонить, то оно может либо вернуться в исходное положение, либо опрокинуться. Сохранение состояния равновесия зависит также от положения центра тяжести. Чем ниже центр тяжести, тем тело более устойчиво, и наоборот, чем выше центр тяжести, тем тело менее устойчиво и может опрокинуться или перевернуться, если его толкнуть. Например, гоночные автомобили проектируются таким образом, чтобы их центр тяжести находился как можно ближе к земле. Такая конструкция является устойчивой при движении и позволяет проходить крутые повороты на больших скоростях.
Для большей устойчивости багажное отделение в современных больших автобусах делают в нижней части, а не в верхней и не сзади.

ВЫВОДЫ

- Центром тяжести называется точка, к которой приложена равнодействующая всех параллельно направленных сил тяжести, действующих на отдельные элементы тела, независимо от положения тела в пространстве.
- Устойчивость равновесия тела зависит от того, возникает или нет сила, возвращающая тело в исходное равновесное положение.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Центр тяжести; устойчивость равновесия

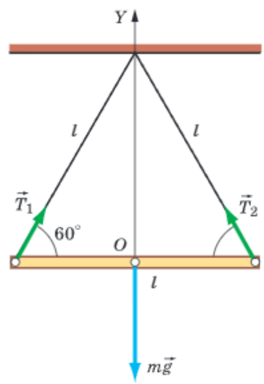
ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Как определить центр тяжести твёрдого тела?
2. Чем определяется устойчивость равновесия тела?
3. Определите длину части однородного стержня, которую нужно отрезать, чтобы положение его центра тяжести сместилось на Δl.
4. Как правило, доска плавает в воде плашмя, т. е. широкой гранью. Возможно также плавание доски на ребре, в вертикальной плоскости. Чем различаются эти два равновесных положения доски?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ § 31

ЗАДАЧА 1. Однородный стержень массой 2 кг и длиной 1 м подвешен на двух нитях длиной 1 м каждая. Нити прикреплены к концам стержня и закреплены в одной точке на потолке. Чему равна сила натяжения каждой нити?

Дано:	Решение.
$l = 1$ м $m = 2$ кг	По условию задачи стержень и закреплённые в одной точке нити образуют равносторонний треугольник.
T — ?	Согласно симметрии также ясно, что силы натяжения левой и правой нитей одинаковы: $T_1 = T_2 = T$.



Поскольку стержень однородный, то равнодействующая всех сил тяжести, действующих на отдельные элементы стержня, приложена в его геометрическом центре (точка O).

Запишем условие равновесия стержня в проекции на вертикальную ось OY:

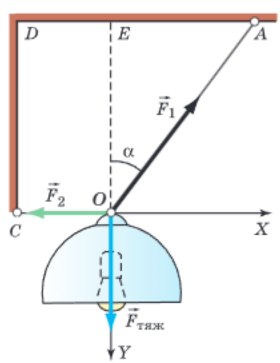
$$2T\sin 60^\circ - mg = 0.$$

Отсюда получаем $T = \dfrac{mg}{2\sin 60^\circ}$; $T = \dfrac{2 \cdot 10}{\sqrt{3}} \approx 11{,}5$ (Н).

Ответ: 11,5 Н.

ЗАДАЧА 2. Электрическая лампа массой 400 г подвешена на шнуре AB длиной 2 м и отведена в сторону посредством горизонтального шнура BC длиной 0,8 м (см. рисунок). Определите значение сил, действующих со стороны шнуров на лампу, если расстояние DA равно 2 м.

Дано:	Решение.
$m = 400$ г $AB = 2$ м $BC = 0{,}8$ м $DA = 2$ м	Свяжем систему отсчёта с Землёй (инерциальная система отсчёта). Направим ось OX горизонтально, а ось OY вертикально так, как показано на рисунке.
F_1 — ? F_2 — ?	На лампу, подвешенную на двух шнурах, действуют следующие силы: $\vec{F}_{тяж}$ — сила тяжести, $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ — силы упругости, действующие со стороны шнуров.



Запишем второй закон Ньютона:

$$\vec{F}_{тяж} + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = m\vec{a}.$$

Так как в выбранной системе отсчёта лампа покоится, т. е. её ускорение $\vec{a} = 0$, то $\vec{F}_{тяж} + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0$.

Запишем проекции сил на оси OX и OY:
$F_{тяж.x} = 0$; $F_{тяж y} = mg$;
$F_{1x} = F_1 \sin\alpha$; $F_{1y} = -F_1 \cos\alpha$;
$F_{2x} = -F_2$; $F_{2y} = 0$.
В проекциях на оси OX и OY получим систему уравнений:

$$\begin{cases} F_1 \sin\alpha - F_2 = 0, \\ mg - F_1 \cos\alpha = 0. \end{cases}$$

Из второго уравнения системы выразим $F_1 = \dfrac{mg}{\cos\alpha}$ и подставим в первое уравнение: $F_2 = \dfrac{mg}{\cos\alpha} \cdot \sin\alpha$.

Из определения синуса и косинуса

$$\sin\alpha = \frac{EA}{AB} = \frac{DA - BC}{AB} \quad и \quad \cos\alpha = \frac{EB}{AB} = \frac{\sqrt{AB^2 - (DA - BC)^2}}{AB}$$

получим:

$$\sin\alpha = \frac{2 - 0{,}8}{2} = 0{,}6; \qquad \cos\alpha = \frac{\sqrt{2^2 - (2 - 0{,}8)^2}}{2} = 0{,}8;$$

$$F_1 = \frac{0{,}4 \cdot 10}{0{,}8} = 5\ (\text{Н}); \qquad F_2 = \frac{0{,}4 \cdot 10}{0{,}8} \cdot 0{,}6 = 3\ (\text{Н}).$$

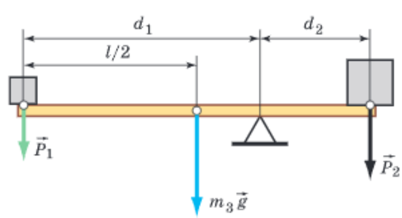
Ответ: 5 Н; 3 Н.

ЗАДАЧА 3. На концы доски длиной 5 м и массой 2 кг положили два груза массами 10 кг и 12 кг. На каком расстоянии от левого конца доски необходимо поставить опору, чтобы система находилась в равновесии?

Дано:
$l = 5$ м
$m_1 = 10$ кг
$m_2 = 12$ кг
$m_3 = 2$ кг

d_1 — ?

Решение.



Система будет находиться в равновесии, если точка опоры совпадает с центром тяжести.

На левый конец доски действует вес первого груза $\vec{P}_1 = m_1\vec{g}$.
На правый конец доски — вес второго груза $\vec{P}_2 = m_2\vec{g}$.
Сила тяжести $m_3\vec{g}$ самой доски приложена к центру доски.
Каждая из этих сил создаёт момент силы относительно точки опоры:
$M_1 = -m_1gd_1$; $M_2 = m_2gd_2$; $M_3 = -m_3g(d_1 - l/2)$.
Запишем второе условие равновесия:
$-m_1gd_1 + m_2gd_2 - m_3g(d_1 - l/2) = 0$.
Учитывая, что $d_2 = l - d_1$, получим:
$-m_1d_1 + m_2(l - d_1) - m_3(d_1 - l/2) = 0$,
откуда $d_1 = \dfrac{m_2l + m_3l/2}{m_1 + m_2 + m_3}$; $d_1 = \dfrac{12 \cdot 5 + 2 \cdot 5/2}{10 + 12 + 2} = 2{,}7$ (м).

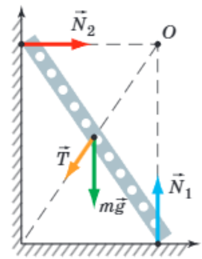
Ответ: 2,7 м.

ЗАДАЧА 4. Лестница, центр тяжести которой находится посередине, опирается своими концами на абсолютно гладкие пол и стену. К середине лестницы одним концом привязана верёвка, которая другим концом закреплена в углу комнаты. Можно ли путём изменения силы натяжения верёвки добиться устойчивого положения лестницы?

Решение.

Если тело находится в равновесии, то условие равенства нулю алгебраической суммы моментов сил, действующих на тело, должно выполняться относительно любой оси.

Линии действия сил реакции опоры $\vec{N}_1$ и $\vec{N}_2$, а также силы натяжения верёвки $\vec{T}$ пересекаются в точке O. Поэтому момент каждой из этих сил относительно точки O равен нулю. Однако момент силы тяжести относительно той же точки не равен нулю. Поэтому равновесие лестницы невозможно ни при каком натяжении верёвки.



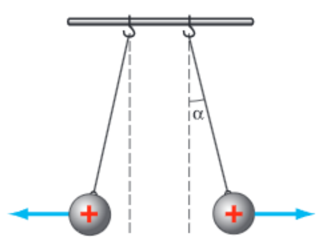
Ответ: нельзя.

Задачи для самостоятельного решения

1. Фонарь массой 5 кг подвешен за середину троса, растянутого между столбами, стоящими на противоположных сторонах улицы. Определите силы натяжения в тросе, если угол между частями троса составляет 120°.

2. Лодку равномерно тянут к берегу при помощи двух горизонтальных канатов. Определите угол между канатами, если к канатам приложены силы по 130 Н каждая. Сила сопротивления воды равна 180 Н.

3. С какой силой взаимодействуют два небольших одинаково заряженных шарика массами 50 г, подвешенных на нитях? Считайте, что нити являются невесомыми, непроводящими и нерастяжимыми. Угол α между нитью и вертикалью составляет 6° (см. рисунок).



4. Определите минимальную силу, которую нужно приложить к одному из концов доски, лежащей на полу, чтобы её приподнять. Масса доски 50 кг.

5. Доска массой 10 кг и длиной 5 м своими концами опирается на две опоры. На расстоянии 3 м от левого края к доске подвешен груз массой 8 кг. Определите силы давления доски на каждую из опор.

§ 32 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ

Практическая работа-исследование

Изучаем статику

ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ ГРИФЕЛЯ КАРАНДАША О БУМАГУ

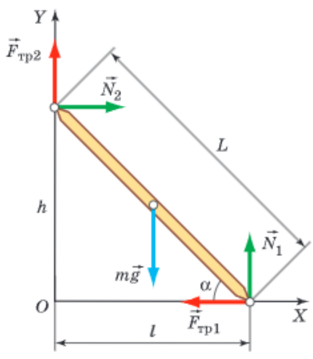
Вы уже научились измерять коэффициент трения в простейших ситуациях, например, используя динамометр и перемещая брусок по горизонтальной поверхности или при движении тела по наклонной плоскости. Предлагаем вам применить ваши теоретические знания для решения практической задачи.

Цель работы

Оценить коэффициент трения скольжения грифеля карандаша о бумагу.

Теоретическая справка

Рассмотрим карандаш, опирающийся на перпендикулярные плоскости и находящийся в равновесии.



Обозначим: L — длина карандаша, h и l — расстояния между точкой O (вершиной угла между плоскостями) и точками соприкосновения карандаша с плоскостями.

Запишем условия равновесия карандаша в проекциях на оси OX и OY:

на ось OX: $N_2 - F_{тр1} = 0$;

на ось OY: $N_1 + F_{тр2} - mg = 0$.

Силы трения: $F_{тр1} = \mu N_1$; $F_{тр2} = \mu N_2$.

Из первого уравнения выразим силу реакции:

$N_2 = F_{тр1} = \mu N_1$;

$F_{тр2} = \mu N_2 = \mu^2 N_1$.

Подставим $F_{тр2}$ во второе уравнение:

$N_1 + \mu^2 N_1 = mg$.

Тогда $N_1 = \dfrac{mg}{1 + \mu^2}$; $N_2 = \dfrac{\mu mg}{1 + \mu^2}$.

Запишем условия равенства моментов сил относительно начала координат (точка O):

$$mg\frac{l}{2} + N_2 h - N_1 l = 0.$$

Подставим в это уравнение выражения для N_1 и N_2:

$$mg\frac{l}{2} + \frac{\mu mg}{1 + \mu^2}h - \frac{mg}{1 + \mu^2}l = 0.$$

Решим его:

$l(1 + \mu^2) + 2\mu h - 2l = 0$;

$l\mu^2 + 2\mu h - l = 0$;

$$\mu = \frac{-h + \sqrt{h^2 + l^2}}{l} = \frac{-h + L}{l}.$$

ПОМОЩНИК

- Вам потребуются два карандаша (мягкий и твёрдый), заточенных с двух сторон, два листа бумаги А4, книга, линейка, канцелярские скрепки.
- Измерьте длину L мягкого карандаша.
- Поставьте книгу вертикально, чтобы создать двугранный угол. В этот угол вставьте согнутый пополам лист бумаги и закрепите его с помощью скрепок.
- Поставьте карандаш наклонно в такое положение, при котором он находится на грани соскальзывания.
- Измерьте длины h и l соответствующих катетов прямоугольного треугольника, образованного карандашом и сложенным листом бумаги.
- Повторите опыт 6 раз при разных положениях карандаша. Результаты заносите в таблицу в своей тетради.

№ опыта	Мягкий карандаш, L = ______ см					Твёрдый карандаш, L = ______ см				
	h, см	$h_{ср}$, см	l, см	$l_{ср}$, см	$\mu_м$	h, см	$h_{ср}$, см	l, см	$l_{ср}$, см	$\mu_т$

- Вычислите средние значения $h_{ср}$ и $l_{ср}$.
- Вычислите коэффициент трения скольжения $\mu_м$ для мягкого карандаша.
- Повторите опыт, используя твёрдый карандаш. Оцените коэффициент трения скольжения $\mu_т$ для твёрдого карандаша.
- Сделайте выводы.

КЕЙС

ФИЗИКА НА КУХНЕ: ВОКРУГ КУРИНОГО ЯЙЦА

Для расширения кругозора учитель на уроке физики рассказал ребятам о важной роли правильного учёта законов равновесия тел при проектировании сложных инженерных сооружений. При этом ещё древние зодчие хорошо понимали, что прочностные свойства многих материалов на сжатие значительно выше, чем, например, на изгиб или растяжение. Поэтому при строительстве мостов, акведуков, зданий и т. п. часто использовались арочные конструкции, принцип действия которых основан на трансформации вертикальных нагрузок в боковые сжатия арочной фермы, передаваемых на опору (пяту) арки.

Многие инженерные решения человеку подсказала сама природа: прочность пера птицы, трубчатых костей животных, строение стебля бамбука и т. п. Наглядным примером прочности куполообразных сооружений является обычное куриное яйцо. Сырое куриное яйцо нетрудно раздавить, если сжать его пальцами руки с боков, но гораздо труднее сделать это при сжатии яйца с торцов.

В этой связи учитель поручил заинтересованным ученикам класса продумать и изготовить экспериментальную установку для изучения прочностных свойств яичной скорлупы.

Постарайтесь и вы в рамках упрощённой физической модели разобраться в особенностях распределения механических напряжений в скорлупе куриного яйца.

КЕЙС

Научная справка

Механическим напряжением σ называется величина, равная отношению модуля силы упругости $F_{упр}$ к площади S поперечного сечения тела:

$$\sigma = \frac{F_{упр}}{S} = \frac{F}{S},$$

где F — модуль внешней деформирующей силы, уравновешиваемой силой упругости.

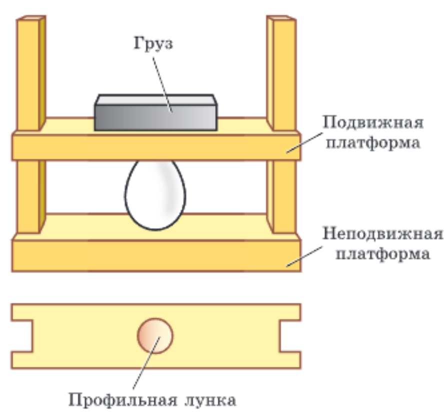
В СИ за единицу механического напряжения принимается *паскаль* (Па): 1 Па = 1 Н/м².

Наибольшее механическое напряжение σ_{max}, которое образец выдерживает без разрушения, называется **пределом прочности**. Пределы прочности твёрдых тел существенно зависят от того, являются ли эти тела хрупкими или нет. Например, тела, изготовленные из стекла, фарфора, мрамора и т. п., являются хрупкими и разрушаются при небольших деформациях. Среди металлов повышенной хрупкостью обладает чугун. Другие металлы, в частности сталь, медь, свинец и др., не являются хрупкими. Как правило, предел прочности хрупких тел заметно меньше.

ПОМОЩНИК

- В качестве оборудования вам потребуются:
  линейка, микрометр, транспортир, набор грузов известной массы, зажим, позволяющий регулировать силу сжатия с помощью винта, сырые куриные яйца.
  Примечание: следует иметь в виду, что жидкое содержимое заполняет не весь объём яйца, в нём имеется воздушная полость, позволяющая дышать развивающемуся зародышу. В опытах должны использоваться яйца без трещин и сколов на поверхности скорлупы.

- Установка состоит из двух деревянных платформ, одна из которых является подвижной и может свободно скользить по двум вертикальным направляющим, соединённым с неподвижной платформой. В платформах имеются специальные профильные лунки, которые обеспечивают устойчивое вертикальное положение яйца, помещаемого между платформами. При этом распределение нагрузки на скорлупу осуществляется по линии контакта скорлупы с краями лунки, т. е. по окружности известного диаметра.



- Как показывает опыт, куриное яйцо является наиболее прочным с его острого конца. Это хорошо известно любителям «сражаться на варёных яйцах». Обычно выигрывает тот, кто ударяет острым концом яйца по тупому концу яйца, которое держит товарищ. Как уже отмечалось выше, яйцо является наименее прочным при его сдавливании с боков. Этот опытный факт подтверждают и простые количественные оценки распределения механических напряжений, возникающих в скорлупе яйца.

Внешняя сила $\vec{F}$, действующая на острый конец яйца и распределённая по линии контакта профильной лунки с поверхностью скорлупы, может быть представлена как векторная сумма равных по модулю сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}'_1$, направленных по касательным к элементам поверхности яйца. Как видно из рисунка, модуль этих сил зависит от угла α_1 между касательными:

$$F = 2F_1\cos\frac{\alpha_1}{2}; \quad F'_1 = F_1.$$

Если ту же самую силу $\vec{F}$ приложить к яйцу сбоку, то угол α_2 между касательными будет больше угла α_1:

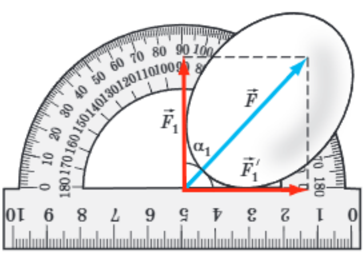
$$F = 2F_2\cos\frac{\alpha_2}{2}; \quad F'_2 = F_2.$$

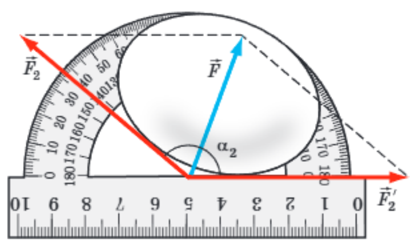
Из записанных выше равенств следует соотношение между силами F_1 и F_2:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{\cos\frac{\alpha_1}{2}}{\cos\frac{\alpha_2}{2}}; \quad \alpha_1 < \alpha_2.$$

Таким образом, $F_2 > F_1$, что объясняет описанный выше опытный факт уменьшения прочностных свойств яйца при его сжатии с боков.

Дополнительным аргументом, подтверждающим этот вывод, является то обстоятельство, что при сдавливании яйца с острого конца его скорлупа испытывает в основном деформации сжатия, в то время как при сдавливании с боков начинают преобладать деформации растяжения.





Интересно также рассмотреть возможность увеличения прочностных свойств яичной скорлупы опытным путём. Идея опыта заключается в следующем: если яйцо подвергнуть сжатию с боков, то в скорлупе возникнут механические напряжения, что в итоге приведёт к увеличению прочности яйца при его сжатии с торцов. Для этих целей необходимо использовать боковые профильные лунки, а сжатие яйца осуществлять с помощью винтового зажима. Такое «напряжённое» яйцо устанавливается между подвижной и неподвижной платформами и подвергается сжатию с торцов посредством нагрузки, помещаемой на подвижную платформу.

КЕЙС

Этапы выполнения задания

- Поместите яйцо в вертикальном положении между платформами.
- Постепенно увеличивая нагрузку на подвижную платформу, с помощью фото- или замедленной видеосъёмки зафиксируйте момент начала процесса разрушения яйца и характер распределения механических напряжений в скорлупе (направления и локализация трещин).
- Определите минимальный вес P груза, при котором происходит разрушение яйца.
- С помощью линейки измерьте диаметр D профильной лунки. С помощью микрометра измерьте толщину d скорлупы.
- По формуле $S = \pi d D$ вычислите площадь поперечного сечения скорлупы.
- Вычислите предел прочности скорлупы по формуле $\sigma_{max} = \frac{P}{\pi d D}$.
- Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу в своей тетради.

№ опыта	P, Н	D, см	d, мм	σ_{max}, МПа

- Проделайте аналогичные измерения для яйца, подвергнутого сжатию с боков.
- Объясните полученные результаты и сделайте выводы.
- Используя справочники физических величин, сравните значение предела прочности яичной скорлупы с аналогичными значениями для ряда других материалов (стекло, фарфор, чугун, сталь и т. п.).

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

Сформулируйте сами основные итоги главы 3.

Вопросы для обсуждения

? Персонажи басни И. А. Крылова «Лебедь, Щука и Рак» тянут воз с одинаковыми силами. Как они должны тянуть, чтобы воз не мог сдвинуться с места даже при отсутствии сил трения между возом и землёй?

? По лестнице, опирающейся на гладкую стену, поднимается человек. Почему лестница начинает скользить только тогда, когда человек поднимется на определённую высоту?

Темы исследовательских и проектных работ

- Равновесие в природе.
- Равновесие в спорте.
- Равновесие в архитектуре.

Глава 4

МЕХАНИКА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Человек полетит, опираясь не на силу своих мускулов, а на силу своего разума.

Н. Е. Жуковский

§ 33 ДАВЛЕНИЕ ЖИДКОСТИ

НОВОЕ В УРОКЕ

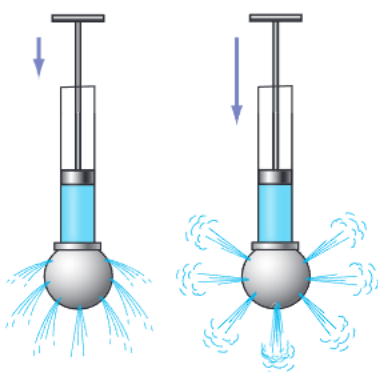
- Как вычислить давление жидкости на дно и стенки сосуда.
- Что такое гидростатический парадокс.
- В чём заключается принцип сообщающихся сосудов.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое давление?
- Опыт Паскаля.
- Что такое сообщающиеся сосуды?

Раздел физики **гидростатика** изучает покоящиеся жидкости. Вспомним основные законы гидростатики, которые вы изучили в курсе физики 7 класса.

ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ. Подвижность частиц газов и жидкостей является причиной того, что давление в них передаётся не только в направлении действия силы, но и по всем направлениям. Кроме того, под действием силы тяжести каждый вышележащий слой жидкости своим весом оказывает давление на нижележащие слои. Внутри жидкости всегда существует давление, которое называется **гидростатическим**.



ЗАКОН ПАСКАЛЯ. Вспомним опыт с шаром Паскаля, который представляет собой полый шар с множеством маленьких отверстий. К шару присоединена трубка с поршнем. Наполним шар водой и нажмём на поршень, чтобы увеличить в нём давление. Вода будет выливаться не только через отверстие, которое находится на линии действия прилагаемой нами силы, но и через все остальные отверстия тоже. Этот опыт служит доказательством того, что **давление, которое мы создаём, действуя поршнем на поверхность воды в трубке, передаётся водой по всем направлениям**. Это правило называется *законом Паскаля* в честь французского физика и математика Блеза Паскаля.

ВАЖНО

Закон Паскаля. Давление, производимое на покоящиеся жидкость или газ, передаётся без изменений в любую точку по всем направлениям.

Передача давления жидкостями и газами объясняется высокой подвижностью их молекул. Именно поэтому слои и частицы жидкостей и газов могут легко перемещаться относительно друг друга по всем направлениям.

ДАВЛЕНИЕ ЖИДКОСТИ НА ДНО И СТЕНКИ СОСУДА. Жидкость, находящаяся в сосуде, оказывает давление как на дно, так и на стенки сосуда. Поверхность жидкости, которая не соприкасается со стенками сосуда, называется **свободной поверхностью** жидкости.

Вычислим давление жидкости на дно сосуда площадью S, если высота столба жидкости в этом сосуде равна h.

Давление определяется по формуле $p = \frac{F}{S}$.

В нашем случае сила F, с которой жидкость действует на дно сосуда, равна её весу. Вес жидкости $P = mg$.

Вспомним, что масса $m = \rho V$, где ρ — плотность жидкости, а V — объём жидкости: $V = Sh$.

Следовательно, масса жидкости в этом сосуде $m = \rho Sh$, её вес $P = g\rho Sh$.

Теперь разделим вес жидкости на площадь дна сосуда: $p = \frac{g\rho Sh}{S}$.

Сократив дробь, получим *формулу для давления жидкости на дно сосуда*:

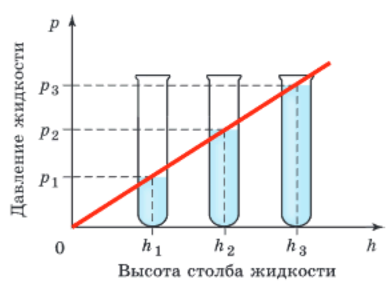
$$p = \rho gh. \qquad (1)$$

Так как по закону Паскаля давление внутри жидкости на одном и том же уровне одинаково по всем направлениям, то по формуле (1) можно находить давление жидкости на стенки сосуда на любой глубине.

ВАЖНО

> Если обозначить величины: давление жидкости — p, плотность жидкости — ρ, высота столба жидкости — h и ускорение свободного падения — g, то **давление жидкости** на дно и стенки сосуда рассчитывается по формуле
>
> $$p = \rho gh.$$

Из формулы (1) видно, что давление жидкости на дно и стенки сосуда прямо пропорционально высоте столба жидкости. Поэтому графиком зависимости давления от высоты столба жидкости является прямая.

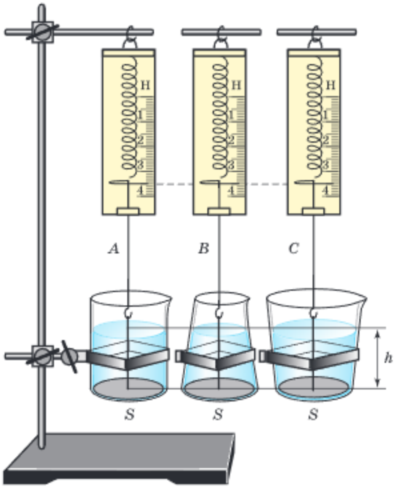


Давление жидкости на дно и стенки сосуда зависит не только от высоты столба жидкости, но и от плотности жидкости ρ. Чем больше плотность жидкости, тем большее давление она оказывает при той же высоте столба жидкости.

Если на свободную поверхность жидкости оказывается внешнее давление p_0 (например, давление поршня или давление атмосферы), то давление жидкости на глубине h равно

$$p = p_0 + \rho gh.$$

ГИДРОСТАТИЧЕСКИЙ ПАРАДОКС. Из формулы (1) видно, что давление жидкости на дно и стенки сосуда зависит только от плотности и высоты столба жидкости и не зависит от формы сосуда.



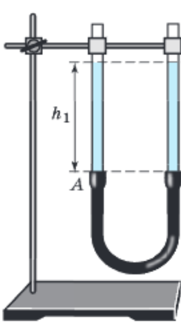
Рассмотрим опыт, в котором используются сосуды со съёмным дном, соединённым с крючком динамометра. Сосуды имеют разную форму, но одинаковую площадь дна. В сосуды налита жидкость до одного и того же уровня. Опыт показывает, что сила, с которой жидкость оказывает давление на дно этих сосудов, будет одной и той же. При этом динамометры показывают именно силу давления воды на дно сосудов, но не вес жидкости. Очевидно, что вес жидкости в сосудах будет различным, так как объёмы жидкости в сосудах неодинаковы.

По закону Паскаля давление столба жидкости высотой h одинаково передаётся в любую точку дна каждого из сосудов. Именно поэтому сила, с которой жидкость оказывает давление на дно, больше веса жидкости в сосуде B, но меньше веса жидкости в сосуде C. Несмотря на кажущееся противоречие, ничего парадоксального в этом опыте нет.

ПРИНЦИП СООБЩАЮЩИХСЯ СОСУДОВ

ВАЖНО

В **сообщающихся сосудах** любой формы и сечения свободные поверхности однородной жидкости всегда устанавливаются на одном уровне (при условии, что давление воздуха над жидкостью одинаково).



Докажем это утверждение. Мысленно выделим в сообщающихся сосудах некоторый уровень AB. Пусть $p_1 = \rho_1 g h_1$ — давление в левой части сосуда на уровне A, а $p_2 = \rho_2 g h_2$ — давление в правой части на уровне B.

Так как жидкость находится в покое, давление на этом уровне в левой и правой частях одинаково: $p_1 = p_2$.

Следовательно, $\rho_1 g h_1 = \rho_2 g h_2$.

Поскольку жидкость в сосудах однородная, то $\rho_1 = \rho_2$.

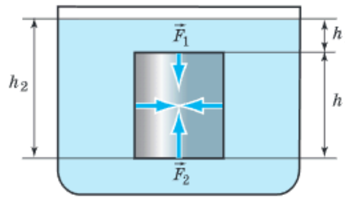
Получаем $h_1 = h_2$.

Приведённые рассуждения справедливы для любого выделенного уровня жидкости.

Уровень жидкости в одном из сосудов можно попытаться изменить, либо долив в него ещё жидкость, либо подняв его, либо опустив. В этом случае из-за образовавшейся разницы давлений жидкость перемещается из одного сосуда в другой до тех пор, пока свободные поверхности не окажутся на одном уровне.

ЗАКОН АРХИМЕДА. На тело произвольной формы, погружённое в жидкость или газ, действует **выталкивающая**, или **архимедова**, **сила**, названная по имени древнегреческого учёного А р х и м е д а, который впервые открыл и обосновал её существование.

Рассчитаем выталкивающую силу, действующую на погружённый в жидкость цилиндр высотой h и площадью поперечного сечения S. Плотность жидкости, в которой находится тело, равна $\rho_ж$.



Силы, действующие на боковые грани тела, попарно равны на одном и том же уровне жидкости. Они уравновешивают друг друга и только сжимают тело.

Силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, действующие на верхнюю и нижнюю поверхность цилиндра, определяются давлением столба воды высотой h_1 и h_2 соответственно. Очевидно, что возникновение выталкивающей силы обусловлено разностью этих сил:

$$F_{выт} = F_2 - F_1 = \rho_ж g h_2 S - \rho_ж g h_1 S; \quad F_{выт} = \rho_ж g S(h_2 - h_1) = \rho_ж g S h;$$

$$F_{выт} = \rho_ж g V.$$

Обозначим массу жидкости, которая занимает объём, равный объёму тела, через $m_ж$. Так как $m_ж = \rho_ж V$, получим $F_{выт} = m_ж g = P_ж$, где $P_ж$ — вес жидкости, занимающей объём, равный объёму тела.

ВАЖНО

Закон Архимеда. На тело, погружённое в жидкость (или газ), действует вертикально вверх выталкивающая сила, равная по модулю весу жидкости (или газа), вытесненной телом.

Если вес тела в воздухе равен $P_0 = mg$, то при погружении в жидкость вес тела уменьшается на значение, равное архимедовой силе: $P_1 = P_0 - F_A = mg - \rho_ж g V$.

ВЫВОДЫ

- Закон Паскаля: давление, производимое на покоящиеся жидкость или газ, передаётся в любую точку одинаково во всех направлениях.
- Принцип сообщающихся сосудов: в сообщающихся сосудах любой формы и сечения свободные поверхности однородной жидкости устанавливаются на одном уровне (при условии, что давление воздуха над жидкостью одинаково).
- Закон Архимеда: на тело, погружённое в жидкость (или газ), действует вертикально вверх выталкивающая сила, равная по модулю весу жидкости (или газа), вытесненной телом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Давление жидкости; закон Паскаля; гидростатический парадокс; принцип сообщающихся сосудов; закон Архимеда; выталкивающая сила

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. От каких величин зависит давление жидкости на дно и стенки сосуда?
2. Почему на одной и той же глубине давление воды в море больше, чем в реке?
3. В чём состоит гидростатический парадокс?
4. Как располагаются поверхности однородной жидкости в сообщающихся сосудах?
5. Чем определяется выталкивающая сила, действующая на тело в жидкости?

§ 34 ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое идеальная жидкость.
- Какое течение жидкости называется ламинарным.
- Какое течение жидкости называется турбулентным.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Как трение влияет на характер движения тел?

В предыдущем параграфе мы рассмотрели свойства покоящейся жидкости. Описание явлений в движущейся жидкости представляет собой гораздо более сложную задачу. Решением подобных задач занимается **гидродинамика**.

ИДЕАЛЬНАЯ ЖИДКОСТЬ. Динамика движения реальной жидкости очень сложна. В общем случае при рассмотрении движения жидкости нужно учитывать наличие сил *внутреннего трения* между слоями жидкости, а также принимать во внимание *сжимаемость* жидкости. Учёт этих явлений существенно усложняет изучение характеристик движущейся жидкости.

Для упрощения описания в ряде случаев можно пренебречь силами вязкого трения и сжимаемостью жидкости и рассматривать так называемую **идеальную жидкость.**

Следует чётко понимать, что **идеальная жидкость — это физическая модель**. Поэтому, как у всякой модели, у неё есть своя область применимости. Например, при больших скоростях движения жидкости уже нельзя пренебрегать силами вязкого трения внутри жидкости. При изучении распространения звуковых волн в жидкости всегда необходимо учитывать её сжимаемость.

Хотя жидкости и газы существенно отличаются друг от друга (газам присуща бóльшая сжимаемость), все закономерности движения идеальной жидкости применимы и к движению газов, лишённых внутреннего трения. Согласно опытам, при скоростях, значительно меньших скорости звука (примерно 330 м/с), сжимаемостью воздуха и других газов можно пренебречь.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

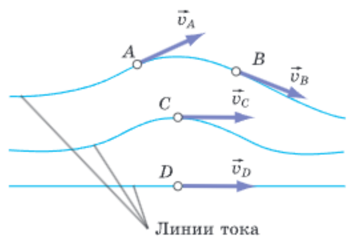
Раздел физики, изучающий механические свойства жидкостей и газов, их взаимодействие между собой и с граничащими с ними твёрдыми телами, называется **гидроаэромеханикой**. Это название произошло от трёх греческих слов — «хидро» (вода), «аэр» (воздух) и «механик» (машина, искусство построения машин). Гидроаэромеханика состоит из нескольких разделов. Например, в *гидродинамике* изучается движение газов и жидкостей со скоростью, много меньшей скорости звука. Если тело в воздухе движется со скоростью, сравнимой со скоростью звука или превышающей её, то такое движение изучается в разделе *газовая динамика*. *Аэромеханика* изучает движение летательных аппаратов и других тел в атмосфере, в том числе полёт насекомых и птиц. В качестве самостоятельной области науки аэромеханика возникла в начале XX в. Это связано с рождением авиации и необходимости разработки теории и методов расчётов различных характеристик самолётов: подъёмной силы крыла, аэродинамического сопротивления и т. д.

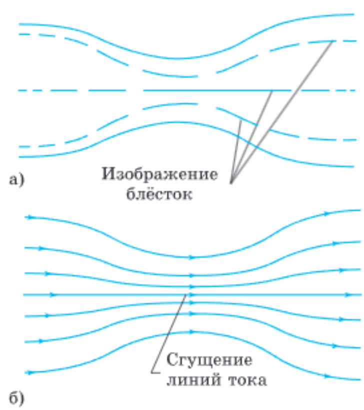
ЛАМИНАРНОЕ И ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ. Если в каждой точке пространства, заполненного движущейся жидкостью или газом, скорость и давление не изменяются со временем, то такое течение называется **стационарным.**

ЭТО ИНТЕРЕСНО

При стационарном обтекании твёрдого тела потоком идеальной жидкости лобовое сопротивление должно полностью отсутствовать. На самом деле сила сопротивления, действующая на тело со стороны реальной жидкости или газа, не является постоянной, а зависит от относительной скорости движения тела или среды. При больших относительных скоростях эта сила оказывается пропорциональной квадрату скорости:

$$|F_{\text{сопр}}| \sim v^2.$$





Для описания стационарного течения используют понятие **линий тока** — линий, касательные к которым в каждой точке в данный момент времени совпадают с направлениями скоростей частиц жидкости в этих точках.

Если при движении жидкости её отдельные слои скользят друг относительно друга не перемешиваясь, то такое движение называется **ламинарным течением.** Примером ламинарного течения может служить движение воды в спокойных реках.

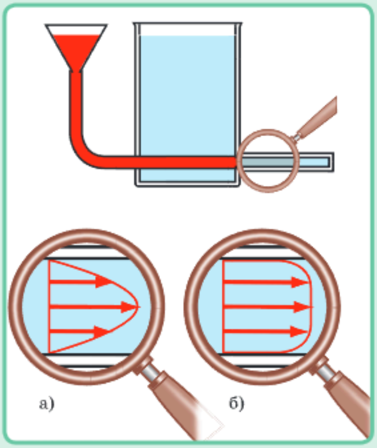
Если же движение жидкости сопровождается перемешиванием её слоёв с образованием завихрений, то такое течение называется **турбулентным** или **вихревым.** Турбулентными являются движение воды в реках с порогами, завихрение воды за винтами судов, истечение газов из сопла ракетных двигателей и т. п.

Линии тока при ламинарном течении можно сделать фактически видимыми, если в текущую в трубке жидкость подмешать алюминиевый порошок и при сильном освещении наблюдать за движением блёсток (*а*).

Сфотографировав жидкость с небольшой выдержкой, можно по характеру изображений блёсток в виде чёрточек судить о характере распределения скоростей частиц жидкости по сечению трубки. Поскольку длина чёрточки на фотографии пропорциональна скорости частиц жидкости, то из фотографии видно, что наибольшая скорость наблюдается в самом узком сечении трубки (*б*). При этом линии тока сгущаются.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

В историю физики вошло несколько простых и наглядных опытов, которые в конце XIX в. провёл английский физик и инженер О. Рейнольдс. Он исследовал течение



жидкости в длинной прямой трубе с постоянным поперечным сечением и гладкими стенками. В трубу жидкость попадала из большого сосуда. В то же время в трубу из воронки попадала точно такая же жидкость, но окрашенная в яркий цвет. Опыт показал, что при небольших скоростях течения подкрашенная жидкость видна по всей длине трубы прямой, резко очерченной линией. Так как слои жидкости не перемешиваются, то такое течение является *ламинарным*. Рейнольдс постепенно увеличивал среднюю скорость течения в трубе. При этом, начиная с некоторого значения скорости, окрашенная струя начинала размываться и окрашивала окружающую её жидкость по всей длине. Это означает, что в этом случае течение становится *турбулентным*. Рейнольдс заметил, что переход от ламинарного течения происходит всегда при одном и том же соотношении величин диаметра трубы, скорости и плотности к вязкости жидкости или газа. Это отношение с тех пор называется *числом Рейнольдса*. На рисунке изображены профили скоростей, т. е. различия скоростей движения в потоке для ламинарного (*а*) и турбулентного (*б*) течений.

ВЫВОДЫ

- Идеальная жидкость — физическая модель, в которой пренебрегают силами вязкого трения и сжимаемостью жидкости.
- Если в каждой точке пространства, заполненного движущейся жидкостью или газом, скорости и давления не изменяются во времени, то такое течение называется стационарным.
- Если при движении жидкости её отдельные слои скользят друг относительно друга не перемешиваясь, то такое движение называется ламинарным течением.
- Если же движение жидкости сопровождается перемешиванием её слоёв с образованием завихрений, то такое течение называется турбулентным или вихревым.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Идеальная жидкость; стационарное течение; ламинарное течение; турбулентное течение

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. В чём заключается различие между реальной и идеальной жидкостями?
2. Можно ли ламинарное течение жидкости считать устойчивым?
3. Можно ли управлять полётом воздушного шара с помощью руля и паруса?
4. Почему дым от костра в безветренную погоду вначале поднимается ровной струёй, а затем начинает клубиться?

ЗАКОН БЕРНУЛЛИ § 35

Первые полёты человека над землёй были осуществлены на воздушных шарах. Эти летательные аппараты поднимались в воздух благодаря выталкивающей (архимедовой) силе, действующей на них со стороны окружающего воздуха. Однако для создания летательных аппаратов нового типа — аэропланов (самолётов) потребовалось развитие совершенно иных принципов воздухоплавания, основанных на законах *гидроаэромеханики*.

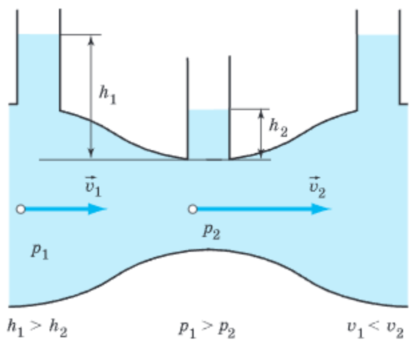
НОВОЕ В УРОКЕ

- В чём заключается закон Бернулли.
- Каковы особенности течения вязкой жидкости.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое идеальная жидкость?
- Что такое давление?
- Как давление зависит от высоты столба жидкости или газа?

ДАВЛЕНИЕ В ДВИЖУЩИХСЯ ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ. Если наблюдать за течением воды в реке, то можно увидеть, что на разных участках скорость течения различна. Там, где русло реки шире, вода течёт медленнее, а при сужении русла скорость течения возрастает.



Наблюдение за *стационарным течением* жидкости в трубе переменного сечения позволяет понять, как распределяется давление в движущейся жидкости. Для этого в разных местах трубы установим открытые сверху узкие стеклянные трубки. При стационарном течении в каждой такой вертикальной трубке жидкость поднимется до определённой высоты. По положению уровней жидкости в этих трубках можно сделать вывод о различиях давления внутри движущейся жидкости. Как показывает опыт, высота столбика жидкости в измерительных трубках, установленных в широких местах трубы, больше, чем в узких местах. Это говорит о том, что и давление в жидкости в широких местах трубы больше, чем в узких местах. Но с уменьшением сечения трубы скорость течения жидкости увеличивается.

Следовательно, **при стационарном течении жидкости давление меньше в тех местах, где скорость течения больше. В тех же местах, где скорость течения меньше, давление больше**.

Впервые эта зависимость была установлена швейцарским физиком Д. Бернулли и называется *законом Бернулли*.

Даниил Бернулли
(1700—1782)

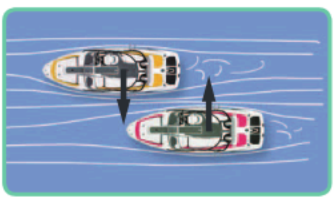
ВАЖНО

Закон Бернулли. *При стационарном течении* жидкости давление меньше в тех местах, где скорость течения больше, и наоборот, давление больше в тех местах, где скорость течения меньше.

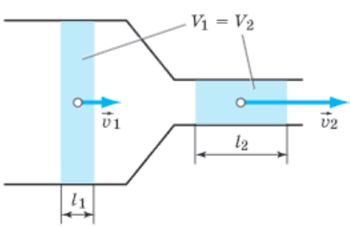
Если в трубе жидкость течёт под большим давлением, то опасность прорыва трубы возникает в тех местах, где её диаметр наибольший. Это происходит потому, что в широких местах трубы скорость движения жидкости падает и по закону Бернулли давление возрастает. Интересно, что в узких местах труб давление жидкости может упасть настолько сильно, что движущаяся жидкость может закипеть.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Закон Бернулли объясняет, почему в случае, когда морские или речные суда идут параллельным курсом близко друг к другу, возникает опасность их столкновения. Оказывается, относительная скорость воды между судами больше относительной скорости воды снаружи судов. Поэтому давление воды в пространстве между судами меньше, чем снаружи. Разница в давлениях и является причиной возникновения силы, толкающей суда друг к другу.



Подобное явление может произойти и с летательными аппаратами в воздухе.



Результаты рассмотренного выше опыта по распределению давления на разных участках трубы переменного сечения имеют физическое обоснование. Поскольку мы обсуждаем течение *несжимаемой* жидкости, то какой объём жидкости проходит через сечение площадью S_1 трубы за время Δt, такой же её объём должен пройти за то же самое время через сечение площадью S_2:

$$S_1 l_1 = S_2 l_2.$$

Обозначим скорость течения $v = \dfrac{l}{\Delta t}$. Тогда

$$S_1 v_1 \Delta t = S_2 v_2 \Delta t.$$

Следовательно,

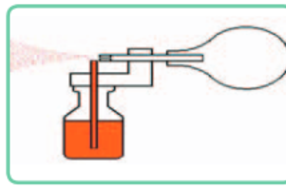
$$S_1 v_1 = S_2 v_2, \quad \text{или} \quad \frac{S_1}{S_2} = \frac{v_2}{v_1}.$$

Это выражение называется **уравнением неразрывности** потока жидкости.

Если $S_1 > S_2$, то $v_1 < v_2$, т. е. при переходе жидкости из более широкого участка трубы в более узкий скорость течения увеличивается. Это означает, что на участках трубы переменного сечения жидкость движется с ускорением. Поэтому на основании второго закона Ньютона можно утверждать, что на жидкость на указанных участках трубы действует сила. Эта сила возникает вследствие разности давлений на участках трубы переменного сечения. Следовательно, в широком участке трубы давление должно быть больше, чем в узком.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Возьмите узкую полоску бумаги и подуйте вдоль её поверхности. Что произойдёт? Полоска бумаги поднимется вверх, так как в струе воздуха над полоской бумаги скорость больше, чем под ней, поэтому давление воздуха над бумагой меньше давления под ней. Из-за разности давлений полоска бумаги приподнимается вверх.



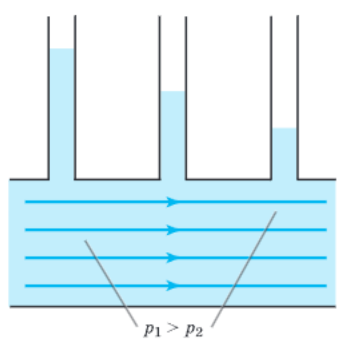
Аналогично работает *пульверизатор* — прибор для распыления жидкостей на мелкие капли. Простейший пульверизатор состоит из двух трубочек, скреплённых под прямым углом так, что их отверстия находятся на малом расстоянии друг от друга. Вертикальная трубка опускается в сосуд с жидкостью, а через горизонтальную — пропускается струя воздуха. В струе воздуха создаётся пониженное давление, и из-за разности давлений внутри сосуда и снаружи жидкость по трубочке поднимается вверх. Жидкость, попадая из отверстия в струю воздуха, разбивается на мелкие капли.

Закон Бернулли широко применяется в гидродинамике при проектировании сложных инженерных объектов, таких как крылья летательных аппаратов, турбины для гидроэлектростанций и др. Например, для гидроэлектростанций, построенных на горных реках, инженеры должны знать перепад высот между водохранилищем и зданием ГЭС, чтобы по разности давлений определить скорость течения воды через турбины, вырабатывающие энергию.

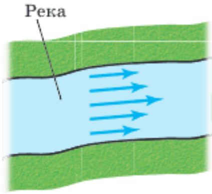
ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ. Во многих практических случаях при описании движения реальной жидкости нельзя пренебрегать наличием внутреннего трения между её слоями, т. е. *вязкостью жидкости*. Существование сил вязкого трения можно обнаружить с помощью простых опытов. Например, если цилиндрический сосуд с водой поместить в центр круглой подставки, которая может вращаться вокруг своей оси, и привести сосуд во вращение, вся жидкость постепенно также начнёт вращаться. При этом первыми во вращательное движение будут вовлекаться слои жидкости, непосредственно прилегающие к стенкам сосуда. Внутренние же слои жидкости придут во вращение спустя некоторое время. Это говорит о том, что силы вязкого трения возникают из-за различия скоростей между слоями движущейся жидкости.

Этот опыт невозможно было бы осуществить с идеальной жидкостью, между слоями которой трение отсутствует.

Учёт вязкости жидкости приводит к нарушению закона Бернулли. Как известно, при стационарном течении *идеальной жидкости* по трубе постоянного сечения давление в любых точках внутри жидкости должно быть одинаковым. Однако опыт с течением *реальной жидкости* даёт другой результат.



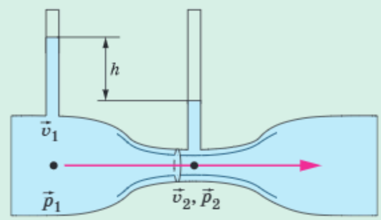
Действительно, если вдоль горизонтальной трубы с текущей жидкостью установить узкие вертикальные трубки (см. рисунок внизу с. 151), то высота подъёма воды в этих трубках будет уменьшаться по направлению течения. Это говорит о том, что из-за влияния вязкости давление в движущейся жидкости уменьшается вдоль потока и в трубах постоянного сечения.



Таким образом, **для поддержания стационарного течения жидкости необходимо сохранять имеющийся перепад давления на входе и выходе трубы**.

Влияние сил вязкого трения весьма существенно сказывается также на распределении скоростей *ламинарного течения* реки. Эта скорость меняется практически от нулевого значения у берегов до некоторого максимального на середине реки.

На законе Бернулли основано действие такого прибора, как *расходомер Вентури*, названного в честь итальянского учёного Дж. Вентури.



Расходомер Вентури — это устройство для измерения скорости потока газа или жидкости в трубе, с помощью чего вычисляется расход жидкости или газа в системе. Прибор представляет собой трубку с сужением посередине. При прохождении жидкости или газа через трубку Вентури скорость потока в узком месте увеличивается и при этом уменьшается давление, оказываемое жидкостью или газом на стенки трубы. Перепад давления на этом участке передаётся на измерительное устройство.

Трубку Вентури широко используют в инженерных коммуникациях, в системах очистки топлива, в насосных системах и т. д.

ВЫВОД

Закон Бернулли: при стационарном течении жидкости давление меньше в тех местах, где скорость течения больше, и наоборот, давление больше в тех местах, где скорость течения меньше.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Закон Бернулли; уравнение неразрывности; несжимаемая жидкость; вязкость жидкости

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Как формулируется закон Бернулли?
2. Как изменяется скорость течения жидкости на участках трубы переменного сечения?
3. Приведите примеры использования закона Бернулли в природе и технике.
4. Все мы наблюдали равномерное вытекание воды из крана. Почему при этом струйка воды сужается?

ПОДЪЁМНАЯ СИЛА КРЫЛА САМОЛЁТА. ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ, ПОДВОДНЫЕ КРЫЛЬЯ, АНТИКРЫЛО

§ 36

НОВОЕ В УРОКЕ

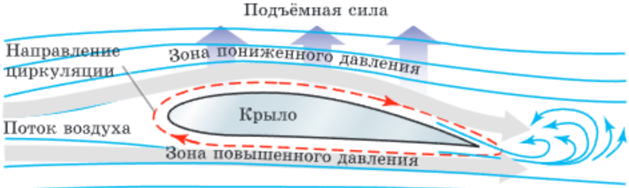
- Каковы причины возникновения подъёмной силы, действующей на крыло самолёта.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- В чём заключается закон Бернулли?
- Как изменяется скорость течения жидкости на участках трубы переменного сечения?

Закон Бернулли применим не только к жидкостям, но и к газам, и на его основе можно объяснить возникновение подъёмной силы, действующей на крыло самолёта.

ПОДЪЁМНАЯ СИЛА КРЫЛА САМОЛЁТА. Возникновение *подъёмной силы* возможно только в случае, когда давление воздуха на нижнюю поверхность крыла будет больше, чем на верхнюю. Такое перераспределение давления возникает в результате обтекания крыла набегающим воздушным потоком. Как показали расчёты, вокруг крыла образуется круговое движение (циркуляция) воздушного потока. Эта циркуляция накладывается на набегающий воздушный поток таким образом, что скорость потока под крылом оказывается меньше, чем над крылом. В соответствии с законом Бернулли это приводит к возникновению разницы сил давления воздуха на нижнюю и верхнюю поверхности крыла. В результате эта разница сил давления и создаёт **подъёмную силу.**



ЭТО ИНТЕРЕСНО

Одним из родоначальников аэродинамики по праву считается российский учёный-механик Н. Е. Жуковский. В 1904 г. он сформулировал теорему, дающую количественную величину подъёмной силы крыла самолёта, а также определил основные формы крыльев и лопастей винта самолёта. Для крыла самолёта была найдена наилучшая по обтекаемости форма, впоследствии названная *профилем Жуковского.*

Николай Егорович Жуковский (1847—1921)

Крыло самолёта имеет несимметричную форму: в передней части оно плавно закруглено, а задняя кромка — острая. Кроме этого, крыло ориентируется по отношению к направлению обтекающего потока воздуха под некоторым небольшим углом. При обтекании такого крыла воздухом возникает разность давлений над крылом самолёта и под ним, что и создаёт подъёмную силу.

Во время Гражданской войны, в 1918 г., был основан крупный научно-производственный центр — Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), который возглавил Жуковский. В настоящее время ЦАГИ является одним из крупнейших в мире центров аэродинамических исследований и находится в наукограде Жуковский в Подмосковье.

СОВРЕМЕННЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ. Крылья современных летательных аппаратов различаются по форме, площади и размаху, чтобы обеспечить оптимальную подъёмную силу в зависимости от назначения авиатранспорта. Большим и массивным самолётам необходима большая подъёмная сила и, следовательно, большая площадь крыла. Реактивные самолёты имеют стреловидную форму крыла, поскольку такая форма снижает сопротивление потока воздуха на больших скоростях и обеспечивает бóльшую подъёмную силу.

Интересно отметить, что летательные аппараты имеют не два отдельных элемента крыла, а одно крыло, плоскости которого располагаются по обеим сторонам корпуса самолёта. Такие самолёты называются *монопланами*. Также в авиации используются модели самолётов, которые называются *бипланами*. В их конструкции два крыла одинакового размера располагаются один над другим.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Александр Фёдорович Можайский
(1825—1890)

А. Ф. Можайский считается родоначальником авиации.

В 1883 г. он построил и испытал первый в мире самолёт. Это произошло на 20 лет раньше американцев братьев Райт, которых долгое время считали изобретателями аэроплана. Бесценные опыты, расчёты и эксперименты Можайского легли в основу отечественного авиастроения.

СУДА НА ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЯХ. Похожую конструкцию имеют *подводные крылья*, которые устанавливаются на различных судах, лодках и кораблях. При движении с малой скоростью судно удерживается на воде благодаря действию силы Архимеда. По мере того как судно увеличивает свою скорость, на подводные крылья начинает действовать подъёмная сила, направленная вверх. При определённой скорости подъёмная сила становится равна весу судна с грузом, и поэтому корпус судна приподнимается над поверхностью воды. Так как сила сопротивления в воздухе значительно меньше, чем сила сопротивления в воде, скорость судов на подводных крыльях значительно превышает скорость обычных аналогичных лодок и кораблей без крыльев.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Большой вклад в развитие судов на подводных крыльях внёс советский инженер и изобретатель Р. Е. Алексеев. Он один из первых в мире спроектировал и разработал военные и пассажирские катера на подводных крыльях. Под его руководством были созданы первые серийные пассажирские речные и морские катера на подводных крыльях «Ракета», «Метеор» и «Комета».

АНТИКРЫЛО. На гоночных автомобилях часто можно увидеть специальную деталь, укреплённую на задней части кузова, — это *антикрыло*. Для чего оно используется? При движении автомобиля кузов обтекает поток набегающего воздуха. Подобно обтеканию крыла самолёта воздушным потоком, вверху и внизу автомобиля образуется разница давлений и возникает подъёмная сила. При этом подъёмная сила, действующая на заднюю часть кузова, оказывается больше, чем на переднюю. При больших скоростях это снижает сцепление с дорогой и делает автомобиль менее устойчивым. Антикрыло, устанавливаемое на заднюю часть кузова, имеет форму перевёрнутого крыла самолёта и создаёт так называемую *прижимную силу*, т. е. силу, прижимающую автомобиль к дороге.

ВЫВОД

Подъёмная сила крыла самолёта обусловлена возникновением разницы сил давления воздуха на нижнюю и верхнюю поверхность крыла.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Подъёмная сила крыла самолёта; антикрыло; моноплан; биплан; самолёт Можайского

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Какова физическая причина возникновения подъёмной силы крыла самолёта?
2. В каких технических устройствах используется подъёмная сила?

§ 37 РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

ЗАДАЧА 1. На дне бассейна глубиной 5 м лежит плоская прямоугольная пластина площадью 30 см^2 так, что вода не попадает под неё. Какую минимальную силу нужно приложить к пластине, чтобы оторвать её от дна бассейна? Массой пластины можно пренебречь. Атмосферное давление примите равным 10^5 Па.

Дано:
$h = 5$ м
$S = 30$ см^2
$p_0 = 10^5$ Па
$\rho = 1000\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

F — ?

СИ

$30 \cdot 10^{-4}$ м^2

Решение.

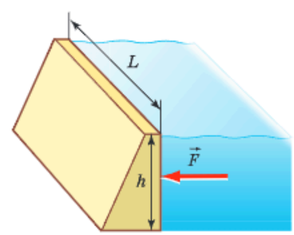
Так как под пластину вода не попадает, то архимедова сила на эту пластину не действует.
На пластину вода оказывает давление сверху с силой $F_{\text{в}} = pS$, где $p = p_0 + \rho g h$.
Так как массой пластины можно пренебречь, то по третьему закону Ньютона $F = |F_{\text{в}}|$.

$F = (p_0 + \rho g h)S$.

$$F = \left(100\,000\ \text{Па} + 1000\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 10\ \frac{\text{Н}}{\text{кг}} \cdot 5\ \text{м}\right) \cdot 30 \cdot 10^{-4}\ \text{м}^2 = 450\ \text{Н}.$$

Ответ: 450 Н.

ЗАДАЧА 2. Плотина, перегораживающая реку, имеет высоту 15 м и длину 120 м. С какой средней силой вода оказывает давление на плотину?



Дано:
$h = 15$ м
$L = 120$ м
$\rho = 1000\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

F — ?

Решение.

Вода давит на плотину с силой $F = p_{\text{ср}}S$, где $S = hL$,
$p_{\text{ср}}$ — среднее давление воды, равное среднему значению давления воды у поверхности и у дна реки:

$$p_{\text{ср}} = \frac{0 + \rho g h}{2} = \frac{\rho g h}{2}.$$

Тогда $F = p_{\text{ср}}S = \frac{\rho g h}{2} \cdot hL = \frac{\rho g h^2 L}{2}$.

Установим наименование полученной величины:

$$[F] = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \frac{\text{Н}}{\text{кг}} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{м} = \text{Н}.$$

Данное наименование соответствует наименованию единицы силы.

$$F = \frac{1000 \cdot 10 \cdot 15^2 \cdot 120}{2} = 135\ 000\ 000\ (\text{Н}) = 1{,}35 \cdot 10^8\ (\text{Н}).$$

Ответ: $1{,}35 \cdot 10^8$ Н.

ЗАДАЧА 3. В сообщающиеся сосуды с одинаковыми сечениями налита вода. Затем в одно из колен поверх воды доливают керосин. Граница между керосином и водой находится на высоте 15 см от основания сосудов. Высота столба керосина равна 20 см. Определите высоту столба воды во втором колене. Плотность воды 1000 кг/м^3, плотность керосина 850 кг/м^3.

Дано:
$h_1 = 15$ см
$h_2 = 20$ см
$\rho_в = 1000\ \frac{кг}{м^3}$
$\rho_к = 850\ \frac{кг}{м^3}$

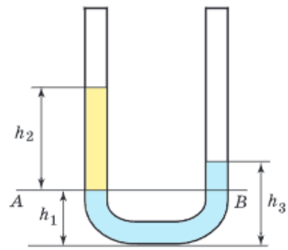
h_3 — ?

СИ
0,15 м
0,2 м

Решение.
На уровне AB давление жидкостей одинаково в обеих частях сосуда:
$\rho_к g h_2 = \rho_в g(h_3 - h_1)$.

Отсюда $h_3 = \dfrac{\rho_к h_2 + \rho_в h_1}{\rho_в}$;

$$h_3 = \frac{850 \cdot 0{,}2 + 1000 \cdot 0{,}15}{1000} = 0{,}32\ (м) = 32\ (см).$$



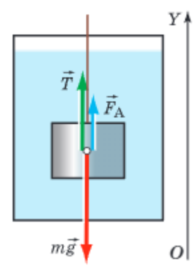
Ответ: 32 см.

ЗАДАЧА 4. Алюминиевый цилиндр массой 300 г подвешен на нити и полностью погружён в воду так, что он не касается дна и стенок сосуда. Чему равна сила натяжения нити? Плотность воды 1000 кг/м^3, плотность алюминия 2700 кг/м^3.

Дано:
$m = 0{,}3$ кг
$\rho_в = 1000\ \frac{кг}{м^3}$
$\rho_а = 2700\ \frac{кг}{м^3}$

T — ?

Решение.
На цилиндр, погружённый в воду, действуют сила тяжести $m\vec{g}$, архимедова сила $\vec{F}_A$ и сила натяжения нити $\vec{T}$.
Запишем второй закон Ньютона:
$m\vec{g} + \vec{F}_A + \vec{T} = 0$.
Направим ось OY вертикально вверх.
Тогда в проекциях на ось OY
$T + F_A - mg = 0$, откуда $T = mg - F_A$.
$F_A = \rho_в g V$; $V = \dfrac{m}{\rho_а}$.



Подставим эти формулы в выражение для силы натяжения нити:

$$T = mg - \rho_в g \frac{m}{\rho_а} = mg\left(1 - \frac{\rho_в}{\rho_а}\right);$$

$$T = 0{,}3 \cdot 10 \cdot \left(1 - \frac{1000}{2700}\right) = 1{,}9\ (Н).$$

Ответ: 1,9 Н.

ЗАДАЧА 5. Вода течёт по горизонтальной трубе переменного сечения. По широкой части трубы вода течёт со скоростью 12 см/с. С какой скоростью вода течёт по узкой части трубы, если диаметр узкой части трубы в 2 раза меньше, чем диаметр широкой?

Дано:	СИ	Решение.
$v_1 = 12$ см/с	0,12 м/с	Запишем уравнение неразрывности потока:
$d_1 = 2d_2$		$S_1v_1 = S_2v_2$.
v_2 — ?		Так как $S_1 = \pi d_1^2/4$ и $S_2 = \pi d_2^2/4$, то $v_1d_1^2 = v_2d_2^2$.
		$v_2 = v_1\dfrac{d_1^2}{d_2^2} = v_1\dfrac{4d_2^2}{d_2^2} = 4v_1;$
		$v_2 = 4 \cdot 12$ см/с $= 48$ см/с.

Ответ: 48 см/с.

Задачи для самостоятельного решения

1. В герметично закрытом аквариуме находится вода высотой 70 см. Над водой в аквариуме находится воздух при атмосферном давлении. Когда через клапан в крышке в аквариум накачали дополнительную порцию воздуха, давление воздуха увеличилось в 2 раза. Во сколько раз увеличилось давление на дно аквариума?

2. В сообщающиеся сосуды одинакового сечения сначала налили ртуть. Затем в правую часть добавили воду, а в левую часть — керосин. Определите высоту столба воды, если столб керосина равен 10 см, а в правой части ртуть на 2 см выше, чем в левой. Плотность ртути 13 600 кг/м^3, плотность воды 1000 кг/м^3, плотность керосина 800 кг/м^3.

3. Груз массой 0,5 кг подвешен на нити и полностью погружён в воду так, что он не касается дна и стенок сосуда. Сила натяжения нити равна 4 Н. Чему равен объём груза?

4. Определите расход воды, вытекающей из крана, если её скорость 0,3 м/с, а диаметр трубы крана 1 см.

5. Вода течёт по шлангу с площадью поперечного сечения 5 см^2 со скоростью 5 м/с. С какой скоростью вода будет вытекать из шланга, если диаметр отверстия на выходе из шланга будет 2 см?

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ § 38

Практические работы-исследования

Изучаем механику жидкости

ДВИЖЕНИЕ ВОДЯНЫХ СТРУЙ

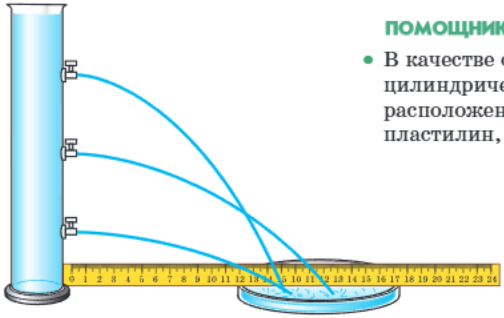
Рассмотрим возможности опытной проверки некоторых законов гидродинамики, в частности закона Бернулли. Используем простую экспериментальную установку, представляющую собой вертикальный цилиндрический сосуд с водой, снабжённый отверстием в боковой стенке, которое закрывается пробкой.

Измерив диаметры сосуда и отверстия, можно вычислить площади их поперечных сечений по известным формулам. Скорость вытекания воды из отверстия можно рассчитать чисто теоретически на основе энергетических соображений, а именно через работу сил гидростатического давления на уровне отверстия.

Особый интерес представляет вопрос, где нужно расположить отверстие, чтобы при заданном положении уровня воды в сосуде дальность полёта водяной струи была наибольшей.

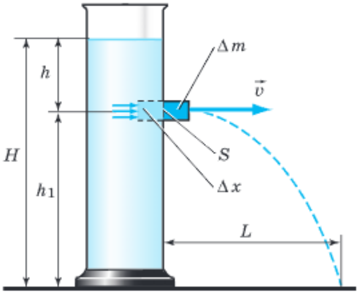
Цель работы

Изучить движение водяных струй.



ПОМОЩНИК

- В качестве оборудования можно использовать цилиндрический сосуд с тремя отверстиями, расположенными на разной высоте, линейку, пластилин, воду, поддон для сбора воды.



- Введём обозначения:
  H — высота уровня воды в сосуде;
  h — расстояние от уровня воды до отверстия;
  h_1 — расстояние от дна сосуда до отверстия, причём

$$h_1 + h = H;$$

S — площадь поперечного сечения отверстия;
$p = \rho g h$ — гидростатическое давление вблизи отверстия;
$F = pS$ — сила давления, действующая на элемент воды массой Δm, вытекающей из отверстия со скоростью v.

- Вычислим работу сил давления на малом перемещении Δx:

$$\Delta A = F\Delta x = \rho g h S \Delta x.$$

Запишем взаимосвязь работы с изменением кинетической энергии $\Delta E_к$ выделенного элемента воды:

$$\Delta A = \Delta E_к = \frac{\Delta m v^2}{2}, \quad \text{где } \Delta m = \rho S \Delta x;$$

$$\rho g h S \Delta x = \frac{\rho S \Delta x v^2}{2}.$$

Получим выражение для скорости вытекания воды из отверстия:

$$v = \sqrt{2gh}.$$

- Дальность полёта струи $L = vt$, где t — время, по истечении которого струя достигнет поверхности воды.

Согласно уравнениям кинематики,

$$h_1 = \frac{gt^2}{2} \quad \Rightarrow \quad t = \sqrt{\frac{2h_1}{g}}.$$

Следовательно,

$$L = 2\sqrt{hh_1} = 2\sqrt{h(H - h)}.$$

Очевидно, что $L = L_{max}$ будет в том случае, когда произведение $h(H - h)$ будет максимальным при фиксированном значении H.

Научная справка

Как найти наибольшее значение функции $f = xy$ в ситуации, когда переменные x и y связаны условием $x + y = C = \text{const}$?

$y = C - x;$

$f = x(C - x) = -x^2 + Cx.$

Таким образом, искомая функция — квадратичная, её график представляет собой параболу относительно переменной x, причём ветви параболы направлены вниз. Остаётся решить задачу нахождения координат вершины параболы.

- Воспользовавшись научной справкой, находим взаимосвязь между величинами H и h, т. е. устанавливаем, при каком значении h дальность полёта будет наибольшей.
- Пронумеруем отверстия снизу вверх и измерим расстояние h_1 для каждого из трёх отверстий.
- Исходя из значений величин h_1 и результатов теоретического анализа, находим высоту уровня воды в сосуде, при котором дальность полёта струи будет максимальной.
- Результаты измерений и вычислений заносим в таблицу в своей тетради.

№ отверстия	h_1, см	H, см	h, см	L, см	$L_{max\ теор}$, см
1					
2					
3					

- С учётом полученных результатов сделаем соответствующие выводы.

КЕЙС

ВОЗДУШНЫЕ СТРЕЛЬБЫ

После изучения на уроках физики закономерностей движения жидкостей и газов ученики Петя и Саша решили проверить на практике, насколько эффективно может воздействовать воздушная струя на тела, используемые в качестве снарядов. Как пояснил ребятам учитель, дальность полёта такого снаряда зависит от ряда факторов. По-видимому, основными из них являются длина и диаметр трубки, через которую осуществляется продув воздушного потока, а также параметры самого снаряда (его масса, форма и т. п.). На дальность полёта влияют сила трения, действующая на снаряд при его движении внутри трубки, и сила сопротивления воздуха. Поэтому наиболее целесообразным представляется подход, когда выделяется один главный параметр, который может меняться. В качестве такого свободного параметра удобно выбрать длину трубки, а её диаметр, так же как и параметры снаряда, сохранять неизменными. По словам учителя, данная методика позволит определить такую оптимальную длину трубки, при которой дальность полёта снаряда будет наибольшей.

Постарайтесь и вы выполнить все необходимые измерения.

Этапы выполнения задания

- Воздушные стрельбы организуйте в спортивном зале школы.
- В качестве пневматического «оружия» удобно использовать пластиковые трубки с внутренним диаметром около 4 мм, которые входят в комплект оконных штор (жалюзи).
- В качестве «снарядов» можно использовать практически одинаковые бобы растения, которое называется маш (популярная культура в странах Азии), или горошины.
- В качестве дополнительного оборудования вам потребуются рулетка и мелок для фиксации места падения снарядов.
- Приготовьте набор трубок разной длины. Длину трубок рекомендуется последовательно увеличивать от значений 15—20 см до значений 60—70 см. Всего в наборе должно быть 6—8 трубок.
- «Воздушные стрельбы» проводите парами. Ваш напарник должен будет метками на полу отмечать места падения горошин.
- Вставьте горошину в начало трубки и с силой подуйте в неё так, чтобы поток воздуха заставил «снаряд» двигаться. Результаты измерений дальности полёта «снарядов» записывайте в таблицу в своей тетради.
- По данным таблицы постройте график зависимости дальности полёта от длины духовой трубки.
- Анализ графиков каждой пары участников позволит усреднить результаты измерений и на их основе сделать соответствующие выводы.

Примечания.

1. При подготовке трубок следите за тем, чтобы они были не искривлены.
2. Постарайтесь, чтобы при выдохе в трубку поток воздуха во всех опытах был примерно одинаковой интенсивности.
3. Соблюдайте технику безопасности при стрельбе.

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Закон Паскаля: давление, производимое на покоящиеся жидкость или газ, передаётся без изменений в любую точку по всем направлениям.
- Принцип сообщающихся сосудов: в сообщающихся сосудах любой формы и сечения свободные поверхности однородной жидкости устанавливаются на одном уровне (при условии, что давление воздуха над жидкостью одинаково).
- Закон Архимеда: на тело, погружённое в жидкость (или газ), действует вертикально вверх выталкивающая сила, равная по модулю весу жидкости (или газа), вытесненной телом.
- Идеальная жидкость — физическая модель, в которой пренебрегают силами вязкого трения и сжимаемостью жидкости.
- Если в каждой точке пространства, заполненного движущейся жидкостью или газом, скорости и давления не изменяются во времени, то такое течение называется стационарным.
- Если при движении жидкости её отдельные слои скользят друг относительно друга не перемешиваясь, то такое движение называется ламинарным течением.
- Если при движении жидкости её слои перемешиваются с образованием завихрений, то такое течение называется турбулентным или вихревым.
- Закон Бернулли: при стационарном течении жидкости давление меньше в тех местах, где скорость течения больше, и наоборот, давление больше в тех местах, где скорость течения меньше.
- Подъёмная сила крыла самолёта обусловлена разницей сил давления воздуха на нижнюю и верхнюю поверхности крыла.

Вопросы для обсуждения

? Как изменится давление на дно и стенки сосуда, если он начнёт падать, сохраняя вертикальное положение?

? Почему опасно стоять вблизи быстро идущего поезда?

? Как объяснить устойчивое поведение шарика для настольного тенниса, помещённого в вертикальную струю воздуха из пылесоса?

Темы исследовательских и проектных работ

- Течение жидкости в природе.
- Течение жидкости в технике.
- Для чего нужна вязкость.
- Откуда берётся подъёмная сила.
- Аэродинамика в спорте.
- История русской авиации.

Глава 5

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

Все встречающиеся в природе изменения происходят так, что если к чему-либо нечто прибавилось, то это отнимается у чего-то другого...

М. В. Ломоносов

§ 39 ИМПУЛЬС СИЛЫ. ИМПУЛЬС ТЕЛА

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое импульс силы.
- Что такое импульс тела.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Как формулируется второй закон Ньютона?

Причиной изменения скорости тела является действие на него других тел. Например, футболист толкнул лежащий на газоне мяч, и мяч покатился. Другими словами, на тело массой m, которое первоначально покоилось, в течение времени Δt подействовала некоторая сила $\vec{F}$. В результате этого за малый промежуток времени Δt тело приобрело скорость $\vec{v}$.

ИМПУЛЬС СИЛЫ. Выясним, какая сила требуется для того, чтобы за время Δt скорость тела изменилась от значения v_0 до значения v.

По второму закону Ньютона

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

Вспомним формулу ускорения:

$$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}.$$

Подставим в формулу второго закона Ньютона формулу ускорения:

$$\vec{F} = m\frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}. \qquad (1)$$

Преобразуем выражение (1):

$$\vec{F}\Delta t = m\vec{v} - m\vec{v}_0. \qquad (2)$$

ВАЖНО

Импульс силы — это векторная физическая величина, характеризующая действие силы в течение некоторого промежутка времени. Импульс силы равен произведению силы на промежуток времени, в течение которого сила действует: $\vec{F}\Delta t$.

ИМПУЛЬС ТЕЛА. Правая часть равенства (2) представляет собой изменение величины, равной произведению массы тела на его скорость. Эта физическая величина называется **импульсом тела** или **количеством движения** тела.

ВАЖНО

Векторная физическая величина, равная произведению массы тела на скорость его движения, называется **импульсом тела** или **количеством движения** тела.

Импульс тела обозначается буквой p:

$$\vec{p} = m\vec{v}. \qquad (3)$$

Если тело покоится, то его импульс равен нулю. Важно подчеркнуть, что импульс тела — векторная величина. Направление вектора импульса совпадает с направлением вектора скорости тела. Под телом здесь понимается материальная точка.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Понятие количества движения как произведения массы тела на его скорость впервые ввёл Рене Декарт ещё в начале XVII в. при изучении законов механического движения. Но Декарт не рассматривал количество движения как векторную величину.

ЕДИНИЦЫ ИМПУЛЬСА. Единицей импульса в СИ является *килограмм-метр в секунду* $\left(\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}\right)$.

Если мы говорим об импульсе тела, то его единицы получают подстановкой единиц массы и единиц скорости в формулу (3).

Для того чтобы получить единицы импульса силы, вспомним, что 1 Н = = 1 кг · 1 м/с^2. Тогда

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

ИМПУЛЬС ТЕЛА И ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА. И. Ньютон в конце XVII в. сформулировал свой закон следующим образом: «Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует».

Действительно, из формулы (1) можно записать:

$$\vec{F} = \frac{m\vec{v} - m\vec{v}_0}{\Delta t} = \frac{\Delta(m\vec{v})}{\Delta t} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}.$$

Под «изменением количества движения» Ньютон имел в виду изменение импульса тела, поэтому **второй закон Ньютона можно** переформулировать следующим образом: **изменение импульса в единицу времени равно действующей на тело силе**.

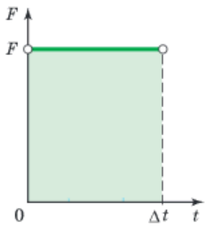
ЭТО ИНТЕРЕСНО

Объясняя свой второй закон, И. Ньютон писал: «Если какая-нибудь сила производит некоторое количество движения, то двойная сила производит двойное, тройная — тройное, будут ли они приложены разом все вместе или же последовательно и постепенно. Это количество движения... всегда происходит по тому же направлению, как и производящая его сила».

При помощи этого закона можно выразить взаимосвязь между импульсом силы и изменением импульса тела:

$$\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}. \tag{4}$$

Импульс силы равен изменению импульса тела.



Формула (4) показывает, что импульс тела может быть изменён на одну и ту же величину за счёт действия большой силы в течение малого промежутка времени или в результате действия малой силы, но за большой интервал времени.

Математическая формулировка второго закона Ньютона, строго говоря, справедлива в случае, когда приложенная к телу сила в течение времени её действия постоянна, т. е. не меняется ни по направлению, ни по модулю.

Пусть на тело в течение промежутка времени Δt действует постоянная сила $\vec{F}$. **Импульс силы численно равен площади фигуры под графиком зависимости силы от времени.**

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Из жизненного опыта мы знаем, что поймать мяч, летящий с большой скоростью, намного труднее, чем мяч, летящий с меньшей скоростью. Аналогично поймать мяч, имеющий меньшую массу, легче, чем поймать тяжёлый мяч. Этот факт можно объяснить, используя понятие импульса. Чем больше масса или скорость мяча, тем больше его импульс. Поэтому, чтобы остановить мяч, обладающий бóльшим импульсом, требуется бóльшая сила, действующая за одинаковый промежуток времени.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Можно рассмотреть ещё одну ситуацию. Ремни и подушки безопасности, установленные в автомобиле, позволяют силе, оказывающей давление на человека при аварии, действовать в течение более продолжительного времени. При этом изменение импульса человека при внезапной остановке автомобиля будет одинаково независимо от того, развёрнута подушка безопасности или нет. Но, как видно из соотношения (4), при одном и том же изменении импульса, если сила действует в течение большего промежутка времени, сама сила будет намного меньше.

ВЫВОДЫ

- Векторная физическая величина, равная произведению массы тела на скорость его движения, называется импульсом тела.
- Импульс силы равен изменению импульса тела.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Импульс тела; импульс силы

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Какая физическая величина называется импульсом силы?
2. Какая физическая величина называется импульсом тела?
3. Что принимают за единицу импульса тела; импульса силы?
4. Как можно сформулировать второй закон Ньютона с помощью понятия импульса тела?

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА § 40

Даже те, кто в реальной жизни никогда не имел дела с огнестрельным оружием, знают, что при выстреле возникает явление, называемое *отдачей*. При выстреле из ружья пуля летит вперёд, а само ружьё ударяет в плечо стреляющего человека. При выстреле из пушки снаряд летит вперёд, а пушка откатывается назад.
В этих примерах в результате взаимодействия двух тел их скорости изменяются как по модулю, так и по направлению. Следовательно, изменяется также направление и модуль импульса каждого тела.

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое замкнутая система.
- Как формулируется закон сохранения импульса.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое импульс силы и импульс тела?
- Как формулируется второй закон Ньютона?
- Как формулируется третий закон Ньютона?

ЗАМКНУТАЯ СИСТЕМА ТЕЛ. В механике часто встречаются задачи, в которых необходимо изучить движение нескольких тел, взаимодействующих друг с другом. Например, в задачах об отдаче огнестрельного оружия. Другой пример — движение бильярдных шаров до и после их столкновения. В таких задачах принято говорить о *системе тел*. Между телами системы действуют некоторые силы. Например, в системе соударяющихся тел — силы упругости, в системе пушка—снаряд — силы, создаваемые пороховыми газами.

Кроме сил, действующих между телами системы (*внутренние силы*), на тела могут действовать ещё силы со стороны тел, не принадлежащих системе (*внешние силы*). Однако в ряде случаев всеми внешними силами можно пренебречь. Поэтому часто движение системы тел рассматривается в предположении, что внешние силы отсутствуют.

ВАЖНО

Если два или несколько тел взаимодействуют только между собой (т. е. не подвергаются воздействию внешних сил), то эти тела образуют **замкнутую систему тел**.

Важно понимать, что **замкнутая система тел — это физическая модель.**

В природе замкнутых систем не существует. На любое тело во Вселенной действуют силы гравитации. Однако если внутренние силы намного превышают внешние, то действием внешних сил пренебрегают и *систему считают замкнутой*. Кроме того, если действие внешних сил скомпенсировано, то систему тел также можно считать замкнутой. Например, при изучении движения соударяющихся бильярдных шаров надо понимать, что на них действуют сила тяжести и сила упругости стола. При этом для каждого шара обе эти силы уравновешивают друг друга и не влияют на характер движения и взаимодействия шаров. Именно поэтому шары можно рассматривать как замкнутую систему.

ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ТЕЛ. Пусть два взаимодействующих тела массами m_1 и m_2 образуют замкнутую систему. Запишем для них формулу третьего закона Ньютона:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2. \quad (1)$$

Обозначим время, в течение которого тела взаимодействовали, Δt.

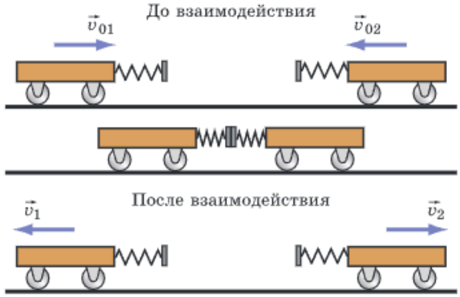
Если до начала взаимодействия тела имели скорости $\vec{v}_{01}$ и $\vec{v}_{02}$, а после взаимодействия — скорости $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$, то импульсы сил будут соответственно равны

$$\vec{F}_1\Delta t = m_1\vec{v}_1 - m_1\vec{v}_{01};$$
$$\vec{F}_2\Delta t = m_2\vec{v}_2 - m_2\vec{v}_{02}.$$

Выразим из этих соотношений $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ и подставим их в формулу (1). Проведя простейшие преобразования, получим

$$m_1\vec{v}_1 - m_1\vec{v}_{01} = -(m_2\vec{v}_2 - m_2\vec{v}_{02});$$
$$m_1\vec{v}_{01} + m_2\vec{v}_{02} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2, \quad \text{или}$$
$$\vec{p}_{01} + \vec{p}_{02} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2. \quad (2)$$

Здесь $\vec{p}_{01} + \vec{p}_{02}$ — суммарный импульс тел до их взаимодействия, $\vec{p}_1 + \vec{p}_2$ — суммарный импульс системы после взаимодействия.



ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА. Из соотношения (2) видно, что, хотя импульс каждого из шаров при взаимодействии изменился, векторная сумма их импульсов после взаимодействия осталась такой же, как и до взаимодействия.

Таким образом, можно сформулировать *закон сохранения импульса*.

ВАЖНО

Закон сохранения импульса. Векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, остаётся постоянной при любых движениях и взаимодействиях тел этой системы.

$$\vec{p}_{01} + \vec{p}_{02} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2.$$

Этот закон можно сформулировать иначе: **внутренние силы не изменяют суммарный импульс системы**.

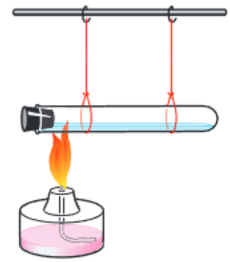
Закон сохранения импульса выполняется всегда, независимо от того, как взаимодействовали тела системы. Их взаимодействие может быть как долгим, так и кратковременным. Тела при взаимодействии могут соприкасаться или нет.

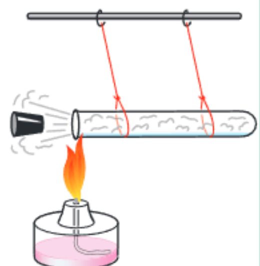
Если в качестве замкнутой системы рассмотреть одно-единственное тело, то в этом случае закон сохранения импульса означает, что в отсутствие сил, действующих на тело, его импульс остаётся постоянным (скорость тела не меняется). Это означает выполнение первого закона Ньютона, или закона инерции.

Из закона сохранения импульса следует, что если два тела, составляющие замкнутую систему, покоились до начала взаимодействия, то суммарный импульс системы останется равным нулю и после взаимодействия.

ИССЛЕДОВАНИЕ

Пробирка с водой, закрытая пробкой, подвешена на нитях (*а*). Если при помощи горелки нагревать воду в пробирке, то через некоторое время она закипит. Тогда пробка вылетит из пробирки в одном направлении, а сама пробирка отклонится в противоположную сторону (*б*). В этом случае можно говорить о явлении отдачи. Сила, выбрасывающая пробку из пробирки и отклоняющая пробирку, обусловлена давлением пара. При стрельбе из огнестрельного оружия происходит то же самое, с той лишь разницей, что действует давление пороховых газов.


а)


б)

Обозначим массы пробирки и пробки m_1 и m_2, а их скорости $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ соответственно. Так как вначале система пробирка—пробка покоилась, то по закону сохранения импульса можно записать:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = 0.$$

Направим ось OX по направлению движения пробирки. Тогда проекция скорости пробирки будет положительной, а проекция скорости пробки — отрицательной. Закон сохранения импульса для проекций скоростей будет выглядеть следующим образом:

$$m_1v_1 - m_2v_2 = 0.$$

Проведение данного опыта требует соблюдения особых мер предосторожности.

ВЫВОД

! Векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, остаётся постоянной при любых движениях и взаимодействиях этих тел.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Закон сохранения импульса

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Какая система тел называется замкнутой?
2. Как формулируется закон сохранения импульса?
3. Почему при выстреле из огнестрельного оружия возникает явление отдачи?
4. Летящий вертикально вверх снаряд разрывается в высшей точке подъёма на множество осколков одинаковой массы. Что можно сказать о значениях скоростей осколков в момент разрыва снаряда?

§ 41 ВИДЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕЛ

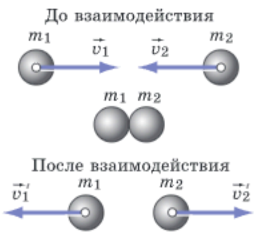
НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое абсолютно упругое и абсолютно неупругое взаимодействие тел.
- Как закон сохранения импульса записывается для различных взаимодействий тел.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Как формулируется закон сохранения импульса?

Хотя импульс замкнутой системы тел сохраняется, взаимодействие и характер движения тел после взаимодействия могут быть различны. Рассмотрим один из видов взаимодействия тел — столкновение, или удар. Это взаимодействие движущихся тел, при котором временем взаимодействия можно пренебречь.



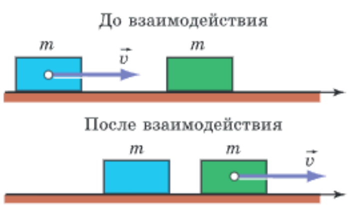
Центральный абсолютно упругий удар

УПРУГОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕЛ. **Абсолютно упругим ударом** называется такое взаимодействие, при котором тела отскакивают друг от друга без потери энергии системы. При абсолютно упругом ударе выполняются законы сохранения импульса и энергии. Примерами упругого взаимодействия тел являются столкновения бильярдных шаров, атомов или элементарных частиц.

Если тела движутся по прямой, проходящей через их центры, то такой удар называется **центральным**.

Пусть два тела массами m_1 и m_2 движутся со скоростями $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$. После абсолютно упругого соударения их скорости становятся $\vec{v}_1{}'$ и $\vec{v}_2{}'$. Запишем закон сохранения импульса в векторной форме:

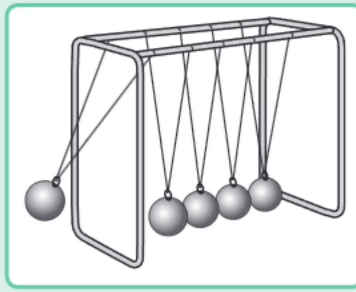
$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}_1{}' + m_2\vec{v}_2{}'.$$



Частным случаем центрального абсолютно упругого удара является взаимодействие тел равной массы. В этом случае тела обмениваются проекциями скоростей. Например, если первое тело до взаимодействия двигалось, а второе тело покоилось, то после взаимодействия первое тело останавливается, а второе тело начинает двигаться со скоростью, равной скорости первого тела.

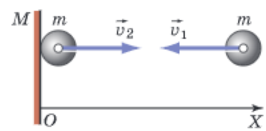
ЭТО ИНТЕРЕСНО

Для демонстрации закона сохранения импульса и абсолютно упругого удара служит устройство, называемое *колыбелью Ньютона*. Несмотря на своё название, колыбель Ньютона не является изобретением великого учёного. Принципы работы устройства изучил французский физик Э. Мариотт в XVII в. Колыбель Ньютона представляет собой несколько шаров, подвешенных на тонких лесках к каркасу, который закреплён на прочном основании. Если отклонить первый шарик и отпустить, он столкнётся со вторым шариком, который останется неподвижным, но при этом отклонится шарик с противоположной стороны. Затем соударение произойдёт в обратном порядке. Как можно объяснить такое движение шариков? Когда первый шарик сталкивается со вторым, первый шарик останавливается, а его импульс передаётся второму шарику. От второго шарика импульс передаётся третьему шарику, затем четвёртому и пятому. Пятый (крайний) шарик не может передать импульс следующему шарику, поэтому он начинает двигаться и поднимается на определённую высоту. Затем процесс происходит в обратном порядке. Если бы не было сил трения, пятый шарик двигался бы с той же скоростью и поднялся на ту же высоту, что и первый. Однако из-за трения движение шаров через некоторое время прекращается.



Если в колыбели Ньютона отклонить два шарика с одного конца устройства и отпустить, то будут отклоняться два шарика на противоположном конце.

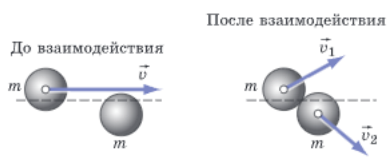
Пусть шарик малой массы m движется со скоростью $\vec{v}_1$ и сталкивается с неподвижной массивной стенкой ($M \gg m$). В результате абсолютно упругого удара скорость стенки меняется незначительно, поэтому шарик отскакивает от неё практически с такой же по модулю скоростью $\vec{v}_2$ в противоположном направлении: $\vec{v}_2 = -\vec{v}_1$.



Запишем изменение импульса шарика: $\Delta\vec{p} = m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1$.

В проекции на ось OX: $\Delta p = mv_2 - (-mv_1) = 2mv_1$.

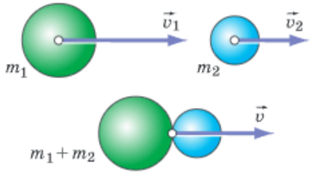
После ***нецентрального абсолютно упругого удара*** тела движутся под некоторым углом друг к другу, т. е. скорости тел не направлены по одной прямой.



Нецентральный абсолютно упругий удар

Закон сохранения импульса применяется не только для больших тел, но также для атомных ядер и других мельчайших частиц при исследовании их столкновений, которые происходят в больших физических установках — *коллайдерах*.

В коллайдере (от англ. *Collider* — сталкиватель) частицы разгоняются до больших скоростей, близких к скорости света, и сталкиваются. В результате образуются новые частицы, которые разлетаются во всех направлениях и фиксируются приборами. Зная импульс частиц до столкновения, учёные определяют характеристики новых частиц после взаимодействия.



Центральный абсолютно неупругий удар

НЕУПРУГОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕЛ. **Абсолютно неупругий удар** — это взаимодействие тел, в результате которого они соединяются (слипаются) и дальше движутся как одно целое. При абсолютно неупругом ударе выполняется закон сохранения импульса, однако происходит уменьшение суммарной кинетической энергии, т. е. закон сохранения механической энергии не выполняется (часть механической энергии переходит во внутреннюю). Примерами неупругого взаимодействия являются столкновение пластилиновых шариков, сцепка вагонов и т. д.

Пусть два тела массами m_1 и m_2 движутся со скоростями $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$. После абсолютно неупругого соударения их общая скорость становится $\vec{v}$.

Запишем закон сохранения импульса в векторной форме:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = (m_1 + m_2)\vec{v}.$$

Таким образом, рассмотрение упругого и неупругого соударений тел позволяет решать ряд задач на расчёт скоростей до или после взаимодействия.

ВЫВОД

При взаимодействии телá могут отскакивать друг от друга без потери энергии (абсолютно упругий удар) или соединяться вместе и двигаться как одно целое (абсолютно неупругий удар).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Абсолютно упругий удар; абсолютно неупругий удар; центральный удар; нецентральный удар

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Какое взаимодействие называется абсолютно упругим столкновением тел; абсолютно неупругим столкновением тел?
2. При каком столкновении тел выполняется закон сохранения импульса?
3. Приведите примеры абсолютно упругих и неупругих столкновений.
4. Две быстрые и одноимённо заряженные частицы движутся навстречу друг другу. В результате действия электрических сил между ними происходит неконтактное взаимодействие. Можно ли это взаимодействие считать абсолютно упругим?

РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ § 42

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое реактивное движение.
- В чём заключается принцип действия ракеты.

Мы все надували воздушные шарики и, не завязывая, отпускали. Шарик превращался в маленькую ракету и некоторое время двигался по весьма замысловатой траектории. Полёт шарика — это пример реактивного движения.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

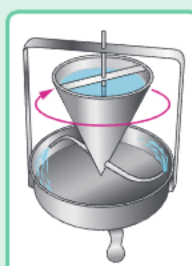
- Как формулируется закон сохранения импульса?
- Что такое реактивный двигатель и как он устроен?

РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ. **Реактивное движение** — это движение тела, возникающее при отделении от него с какой-либо скоростью некоторой его части.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Впервые устройство, иллюстрирующее реактивное движение, было описано древнегреческим учёным, математиком и инженером Героном Александрийским, жившим в I в. н. э. **Шар Герона**, или **эолипил**, представлял собой полый металлический шар, укреплённый на оси. В него впускался пар из закрытого сосуда, в котором кипела вода. В шар вставлялись две трубки, с загнутыми в противоположные стороны концами. Пар, вырываясь из трубок, приводил шар в быстрое вращение.

Ещё одним устройством, использующим принципы реактивного движения, является **сегнерово колесо**, названное по имени венгерского физика Я. Сегнера, который сконструировал это устройство в 1750 г. Сегнерово колесо состоит из воронки, на которой укреплена свободно вращающаяся горизонтальная трубка с отогнутыми в противоположные стороны открытыми концами. В воронку наливается вода, которая вытекает через открытые концы трубки и тем самым приводит колесо во вращение.



В природе встречаются растения и живые организмы, использующие реактивное движение.

У растения с названием «бешеный огурец» (лат. *Ecballium elaterium*) плод после созревания отрывается от плодоножки и рассеивает семена: сами огурцы при этом отлетают в противоположном направлении. Среди морских существ реактивным движением пользуются медузы, кальмары, осьминоги, каракатицы. Медуза втягивает воду в полость своего «зонтика», после чего мускулатура тканей «зонтика» резко сжимается и выталкивает воду назад, а сама медуза продвигается вперёд или вверх. Осьминог вбирает в себя воду, а затем выталкивает её через особое отверстие — «воронку». «Воронка» представляет собой коническую трубку, узкий конец которой направлен наружу, а широкий конец — внутрь. Каракатица движется подобно осьминогу: она вбирает в себя воду, а затем с огромной силой выталкивает её через воронку. При этом каракатица движется толчками назад, а её скорость может достигать 70 км/ч.

Примером реактивного движения является выстрел из орудия, когда из него вылетает снаряд и летит вперёд, а орудие откатывается назад. Подобное явление возникает при выбрасывании струи воды из шланга.

Наиболее важный с практической точки зрения пример реактивного движения — движение ракеты при истечении из неё струи газа.

ПЕРВЫЕ РАКЕТЫ. Есть мнение, что первые ракеты появились в Китае и вначале использовались для развлечения при запуске фейерверков с зажиганием в небе огненных дождей, фонтанов, колёс.

Ракеты применяли также в военном деле. При Петре I была создана и применялась однофунтовая сигнальная ракета образца 1717 г., остававшаяся на вооружении до конца XIX в. Она поднималась на высоту до одного километра.

Многие изобретатели предлагали проекты использования реактивной тяги как для движения наземного транспорта, так и для управления летательными аппаратами. Первым, кто предложил использовать ракету как средство передвижения, был российский изобретатель Н. И. Кибальчич. Работу над проектом он завершил, находясь в тюрьме. Зная о том, что ему вынесен смертный приговор, он передал адвокату не просьбу о помиловании, а «Проект воздухоплавательного прибора» (чертежи ракеты и математические расчёты). Про свой аппарат он писал: «Если цилиндр поставлен закрытым дном кверху, то при известном давлении газов... цилиндр должен подняться вверх».

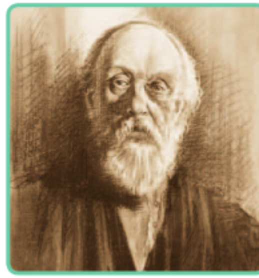
Николай Иванович Кибальчич
(1853—1881)

Кибальчич был казнён в 1881 г., и лишь в 1918 г. конверт с его проектом стал доступен учёным. Его аппарат должен был работать на прессованном порохе, а мысль о двигателе на жидком топливе пришла в голову другому учёному.

РЕАКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ. Конструкцию космической ракеты с жидкостным реактивным двигателем впервые предложил в 1903 г. российский учёный

К. Э. Циолковский. Помимо конструкции самого летательного аппарата, он продумал расположение в нём людей и системы жизнеобеспечения, т. е. вплотную подошёл к решению задачи космических путешествий. Он разработал теорию движения космических ракет и вывел формулу для расчёта их скорости. То, что Циолковский — великий учёный, признали только после его смерти.

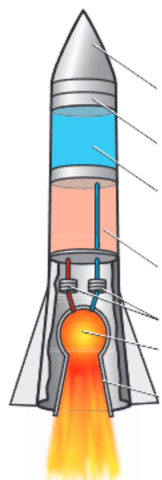
«Константин Эдуардович Циолковский был человеком, жившим намного впереди своего века», — говорил С. П. Королёв — конструктор ракеты, которая впервые в мире вывела на орбиту Земли искусственный спутник.



Константин Эдуардович Циолковский
(1857—1935)

УСТРОЙСТВО СОВРЕМЕННЫХ РАКЕТ. Любая современная ракета с жидкостным двигателем представляет собой оболочку, в которую заключён полезный груз, приборный отсек, баки с топливом и окислителем и двигатель (камера сгорания и т. д.).

Окислитель смешивается с топливом в камере сгорания, смесь воспламеняется, и образуется газ (*рабочее тело*) с высокой температурой и давлением. Этот газ выходит через специальное отверстие — *сопло*, назначение которого заключается в том, чтобы придать газу ещё бо́льшую скорость.



Когда реактивная газовая струя с большой скоростью выбрасывается из ракеты, сама ракета устремляется в противоположную сторону. Согласно третьему закону Ньютона, сила $\vec{F}$, с которой ракета действует на рабочее тело, равна по значению и противоположна по направлению силе $\vec{F}_1$, с которой рабочее тело действует на корпус ракеты:

$$|\vec{F}| = |\vec{F}_1|.$$

Сила $\vec{F}_1$ (*реактивная сила*) и ускоряет движение ракеты. В данном случае импульс, приобретаемый ракетой, должен быть равен импульсу выброшенных газов:

$$m_{р} v_{р} = m_{газ} v_{газ}.$$

Отсюда следует, что скорость ракеты

$$v_{р} = \frac{m_{газ}}{m_{р}} v_{газ}. \qquad (1)$$

Важно понимать, что формула (1) является *теоретической моделью* и справедлива для случая мгновенного сгорания топлива и выброса образовавшегося газа. В современных ракетах газ выбрасывается постепенно по мере сгорания топлива, и масса ракеты с течением времени уменьшается. Поэтому приходится решать задачу о движении тела с переменной массой.

Точная формула для скорости ракеты, в которой учитывается, что масса ракеты становится всё меньше и меньше по мере сгорания топлива, впервые была получена в 1897 г. К. Э. Циолковским и носит его имя. *Формула Циолковского* позволяет рассчитать запасы топлива, необходимые для достижения ракетой той или иной скорости. В таблице приводятся значения скорости ракеты, отношения начальной массы ракеты m_0 к её конечной массе m, рассчитанные для скорости струи газа (относительно ракеты) $v_{газ} = 4$ км/с.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

$v_р$, км/с	m_0/m
4	2,7
8	7,4
12	20,1
16	55
20	148
24	403
28	1100
32	2980
36	8100

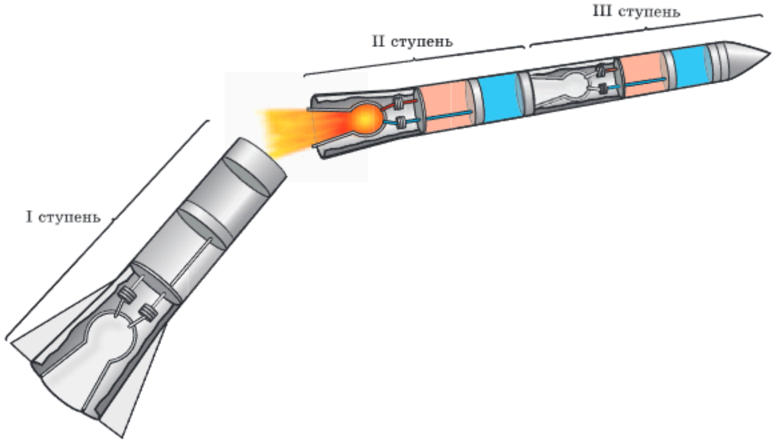
Из таблицы видно, что для того чтобы сообщить ракете первую космическую скорость, равную 8 км/с, отношение начальной массы ракеты к её конечной массе m_0/m должно быть равно 7,4. Это означает, что масса топлива в несколько раз превосходит массу самой ракеты.
Скорость истечения газов у современных ракет с жидкостным двигателем составляет примерно 3—4 км/с. Для межзвёздных полётов ракета должна двигаться со скоростью не меньше 1/10 скорости света ($v = 0{,}1\ c$), а это означает, что необходимо увеличивать скорость истечения газов. Если принять скорость газа $v_{газ} = 10$ км/с, то отношение $m_0/m = 7{,}6 \cdot 10^{1302}$. То есть стартовая масса ракеты должна во много раз превышать массу нашей Галактики.
Для межзвёздных полётов необходимы принципиально другие типы двигателей.

Весомый вклад в развитие теории реактивного движения внёс российский учёный-механик И. В. Мещерский (1859—1935). Его труды по теории движения тел переменной массы сыграли большую роль при создании реактивной техники.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

На основе принципа реактивного движения работают не только ракеты, но и более компактные устройства, например реактивный ранец, который использует реактивную тягу для обеспечения полёта человека на небольшие расстояния.
Патент на первый в мире ранцевый ракетный аппарат с жидкостным реактивным двигателем получил в 1919 г. русский изобретатель А. Ф. Андреев.
Современные реактивные ранцы используются в основном для развлечений и трюков, а также для работы космонавтов в открытом космосе.
Гидрореактивные ранцы используют воду, которая поступает через шланги к соплам и выбрасывается под большим давлением, создавая необходимую тягу.

МНОГОСТУПЕНЧАТЫЕ РАКЕТЫ. Есть два способа увеличить скорость ракеты, исходя из формулы (1). Во-первых, можно увеличить скорость истекания газов из камеры сгорания. Для этого подбирают оптимальный состав топлива и окислителя, а также подбирают конструкцию камеры сгорания и сопла.



Во-вторых, можно увеличить отношение массы топлива к массе ракеты. Для этого используют *многоступенчатые ракеты*, состоящие из двух или более соединённых ракет, которые называются *ступенями*. Многоступенчатые ракеты позволяют более рационально использовать топливо и достигнуть большей скорости, чем каждая из ступеней в отдельности. Каждая ступень имеет свои баки с топливом и свой двигатель. Сначала работает первая ступень и выводит ракету на определённую высоту, увеличивая при этом её скорость. Когда в первой ступени заканчивается топливо, она отстреливается от ракеты, передавая ей дополнительный импульс. Далее в работу включается вторая ступень, и процесс повторяется. Таким образом, масса ракеты с каждым разом уменьшается, что позволяет для оставшихся ступеней быстрее достигнуть требуемых значений высоты и скорости.

Наиболее распространены двух- и трёхступенчатые ракеты, но были успешно запущены и ракеты с пятью ступенями. С помощью многоступенчатых ракет космические аппараты выводят на орбиту Земли.

ВЫВОДЫ

- Реактивным движением называется движение тела, возникающее при отделении от тела с какой-то скоростью некоторой его части.
- Теория реактивного движения лежит в основе проектирования ракет и расчёта их движения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Реактивное движение; многоступенчатые ракеты

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Какое движение называется реактивным?
2. Какие примеры реактивного движения вам известны?
3. Каковы основные части ракеты?
4. В чём заключается основной принцип действия ракеты?
5. При взлёте ракета на короткое время зависла над землёй. Чему равна сила тяги, действующая на ракету в этот момент?

§ 43 УСПЕХИ В ОСВОЕНИИ КОСМОСА

НОВОЕ В УРОКЕ

- Основные достижения в освоении космоса.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое реактивное движение?
- Каков принцип действия ракеты?

Мечты о полётах на Луну, к другим планетам и звёздам существовали давно. Однако освоение околоземного космического пространства, не говоря уже о межпланетных полётах, становится возможным с развитием космической техники, и прежде всего благодаря созданию мощных ракетоносителей.

ПЕРВЫЕ ШАГИ В ОСВОЕНИИ КОСМОСА. Как говорилось в предыдущем параграфе, основы теории реактивного движения, конструкцию космической ракеты с жидкостным реактивным двигателем, а также теорию движения многоступенчатых ракет впервые предложил российский учёный К. Э. Циолковский.

Сергей Павлович Королёв (1907—1966)

Огромную роль в развитии ракетно-космической техники сыграл советский учёный и конструктор Сергей Павлович Королёв. Под его руководством были созданы ракетные комплексы, позволившие осуществить величайший прорыв в освоении космоса.

Первым эпохальным событием был запуск и вывод на околоземную орбиту первого в мире *искусственного спутника* Земли. Это произошло 4 октября 1957 г. Этот день считается началом *космической эры*.

Следующим важным этапом покорения космического пространства стал первый полёт в космос человека на борту космического корабля «Восток». Этим человеком, впервые побывавшим в космосе 12 апреля 1961 г., был советский лётчик-космонавт Юрий Алексеевич Гагарин.

Юрий Алексеевич Гагарин (1934—1968)

Через 2 года после этого события на космическом корабле «Восток-6» полетела в космос первая в мире женщина-космонавт Валентина Терешкова. Спустя ещё 2 года, в 1965 г., с космического корабля «Восход-2» космонавт Алексей Леонов осуществил первый в мире выход человека в открытый космос.

Первым объектом для исследования, конечно, стала Луна как ближайшее к Земле небесное тело. В 1960—1980 гг. было проведено множество успешных миссий СССР и США. В 1959 г. во время полёта советской *автоматической межпланетной станции* (АМС) «Луна-3» были получены первые фотографии обратной стороны Луны, не видимой с Земли. В 1969 г. в рамках американской миссии «Аполлон-11» был совершён первый пилотируемый полёт на Луну. Астронавты Нил Армстронг и Эдвин Олдрин высадились на поверхность Луны и собрали первые образцы лунной породы для исследований.

Первым в мире дистанционно управляемым с Земли самоходным аппаратом был советский «Луноход-1», запущенный в 1970 г. вместе с АМС «Луна-17» и проработавший на Луне почти год.

ОРБИТАЛЬНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ. Полёты советских космонавтов подтвердили возможность длительного пребывания человека в космосе. Поэтому перед учёными и конструкторами возникла задача создания *орбитальной космической станции*. В 1971 г. на околоземную орбиту была выведена первая орбитальная космическая станция «Салют». За время пребывания на орбите (175 суток) станцию посетили две экспедиции космонавтов.

Успехи в работе первой станции и полученные данные от научных экспериментов на орбите привели к необходимости создания долговременных орбитальных станций, представляющих собой сложные многоцелевые научно-исследовательские комплексы. Станция «Мир» — советская (и потом российская) орбитальная научная космическая станция, состоявшая из семи модулей, каждый из которых был предназначен для решения определённых научных и практических задач. Станция проработала на орбите 15 лет — с 1986 по 2001 г.

Современные спутники и орбитальные комплексы играют большую роль в изучении околоземного пространства и позволяют вести постоянный мониторинг аэро- и гидросферы Земли. В настоящее время на орбитальных станциях разрабатываются технологии изготовления материалов, которые можно получать только в условиях длительной невесомости (например, сверхчистые кристаллы).

В ноябре 1998 г. был запущен российский сегмент *Международной космической станции* (МКС). МКС — совместный проект, целью которого является исследование околоземного пространства и выполнение целого ряда экспериментов в условиях невесомости. В этом проекте участвуют 14 стран.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАНЕТ И КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ. После успешных экспедиций к Луне космические миссии были отправлены к Венере и Марсу. Марс является самой изучаемой планетой Солнечной системы, так как многие учёные предполагают, что на Марсе когда-то была жизнь. В настоящее время на орбитах Марса работают несколько искусственных спутников, а на поверхности находятся марсоходы и автоматические станции, которые должны получить подробный состав марсианских почв и установить, существовали ли когда-либо условия, подходящие для жизни, а также провести подготовку для высадки человека на Марс.

ВЫВОД

Освоение космоса имеет огромное значение для человечества. С выходом человека в космос открылись новые возможности для исследования планет и космических объектов Вселенной.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Освоение космоса; спутник; орбитальная космическая станция

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Расскажите об основных этапах освоения космического пространства.
2. Как вы думаете, может ли орбита космической станции оставаться неизменной в течение длительного времени? Свой ответ обоснуйте.

§ 44 МЕХАНИЧЕСКАЯ РАБОТА. МОЩНОСТЬ

НОВОЕ В УРОКЕ

- Каково определение работы в общем случае.
- Как вычисляется работа в случае, если направление действия силы не совпадает с направлением перемещения.
- Как вычисляют работу в случае, если на тело действует несколько сил.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое сила и что такое перемещение?
- Что такое работа и каковы единицы работы?

Понятие работы в механике было введено в первой половине XIX в., когда начали широко применять всевозможные машины и механизмы, включая тепловые. Введение понятия мощности было исторически обусловлено необходимостью оценивать производительность конструируемых тепловых машин.

РАБОТА СИЛЫ. *Механическую работу* можно рассматривать как меру действия силы, зависящую от численного значения силы, её направления, а также от перемещения тела под действием этой силы. Таким образом, в простейшем случае, когда тело движется прямолинейно и сила направлена параллельно направлению движения, **работа** равна произведению силы, действующей на тело, и пути, пройденного телом под действием этой силы:

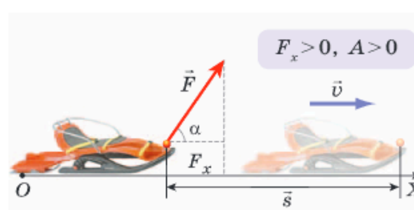
$$A = Fs.$$

При этом если направление силы совпадает с направлением движения тела, то эта сила совершает *положительную* работу: $A = Fs$. Например, если тело падает вертикально вниз, то сила тяжести совершает положительную работу.

Если направление силы противоположно направлению перемещения, то сила совершает *отрицательную* работу: $A = -Fs$. Например, если тело брошено вертикально вверх, то работа силы тяжести будет отрицательной.

Однако возникает вопрос: как рассчитать работу силы в случае, если направление действия силы составляет некоторый угол с направлением перемещения?

ОБЩЕЕ ВЫРАЖЕНИЕ ДЛЯ РАБОТЫ СИЛЫ. Пусть санки перемещаются по горизонтальной поверхности под действием силы $\vec{F}$ натяжения верёвки, составляющей угол α с горизонтом. В этом случае работа силы будет уже определяться проекцией F_x силы на направление перемещения $\vec{s}$ санок.



Поскольку $F_x = |\vec{F}| \cos \alpha$, то выражение для работы следует записать в виде

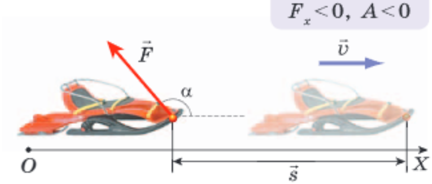
$$A = F_x|\vec{s}| = |\vec{F}| \cdot |\vec{s}| \cos \alpha.$$

ВАЖНО

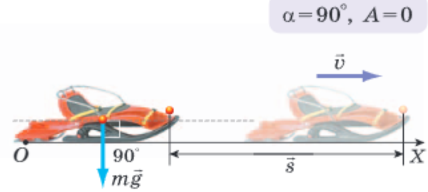
Работа постоянной силы равна произведению модулей силы и перемещения точки приложения силы и косинуса угла между ними:

$$A = Fs \cos \alpha.$$

$F_x < 0,\ A < 0$



$\alpha = 90^\circ,\ A = 0$



Приведённая выше формула, разумеется, включает все частные случаи вычисления работы. Действительно, если направления векторов $\vec{F}$ и $\vec{s}$ совпадают, то угол между ними равен нулю. Поскольку $\cos 0^\circ = 1$, то $A = |\vec{F}| \cdot |\vec{s}| = Fs$.

Если векторы $\vec{F}$ и $\vec{s}$ направлены противоположно друг другу, то $\alpha = 180^\circ$, $\cos 180^\circ = -1$ и работа $A = -|\vec{F}| \cdot |\vec{s}| = -Fs$.

Если угол α острый, $\cos \alpha > 0$ и работа положительна: $A > 0$.

Если угол α тупой, $\cos \alpha < 0$ и работа отрицательна: $A < 0$.

Возможен случай, когда направление силы, приложенной к телу, оказывается перпендикулярным направлению перемещения тела. В этом случае угол $\alpha = 90^\circ$, $\cos 90^\circ = 0$ и работа силы равна нулю: $A = 0$. Так, например, сила тяжести, действующая на санки, перпендикулярна направлению движения санок и поэтому работу не совершает.

РАБОТА НЕСКОЛЬКИХ СИЛ. Здесь необходимо сделать важное замечание: перемещение $\vec{s}$ в выражении для работы может быть вызвано разными причинами, но необязательно только воздействием той силы, работой которой мы интересуемся. Действительно, на тело может одновременно действовать несколько сил, и перемещение тела будет определяться их равнодействующей. В этом случае **полная работа равна работе равнодействующей силы**. При этом каждая из действующих сил может совершать работу (положительную или отрицательную).

РАБОТА СИЛЫ ТЯЖЕСТИ. Пусть тело массой m свободно падает с высоты h_1 до высоты h_2 над поверхностью земли. В этом случае направление перемещения тела совпадает с направлением силы тяжести, поэтому работа силы тяжести положительна. Модуль перемещения $s = h_1 - h_2$. Тогда работа силы тяжести

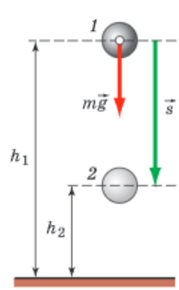
$$A = mg(h_1 - h_2).$$

Если тело падает с высоты h до нулевого уровня, то работа силы тяжести

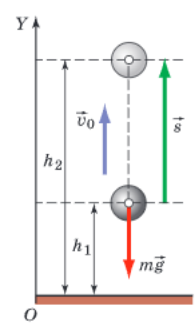
$$A = mgh.$$

Пусть тело брошено вертикально вверх из начального положения высотой h_1 и перемещается вверх до высоты h_2. В этом случае направление силы тяжести противоположно перемещению тела и работа силы тяжести отрицательна:

$$A = -mg(h_2 - h_1).$$

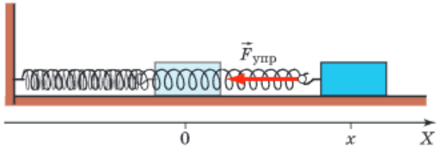


$A_{тяж} > 0$



$A_{тяж} < 0$

РАБОТА СИЛЫ УПРУГОСТИ. Сила упругости возникает при деформации тел. В качестве упругого тела рассмотрим пружину, левый конец которой закреплён,



а к правому прикреплено тело. Растянем пружину, сместив тело вправо. При этом на тело со стороны пружины будет действовать сила упругости, модуль которой, согласно закону Гука, равен $F_{упр} = kx$, где k — жёсткость пружины, x — деформация пружины.

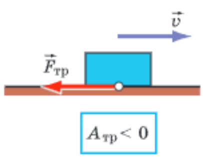
Если отпустить тело, пружина будет сжиматься. При этом сила упругости, действующая на тело, будет совершать работу. Хотя направления силы и перемещения совпадают, мы не можем в данном случае использовать полученную ранее формулу для вычисления работы, так как сила упругости при движении тела непрерывно изменяется.

Если в начальном положении значение силы по модулю равно kx, то после сокращения пружины оно будет равно 0. Поскольку сила упругости пропорциональна деформации пружины, для вычисления работы нужно взять среднее значение модуля силы и умножить его на модуль перемещения:

$$A = |\vec{F}_{упр\ ср}|x = \frac{kx + 0}{2}x = \frac{kx^2}{2}.$$

Таким образом, **работа силы упругости пропорциональна квадрату деформации**.

Когда пружину сжимают или растягивают, направления силы упругости и перемещения противоположны, поэтому **сила упругости совершает отрицательную работу**.



РАБОТА СИЛЫ ТРЕНИЯ. Как известно, сила трения скольжения возникает только при относительном движении соприкасающихся тел и направлена противоположно вектору относительной скорости, т. е. противоположно перемещению тела. Поэтому **работа силы трения скольжения отрицательна при любом перемещении тела**:

$$A_{тр} = -F_{тр}s.$$

МОЩНОСТЬ. Производительность машины зависит от работы, которую она способна совершить за определённое время. Чем больше совершённая работа, тем производительнее машина. Поэтому наряду с работой вводят физическую величину, характеризующую быстроту, с которой работа совершается, — *мощность*. Чем бóльшую работу за единицу времени совершает машина, тем больше её мощность.

ВАЖНО

Мощность — это физическая величина, равная отношению работы A к интервалу времени Δt, за который эта работа совершена:

$$N = \frac{A}{\Delta t}.$$

Вспомним, что работа силы равна произведению проекции силы F_x на модуль перемещения тела: $A = F_x|\vec{s}|$. Само же перемещение зависит от скорости движения. Например, различные транспортные средства могут в течение длительного времени двигаться с постоянной скоростью. Это возможно в случае, если сила тяги, действующая на них за счёт работы двигателя, равна по модулю силе сопротивления, препятствующей движению.

В этой связи возникает закономерный вопрос: может ли скорость транспортного средства зависеть от мощности двигателя? Ответ утвердительный, в чём можно убедиться, если в формулу для мощности подставить выражение для работы:

$$N = \frac{A}{\Delta t} = \frac{Fs\cos\alpha}{\Delta t} = Fv\cos\alpha,$$

где $v = \frac{s}{\Delta t}$ — скорость тела; α — угол между направлением вектора силы и направлением вектора скорости.

Полученная формула показывает, что **в том случае, если сила сопротивления движению постоянна, скорость тела пропорциональна мощности**. Последнее объясняет, почему быстроходные транспортные средства снабжаются двигателями большой мощности.

Из формулы также видно, что **при постоянной мощности двигателя сила тяги тем меньше, чем больше скорость**. И наоборот, при уменьшении скорости сила тяги возрастает. Например, при подъёме автомобиля в гору водитель переходит на пониженную скорость, что приводит к увеличению силы тяги.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

При движении многих транспортных средств (ракет, самолётов, быстроходных судов и т. п.) сила сопротивления, действующая на тело со стороны среды, не является постоянной, а растёт с увеличением скорости. В частности, при больших скоростях сила сопротивления воздуха пропорциональна квадрату скорости:

$$F_{\text{сопр}} \sim v^2.$$

Такой же должна быть и зависимость силы тяги транспортного средства от скорости:

$$F_{\text{тяги}} \sim v^2.$$

Поэтому мощность самолётных и судовых двигателей должна быть пропорциональна кубу скорости:

$$N \sim v^3.$$

Это означает, что для увеличения скорости судна, например, в 2 раза мощность его двигателя необходимо увеличить в 8 раз!

ЕДИНИЦЫ РАБОТЫ И МОЩНОСТИ. Напомним, что единицей работы в СИ является *джоуль*. 1 Дж — это работа, совершаемая силой 1 Н на пути 1 м, если направления силы и перемещения совпадают:

$$1\ \text{Дж} = 1\ \text{Н} \cdot \text{м}.$$

Часто используют также кратные единицы работы:

килоджоуль (кДж): 1 кДж = 10^3 Дж;

мегаджоуль (МДж): 1 кДж = 10^6 Дж.

В соответствии с определением единицей мощности в системе СИ является мощность, при которой за 1 с совершается работа, равная 1 Дж. Эта единица — *ватт*:

$$1\ \text{Вт} = 1\ \text{Дж}/1\ \text{с}.$$

Часто используют кратные единицы мощности:

киловатт (кВт): 1 кВт = 10^3 Вт;

мегаватт (МВт): 1 МВт = 10^6 Вт;

гигаватт (ГВт): 1 ГВт = 10^9 Вт.

Иногда мощность измеряют в *лошадиных силах*: 1 л. с. ≈ 736 Вт.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Мощности современных технических устройств изменяются в очень широком диапазоне: от тысячных долей ватта (миниатюрные микродвигатели) до нескольких тысяч мегаватт (крупные гидро- и атомные электростанции). Например, мощность механизма наручных часов составляет несколько микроватт (1 мкВт = 10^{-6} Вт), а мощность двигателей космического корабля — десятки гигаватт (1 ГВт = 10^{9} Вт).
Средняя мощность человека при ходьбе составляет 60—70 Вт, а при беге или прыжках она достигает 600—700 Вт.

Оцените свою мощность.

ПОМОЩНИК. Измерьте время, необходимое вам, чтобы подняться по лестнице, например, на 3-й этаж.
Измерьте время, необходимое для спуска с 3-го этажа.
Измерьте высоту одной ступени и вычислите общую высоту подъёма/спуска.
Оцените и сравните мощности вашего организма при подъёме и спуске.
Повторите опыт, двигаясь с максимально возможной скоростью.
Сравните свою мощность с 1 л. с.

ВЫВОДЫ

- Работа постоянной силы равна произведению модулей силы и перемещения точки приложения силы и косинуса угла между ними.
- Мощность — это физическая величина, равная отношению работы к интервалу времени, за который эта работа совершена.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Механическая работа; работа силы тяжести; работа силы упругости; работа силы трения; мощность

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Какую работу совершает штангист, удерживающий неподвижную штангу на вытянутых руках?
2. В каком случае сила, приложенная к движущемуся телу, не совершает работу?
3. На тело действуют две равные по модулю силы. В каком случае работа, совершённая равнодействующей силой, будет: максимальной; минимальной?
4. Можно ли о мощности судить по совершённой работе?
5. Зависит ли от времени мощность, развиваемая силой тяжести при свободном падении тела?

ЭНЕРГИЯ. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ § 45

Одним из наиболее важных понятий в физике является понятие *энергии*. Чёткое представление о том, что такое энергия, в 1847 г. сформулировал немецкий физик Г. Гельмгольц в связи с открытием закона сохранения энергии.

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое энергия.
- Какие виды энергии существуют.
- Как энергия связана с работой.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое механическая работа?

РАБОТА ВНЕШНИХ СИЛ И СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ. Учёные, занимающиеся вопросами изучения энергии, обратили внимание на то, что совершение работы телом или системой тел обязательно связано с изменением их состояния. Например, поднятые над землёй грузы, а также механизмы, снабжённые сжатыми пружинами, способны совершать работу в течение определённого времени. Наглядным примером здесь может служить работа часов с пружинным механизмом. Закрученная спиральная пружина часов способна совершать работу в течение длительного времени, поддерживая при этом движение колёс, стрелок, балансира и т. д. Однако с течением времени состояние пружины меняется, и она уже не способна совершать работу. Аналогично, поднятый на некоторую высоту и отпущенный груз копра́ при ударе о сваю останавливается, совершив работу по забиванию сваи в грунт. Для того чтобы система вновь была способна совершать работу, необходимо, чтобы внешние силы изменили состояние тел системы: подняли их вверх, увеличили их скорости, деформировали их и т. д. Последнее означает, что, **для того чтобы система обладала энергией, внешние силы должны совершить над ней положительную работу**.

Герман Гельмгольц
(1821—1894)

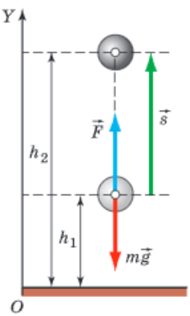
ВАЖНО

Если тело или система тел способны совершать работу, то говорят, что они обладают **энергией**.

Энергия измеряется в тех же единицах, что и работа, т. е. в *джоулях*.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Механическая энергия используется человеком с древнейших времён как в военных целях (лук и стрела, копьё, баллиста и катапульта и др.), так и в быту (механические и маятниковые часы, гончарный круг, парус и т. д.). В современном мире мы также постоянно сталкиваемся с примерами механической энергии. Это вращающиеся лопасти вентилятора, движение автомобилей и самолётов, жалюзи на окнах, которые можно поднять и зафиксировать, молоток при забивании гвоздей и множество других инструментов и механизмов.



ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ТЕЛА, ПОДНЯТОГО НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЕМЛИ. Понятие *потенциальной энергии*, зависящей от взаимного положения тел (или частей одного и того же тела), наиболее просто ввести, рассмотрев перемещение тела вблизи поверхности земли.

Пусть тело под действием некоторой силы $\vec{F}$ перемещается вверх из начального положения с высотой h_1 в конечное положение с высотой h_2. Будем считать движение тела очень медленным.

При перемещении внешняя сила $\vec{F}$ совершит над телом работу $A = Fs = F(h_2 - h_1)$.

Сила тяжести в этом случае совершит отрицательную работу, равную по модулю работе силы $\vec{F}$:

$$A_{\text{тяж}} = -A = -(mgh_2 - mgh_1).$$

Опираясь на полученное равенство, можно сказать, что работа силы тяжести равна изменению физической величины $E_{\text{п}} = mgh$, взятому с противоположным знаком:

$$A_{\text{тяж}} = -(E_{\text{п}2} - E_{\text{п}1}).$$

Эта величина называется *потенциальной энергией* тела, поднятого на высоту h относительно поверхности земли.

При движении тела вниз сила тяжести будет совершать положительную работу, что приведёт к уменьшению его потенциальной энергии.

ВАЖНО

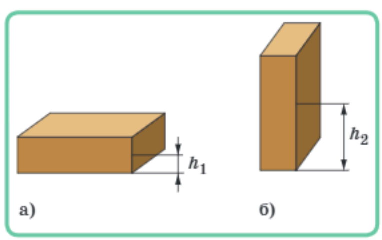
Потенциальная энергия тела массой m, поднятого на высоту h относительно поверхности земли, рассчитывается по формуле

$$E_{\text{п}} = mgh.$$

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Рассмотрим, как изменится потенциальная энергия ящика, лежащего на земле, если переместить его из горизонтального положения (*а*) в вертикальное (*б*).

В обоих случаях ящик находится на земле. Однако положение центра тяжести ящика в случаях *а*) и *б*) различно. В первом случае центр тяжести находится на высоте h_1 над землёй, а во втором — на высоте h_2, причём $h_1 < h_2$. Поэтому при изменении положения ящика его потенциальная энергия изменится на величину $mg\Delta h$, где m — масса ящика, а $\Delta h = h_2 - h_1$.



ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ДЕФОРМИРОВАННОЙ ПРУЖИНЫ. В предыдущем параграфе мы получили выражение для работы силы упругости, когда растянутая пружина с деформацией x возвращается в первоначальное состояние:

$$A = \frac{kx^2}{2}.$$

По аналогии с определением потенциальной энергии тела, поднятого на некоторую высоту, потенциальная энергия упруго деформированной пружины будет определяться работой, которую может совершить сила упругости при сокращении пружины:

$$E_п = A = \frac{kx^2}{2}.$$

Если начальная деформация x_1 пружины больше её конечного значения x_2, то сила упругости совершает положительную работу за счёт убыли потенциальной энергии пружины:

$$A = E_{п1} - E_{п2} = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}.$$

При увеличении деформации пружины её потенциальная энергия увеличивается, однако сила упругости при этом совершает отрицательную работу. Следовательно, **знак изменения потенциальной энергии пружины всегда противоположен знаку работы силы упругости**.

ВАЖНО

Потенциальная энергия деформированной пружины рассчитывается по формуле

$$E_п = \frac{kx^2}{2}.$$

ВЫВОДЫ

- Если тело или система тел посредством действующих на них сил способны совершать работу, то говорят, что они обладают энергией.
- Потенциальная энергия — это энергия, которая определяется взаимным положением взаимодействующих тел или частей одного и того же тела.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Механическая энергия; потенциальная энергия поднятого над землёй тела; потенциальная энергия деформированной пружины

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Как связана работа силы тяжести с потенциальной энергией тела?
2. Как изменяется потенциальная энергия тела при его движении вверх?
3. Как вам известно, потенциальная энергия зависит от взаимного положения тел системы или частей одного и того же тела. А зависит ли потенциальная энергия от выбора системы отсчёта, к которой принадлежат рассматриваемые тела? Свой ответ обоснуйте.

§ 46 КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое кинетическая энергия.
- Как формулируется теорема об изменении кинетической энергии.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое работа?
- Что такое потенциальная энергия?

На предыдущем уроке мы изучили понятие потенциальной энергии. Теперь рассмотрим подробнее, что такое *кинетическая энергия*.

КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ. Вы уже знаете, что движущиеся тела обладают энергией, которая называется *кинетической энергией*.

Рассмотрим первоначально покоящееся тело, на которое начинает действовать постоянная сила $\vec{F}$. Если на тело не действуют другие силы, то тело будет двигаться с ускорением $a = F/m$. Спустя время t скорость тела составит $v = at$, а модуль перемещения будет равен $s = at^2/2$. При этом сила $\vec{F}$ совершит работу

$$A = Fs = ma\frac{at^2}{2} = m\frac{(at)^2}{2} = \frac{mv^2}{2}.$$

Результатом совершённой работы является приобретение телом энергии, связанной с его движением:

$$E_к = \frac{mv^2}{2}.$$

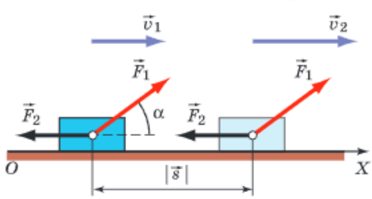
Таким образом, **кинетическая энергия показывает, какую работу должна совершить сила, действующая на покоящееся тело массой m, чтобы сообщить ему скорость v.** В этом и заключается физический смысл кинетической энергии.

ВАЖНО

Кинетическая энергия равна половине произведения массы тела на квадрат её скорости:

$$E_к = \frac{mv^2}{2}.$$

ТЕОРЕМА ОБ ИЗМЕНЕНИИ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. Установим взаимосвязь между работой и изменением кинетической энергии в случае, если на уже движущееся тело начинает одновременно действовать несколько сил.



Рассмотрим случай, когда на тело, движущееся со скоростью $\vec{v}_1$, начинают действовать две силы, знаки проекций которых на направление движения противоположны.

Суммарная работа этих сил $A = A_1 + A_2$, где $A_1 = F_{1x}s = F_1 s \cos\alpha$;
$A_2 = F_{2x}s = -F_2 s$.

Следовательно,

$$A = F_1 s \cos\alpha - F_2 s = (F_1 \cos\alpha - F_2)\, s.$$

Согласно второму закону Ньютона, тело будет двигаться с ускорением $\vec{a}$, проекция которого

$$a_x = \frac{F_{1x} + F_{2x}}{m} = \frac{F_1 \cos\alpha - F_2}{m}.$$

Тогда $A = ma_x s$.

Используем далее формулу кинематики, устанавливающую взаимосвязь модулей перемещения, ускорения и квадратов начальной и конечной скоростей:

$$s = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a_x}; \quad v_2^2 - v_1^2 = 2a_x s.$$

С учётом этих формул выражение для работы примет вид

$$A = ma_x s = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

Таким образом, работа сил равна разности кинетических энергий тела:

$$A = E_{к2} - E_{к1} = \Delta E_к.$$

Полученное равенство носит название *теоремы об изменении кинетической энергии*.

ВАЖНО

Теорема об изменении кинетической энергии. Изменение кинетической энергии тела (материальной точки) равно работе сил, действующих на это тело.

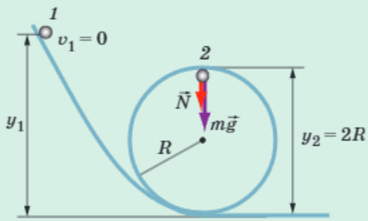
Если силы совершают положительную работу, то $E_{к2} > E_{к1}$, т. е. кинетическая энергия тела увеличивается.

Если же знак работы отрицательный, то $E_{к2} < E_{к1}$, т. е. кинетическая энергия уменьшается.

Примечателен тот факт, что при выводе теоремы об изменении кинетической энергии использовалось лишь определение работы и второй закон Ньютона. Никаких предположений о характере сил, действующих на тело, при этом не было сделано. Этими силами, в частности, могут быть силы упругости, силы тяготения и силы трения.

Доказано также, что теорема об изменении кинетической энергии остаётся справедливой и в тех случаях, если на тело действуют переменные силы и если тело движется по криволинейной траектории.

Рассмотрим физику выполнения трюка «мёртвая петля» автомобилем на треке специальной конструкции.
Для простоты возьмём жёлоб с наклонным участком и петлёй радиусом R. По жёлобу катится шарик массой m. Какой должна быть минимальная высота горки, чтобы шарик не сорвался с верхней точки петли? (Трение не учитываем.)



В этом примере работу совершает только сила тяжести: $A = -mg\Delta h$, где $\Delta h = y_2 - y_1$ — изменение положения шарика по вертикальной оси при перемещении из точки *1* с координатой y_1 в точку *2* с координатой y_2. Таким образом,

$$A = -mg(y_2 - y_1) = mg(y_1 - 2R).$$

По теореме о кинетической энергии работа силы тяжести равна изменению кинетической энергии. Так как скорость и кинетическая энергия шарика в точке *1* равны нулю, а кинетическая энергия в точке *2* равна $\frac{mv^2}{2}$, можно записать равенство: $mg(y_1 - 2R) = \frac{mv^2}{2}$.

Отсюда выражаем квадрат скорости шарика в верхней точке петли:

$$v^2 = 2g(y_1 - 2R).$$

В верхней точке петли на шарик действуют сила тяжести и сила реакции опоры, а ускорение является центростремительным: $a = \frac{v^2}{R}$.

Второй закон Ньютона в проекции на вертикальную ось запишется в виде

$$mg + N = m\frac{v^2}{R} \Rightarrow N = m\frac{2g(y_1 - 2R)}{R} - mg.$$

Чтобы сохранился контакт с поверхностью, сила реакции опоры должна быть не равна нулю, т. е. $N > 0$. Тогда $m\frac{2g(y_1 - 2R)}{R} - mg > 0$,

Из последнего неравенства получаем: $y_1 > 0{,}5R/2$.

Таким образом, высота горки должна быть не меньше $\frac{5}{2}R$.

ВЫВОДЫ

- Кинетическая энергия — энергия, которой обладают движущиеся тела. Кинетическая энергия равна половине произведения массы тела на квадрат его скорости.
- Теорема об изменении кинетической энергии: изменение кинетической энергии тела (материальной точки) равно работе сил, действующих на это тело.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Кинетическая энергия; теорема об изменении кинетической энергии

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Изменяется ли кинетическая энергия тела при изменении направления вектора его скорости?
2. В чём заключается физический смысл теоремы об изменении кинетической энергии?
3. Зависит ли кинетическая энергия тела от выбора системы отсчёта? Ответ обоснуйте.
4. Автомобиль массой m движется по дороге со скоростью v. Чему равна кинетическая энергия этого автомобиля с точки зрения наблюдателя, находящегося в другом автомобиле, который движется с вдвое меньшей скоростью в том же направлении?

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ § 47

НОВОЕ В УРОКЕ

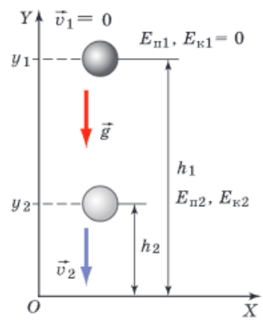
- При каких условиях механическая энергия системы сохраняется.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое работа?
- Что такое потенциальная энергия?
- Что такое кинетическая энергия?

Даже в повседневной жизни часто можно наблюдать, как потенциальная энергия превращается в кинетическую, а кинетическая — в потенциальную. Это позволяет вывести один из наиболее важных физических принципов — *закон сохранения механической энергии*.

ПРЕВРАЩЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. Превращение потенциальной энергии в кинетическую можно пояснить на следующем примере (см. рис.).



Пусть тело, первоначально покоящееся ($v_1 = 0$) на высоте h_1 относительно поверхности земли, начинает свободно падать вниз. Спустя некоторое время состояние тела будет характеризоваться высотой h_2 и скоростью v_2. Согласно формуле кинематики можно записать:

$$v_{2y}^2 - v_{1y}^2 = -2g(y_2 - y_1) = 2g(y_1 - y_2), \qquad (1)$$

где

$$y_1 - y_2 = h_1 - h_2. \qquad (2)$$

Изменение потенциальной энергии, взятое по модулю:

$$|E_{п2} - E_{п1}| = mg(h_1 - h_2).$$

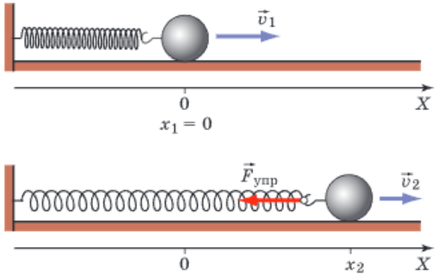
С учётом формул (1) и (2) и того, что $v_{1y} = 0$, получим

$$|E_{п2} - E_{п1}| = mg\frac{v_2^2}{2g} = \frac{mv_2^2}{2}.$$

Таким образом, **уменьшение потенциальной энергии тела равно приращению его кинетической энергии**.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. Из многочисленных наблюдений за превращениями энергии учёные сделали вывод: **энергия никогда не исчезает и не возникает из ничего, она только переходит из одного вида в другой и от одного тела к другому**. Это один из наиболее важных физических принципов — **закон изменения и сохранения энергии.**

Если на рассматриваемую систему тел никакие другие силы, кроме внутренних сил упругости или сил тяжести, не действуют, то работа этих сил определяет изменение потенциальной энергии системы. Поскольку речь идёт о законе сохранения механической энергии, то рассматриваются тела, которые взаимодействуют только друг с другом, образуя замкнутую систему. В результате взаимодействия этих тел могут изменяться как их скорости, так и координаты.



В качестве примера рассмотрим движение шарика, соединённого с одним концом упругой пружины, другой конец которой прикреплён к стенке. При этом поверхность, по которой движется шарик, будем считать гладкой.

Пусть в начальный момент времени деформация x_1 пружины равна нулю, а шарику сообщили начальную скорость $\vec{v}_1$. При движении шарика его кинетическая энергия будет убывать, поскольку действующая на него со стороны пружины сила упругости совершает отрицательную работу. Знак работы силы упругости свидетельствует о том, что потенциальная энергия пружины при этом увеличивается. Если в некоторый момент времени скорость шарика равна $\vec{v}_2$, то изменение его кинетической энергии

$$\Delta E_к = E_{к2} - E_{к1} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}. \quad (3)$$

Работа силы упругости $A_{упр}$ равна изменению потенциальной энергии пружины, взятому со знаком «минус»:

$$A_{упр} = -\Delta E_п = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right), \quad (4)$$

где x_2 — деформация пружины в рассматриваемый момент времени.

Работа силы упругости также равна изменению кинетической энергии шарика:

$$A_{упр} = \Delta E_к.$$

Поэтому с учётом формулы (4) можно записать:

$$\Delta E_к = -\Delta E_п, \quad \text{или} \quad \Delta E_к + \Delta E_п = 0.$$

Последнее равенство означает, что $\Delta(E_к + E_п) = 0$, т. е. изменение суммы кинетической и потенциальной энергий равно нулю. Сумма кинетической и потенциальной энергий системы называется **механической энергией системы:**

$$E = E_к + E_п = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}. \quad (5)$$

Так как изменение полной механической энергии равно нулю, то эта энергия остаётся постоянной:

$$E = E_к + E_п = \text{const}.$$

Таким образом, **в замкнутой системе, в которой действуют только силы тяжести и силы упругости, механическая энергия сохраняется**. В этом и заключается сущность одного из наиболее важных физических принципов — *закона сохранения энергии*.

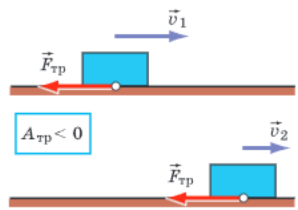
ВАЖНО

Закон сохранения механической энергии. В замкнутой системе, в которой действуют только силы тяжести и силы упругости, механическая энергия сохраняется.

Величайшие изобретения человечества — водяное колесо и ветряная мельница позволили преобразовывать энергию воды и ветра в механическую и электрическую. Позднее человек научился использовать для своих нужд солнечную энергию, энергию приливов и отливов и энергию геотермальных источников. Сегодня инженеры проектируют и создают современные технологии, которые позволят получать энергию от подводных течений, биотоплива и даже гроз.

РАБОТА СИЛ ТРЕНИЯ И ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. Проведём простой опыт по соскальзыванию бруска с наклонной плоскости. С какой бы высоты мы ни отпускали его и независимо от степени гладкости поверхности, по которой скользит брусок, его движение после соскальзывания обязательно прекратится. Возникают вопросы: куда делся запас потенциальной энергии, которой брусок обладал первоначально? Почему механическая энергия тела в конечном состоянии оказалась равной нулю?

Ни от координат, ни от взаимного расположения тел сила трения не зависит. Следовательно, работу силы трения нельзя выразить через изменение потенциальной энергии тела или системы тел. Вместе с тем работу силы трения можно вычислить, если воспользоваться теоремой об изменении кинетической энергии.



Рассмотрим случай, когда телу, лежащему на горизонтальной поверхности, толчком сообщили начальную скорость $\vec{v}_1$. При этом на тело со стороны плоскости будет действовать сила трения, направленная противоположно вектору скорости. Если через некоторое время скорость тела стала равной $\vec{v}_2$, то $|\vec{v}_2| < |\vec{v}_1|$. При этом работа силы трения

$$A_{\text{тр}} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2},$$

где m — масса тела.

Очевидно, что работа силы трения отрицательна.

В отличие от работы силы тяжести или силы упругости при движении тела под действием силы трения уменьшение кинетической энергии не приводит к её превращению в потенциальную энергию. Поэтому тело после остановки двигаться в обратном направлении не может, на это просто нет запаса механической энергии.

Рассмотренный выше случай замедления движения тела по горизонтальной поверхности под действием силы трения наглядно свидетельствует о нарушении закона сохранения механической энергии: кинетическая энергия тела уменьшается, а потенциальная взамен не появляется. Этот вывод носит общий характер: **в любых замкнутых системах, состоящих из макроскопических тел, механическая энергия обязательно убывает**. Действительно, максимальная высота подъёма мяча, отпущенного с некоторой высоты, после каждого следующего отскока от земли будет уменьшаться; пущенная по льду шайба обязательно остановится через некоторое время и т. д.

Вместе с тем убыль механической энергии не может происходить бесследно. На самом деле обычно тела нагреваются. Остаётся незыблемым **всеобщий закон сохранения энергии: энергия из механической переходит во внутреннюю энергию движения частиц, из которых состоят трущиеся тела**. Например, когда мы чиркаем спичкой по коробку, то в результате нагревания головка спички воспламеняется.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Когда водитель решает остановить машину, он нажимает на педаль тормоза. Но скорость не меняется мгновенно. Автомобилю требуется некоторое время, чтобы остановиться. Путь, который проходит транспортное средство от начала торможения до полной остановки, называется *тормозным путём*.

На всём пути торможения сила трения $F_{тр}$ совершает отрицательную работу:

$$A_{тр} = -F_{тр}s,$$

где s — тормозной путь.

По теореме о кинетической энергии работа силы трения равна изменению кинетической энергии: $A_{тр} = \Delta E_к$.

Если сначала автомобиль массой m двигался со скоростью v, то при торможении кинетическая энергия машины изменяется от максимального значения $\frac{mv^2}{2}$ до 0.

Поэтому $A_{тр} = -\frac{mv^2}{2}$, или $F_{тр}s = \frac{mv^2}{2}$.

Если автомобиль движется по ровной дороге, то $F_{тр} = \mu N = \mu mg$, где μ — коэффициент трения шин автомобиля о дорогу.

Тогда $\mu mgs = \frac{mv^2}{2}$, откуда $s = \frac{v^2}{2\mu g}$.

Тормозной путь пропорционален квадрату скорости, с которой автомобиль двигался до начала торможения. Таким образом, чем больше скорость движения автомобиля, тем длиннее будет его тормозной путь. Причём, если скорость автомобиля была больше в 2 раза, тормозной путь в случае экстренного торможения увеличится в 4 раза. Поэтому автомобили (и тяжёлые, и лёгкие), движущиеся с превышением скорости, представляют особую опасность на дороге.

Тормозной путь зависит также от коэффициента трения μ: на мокром асфальте тормозной путь будет больше, чем на сухом.

ВЫВОД

Закон сохранения механической энергии: в замкнутой системе, в которой действуют только силы тяжести и силы упругости, механическая энергия сохраняется.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Закон сохранения механической энергии; закон сохранения энергии

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что такое полная механическая энергия тела или системы тел?
2. Как формулируется закон сохранения механической энергии?
3. Как изменяется механическая энергия тела, когда на него действует сила трения скольжения?
4. В системе тел действует несколько сил трения. Может ли какая-либо из них совершать положительную работу?
5. В вагоне поезда на столике лежит брусок. Поезд плавно трогается и увеличивает свою скорость. За счёт работы какой силы у бруска появился запас кинетической энергии?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ § 48

ЗАДАЧА 1. Мяч массой 0,35 кг падает без начальной скорости с крыши высотного здания. Чему равен его импульс через 1 с после начала падения?

Дано:
$m = 0{,}35$ кг
$t = 1$ с

p — ?

Решение.

Скорость мяча можно найти по формуле
$v = v_0 + gt = gt$, так как $v_0 = 0$.
Тогда импульс мяча $p = mv = mgt$;
$p = 0{,}35$ кг $\cdot$ 10 м/с^2 $\cdot$ 1 с $= 3{,}5$ кг $\cdot$ м/с.

Ответ: 3,5 кг · м/с.

ЗАДАЧА 2. Мальчик массой 50 кг движется по дороге со скоростью 1 м/с на скейте, масса которого 5 кг. Мальчик спрыгивает со скейта в направлении, противоположном направлению движения, со скоростью 0,2 м/с относительно дороги. Определите скорость скейта сразу после того, как мальчик с него спрыгнул.

Дано:
$m = 5$ кг
$v = 1$ м/с
$m_1 = 50$ кг
$v_1 = 0{,}2$ м/с

v' — ?

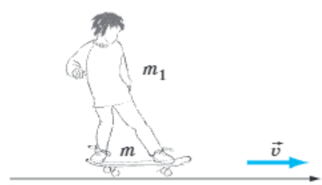
Решение.

Проведём координатную ось, направление которой совпадает с направлением движения скейта.

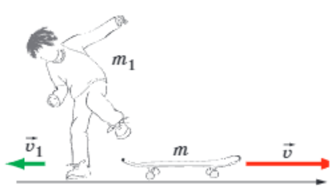
Запишем закон сохранения импульса:
$(m + m_1)\vec{v} = m\vec{v}' + m_1\vec{v}_1$.

Учитывая, что проекция векторов $\vec{v}$ и $\vec{v}'$ на ось OX положительна, а проекция вектора $\vec{v}_1$ на ось OX отрицательна, получим
$(m + m_1)v = mv' - m_1v_1$,

откуда $v' = \dfrac{(m + m_1)v + m_1v_1}{m}$;



До взаимодействия



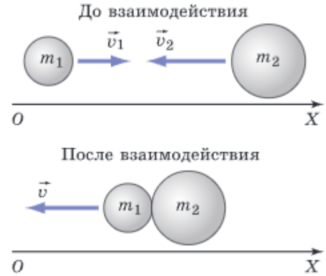
После взаимодействия

$$v' = \frac{(5\text{ кг} + 50\text{ кг}) \cdot 1\text{ м/с} + 50\text{ кг} \cdot 0{,}2\text{ м/с}}{5\text{ кг}} = 13\text{ м/с}.$$

Ответ: 13 м/с.

ЗАДАЧА 3. Шары массами 2 кг и 3 кг движутся навстречу друг другу со скоростями 1 м/с и 2 м/с соответственно. Определите значение и направление скорости шаров после абсолютно неупругого удара.

Дано:	Решение.
$m_1 = 2$ кг $m_2 = 3$ кг $v_1 = 1$ м/с $v_2 = 2$ м/с	Проведём координатную ось, направление которой совпадает с направлением движения первого шара.
v — ?	После абсолютно неупругого удара шары соединяются и двигаются как одно тело.



Запишем закон сохранения импульса:

$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = (m_1 + m_2)\vec{v}$.

С учётом проекций векторов скорости на ось OX получим

$m_1v_1 - m_2v_2 = (m_1 + m_2)v$,

откуда

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

$$v = \frac{2\text{ кг} \cdot 1\text{ м/с} - 3\text{ кг} \cdot 2\text{ м/с}}{2\text{ кг} + 3\text{ кг}} = -0{,}8\text{ м/с}.$$

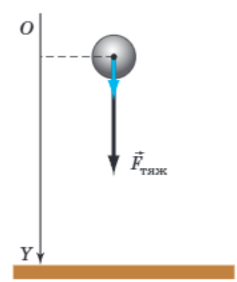
Знак «минус» означает, что шары будут двигаться в сторону, противоположную направлению оси OX.

Ответ: –0,8 м/с.

ЗАДАЧА 4. Рассмотрим задачу на движение тела под действием силы тяжести, которую решим тремя способами. С башни высотой 45 м свободно падает тело. Вычислите скорость тела в момент его падения на землю. Сопротивлением воздуха пренебрегаем.

Дано:	Решение.
$h = 45$ м	
v — ?	

1-й способ (с использованием уравнений кинематики)



Выберем систему координат, причём координатную ось направим вертикально вниз, а начало отсчёта выберем на вершине башни.

В момент удара о землю координата тела $y = h$.

Поскольку на тело действует только сила тяжести, то оно движется с ускорением $a = g$.

Запишем уравнения кинематики:

$$y = \frac{at^2}{2} = \frac{gt^2}{2}; \quad v_y = v_{0y} + gt.$$

Так как $v_{0y} = 0$, то $v_y = gt$.

$$h = \frac{gt^2}{2} \;\Rightarrow\; t = \sqrt{\frac{2h}{g}};$$

$$v_y = g\sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{2gh}.$$

2-й способ (с использованием второго закона Ньютона)
Согласно второму закону Ньютона запишем изменение импульса тела:

$\Delta p_y = F\Delta t$, где $F = mg$; $\Delta t = t = \sqrt{\dfrac{2h}{g}}$;
$\Delta p_y = mv_y - mv_{0y} = mv_y$.

Получим: $mv_y = mg\sqrt{\dfrac{2h}{g}} \Rightarrow v_y = \sqrt{2gh}$.

3-й способ (с использованием закона сохранения энергии)
Вычислим работу, которую совершит сила тяжести при падении тела:

$A = mgs$, где $s = h$ — перемещение тела.

Учитывая, что $h = \dfrac{gt^2}{2}$, получим:

$A = mgh = \dfrac{m}{2}(gt)^2 = \dfrac{mv^2}{2}$, поскольку $v_y = v = gt$.

Таким образом, мы пришли к закону сохранения механической энергии: потенциальная энергия тела, поднятого над землёй, превратилась в его кинетическую энергию: $mgh = \dfrac{mv^2}{2}$. Следовательно, $v_y = \sqrt{2gh}$.

$$v_y = \sqrt{2 \cdot 10\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 45\ \text{м}} = 30\ \text{м/с}.$$

Ответ: 30 м/с.

ЗАДАЧА 5. Хоккейная шайба проскользит 5 м, если ей при ударе сообщить начальную скорость 2 м/с. Какой путь проскользит шайба, если ей сообщить начальную скорость 5 м/с?

Дано:	Решение.
$s_1 = 5$ м $v_{01} = 2$ м/с $v_{02} = 5$ м/с	На шайбу в горизонтальном направлении действует сила трения, направленная против движения. Работа, совершённая силой трения,
s_2 — ?	$A = -F_{\text{тр}}s$, где s — путь, пройденный шайбой. Изменение кинетической энергии шайбы равно совершённой над ней работе: $\Delta E_{\text{к}} = \dfrac{mv^2}{2} - \dfrac{mv_0^2}{2} = -F_{\text{тр}}s$.

Учитывая, что v_0 — начальная скорость шайбы, а v — её конечная скорость, получим:

$$s = \frac{m\left(v_0^2 - v^2\right)}{2F_{\text{тр}}}.$$

Поскольку $v = 0$, то для всех случаев броска шайбы запишем:

$$s_1 = \frac{mv_{01}^2}{2F_{\text{тр}}}, \quad s_2 = \frac{mv_{02}^2}{2F_{\text{тр}}}.$$

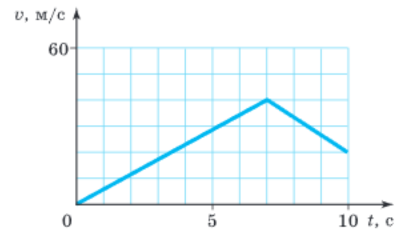
Следовательно, $\dfrac{s_1}{s_2} = \dfrac{v_{01}^2}{v_{02}^2}$.

Из последней формулы находим

$$s_2 = s_1\frac{v_{02}^2}{v_{01}^2}; \quad s_2 = 5\ \text{м} \cdot \frac{(5\ \text{м/с})^2}{(2\ \text{м/с})^2} \approx 31{,}3\ \text{м}.$$

Ответ: 31,3 м.

Задачи для самостоятельного решения



1 Пловец массой 70 кг оттолкнулся от края бассейна с силой 2 кН. Какую скорость приобрёл пловец при таком толчке, если он длился 0,08 с?

2 По графику, изображённому на рисунке, определите изменение импульса тела массой 250 кг за 10 с.

3 Шарик массой 50 г свободно упал на горизонтальную плоскость, имея в момент удара скорость 10 м/с. Определите модуль изменения импульса шарика при абсолютно упругом и абсолютно неупругом ударах. Вычислите среднюю результирующую силу, действующую на шарик во время удара, если упругий удар длился 0,01 с, а неупругий — 0,05 с.

4 Пуля массой 10 г вылетает из винтовки в горизонтальном направлении и застревает в деревянном бруске массой 5 кг. После соударения брусок начинает двигаться со скоростью 0,8 м/с. Определите скорость пули до соударения.

5 Пуля массой 5 г вылетает из винтовки в горизонтальном направлении со скоростью 800 м/с, попадает в покоящийся пластмассовый шарик массой 50 г, подвешенный на нити, и пробивает его. После вылета из шара скорость пули уменьшилась вдвое. Определите скорость шарика после взаимодействия с пулей. Удар считайте центральным.

6 Мальчик массой 35 кг бежит по дороге со скоростью 2 м/с и запрыгивает на скейт, движущийся навстречу ему со скоростью 1 м/с. Определите скорость скейта после того, как мальчик на него запрыгнул. Масса скейта 2 кг.

7 Двухступенчатая ракета-носитель общей массой 450 т летит со скоростью 6,5 км/с. Определите скорость ракеты после того, как от неё отделится вторая ступень массой 60 т со скоростью 2,7 км/с.

8 Ящик массой 30 кг тянут за верёвку так, что он начинает двигаться с ускорением 0,3 м/с^2. Определите работу силы тяги на 10 м пути, если угол между направлением силы и движением составляет 30°, а сила трения равна 3 Н.

9 Недеформированную пружину растягивают на 5 см, а затем ещё на 5 см. Сравните работы силы упругости в первом и втором случаях.

10 Сравните работы силы тяжести при свободном падении тела за первую и вторую половины времени падения.

11 С какой начальной скоростью нужно бросить вниз мяч с высоты 1 м, чтобы после абсолютно упругого удара он подпрыгнул на высоту 2 м? Сопротивление воздуха не учитывайте.

12 Спортсмен по прыжкам в воду прыгает с трамплина высотой 5 м над поверхностью воды вертикально вверх со скоростью 5 м/с. С какой скоростью спортсмен входит в воду при прыжке? Определите среднюю силу сопротивления воды, если он после прыжка погружается на глубину 3 м. Масса спортсмена 50 кг.

13 Лыжник скатывается с горы и в конце спуска имеет скорость 12 м/с. Какой путь он сможет проехать по горизонтальной поверхности до полной остановки, если коэффициент трения между лыжами и снегом 0,15? Масса лыжника с лыжами 80 кг.

ЛАБОРАТОРНЫЕ И ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ § 49

Лабораторная работа № 4

Опытная проверка закона сохранения импульса

Цель работы

Опытным путём проверить выполнение закона сохранения импульса при прямом центральном соударении тел.

Оборудование и материалы

2 лабораторных штатива, 2 стальных шарика, массы которых заметно различаются, 2 нити, электронные весы, 2 линейки.

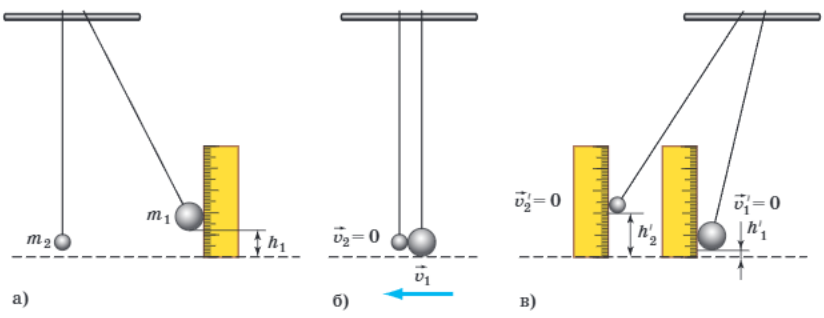
Теоретическая справка

По закону сохранения импульса сумма импульсов сталкивающихся тел до взаимодействия равна сумме их импульсов после взаимодействия:

$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_1{}' + \vec{p}_2{}'$.

Если в результате центрального столкновения оба шара после столкновения начинают двигаться вдоль одной прямой в одном направлении, то закон сохранения импульса можно записать в скалярном виде:

$p_1 + p_2 = p_1{}' + p_2{}'$, или $m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v_1{}' + m_2v_2{}'$.



а) начальное положение системы;
б) момент столкновения шаров;
в) конечное положение системы.

По закону сохранения энергии найдём скорость шара *1* непосредственно перед его столкновением с покоящимся шаром *2*:

$$\frac{m_1v_1^2}{2} = m_1gh_1 \;\Rightarrow\; v_1 = \sqrt{2gh_1},$$

где v_1 — скорость шара *1* в нижней точке движения; h_1 — высота, на которой находится шар относительно начального положения.

По закону сохранения энергии найдём скорости шаров сразу после столкновения в предположении, что мы знаем h_1' и h_2' — максимальные высоты, на которые поднимутся шарики после взаимодействия:

$$\frac{m_1 v_1'^2}{2} = m_1 g h_1' \Rightarrow v_1' = \sqrt{2gh_1'}; \qquad \frac{m_2 v_2'^2}{2} = m_2 g h_2' \Rightarrow v_2' = \sqrt{2gh_2'}.$$

Зная скорости шаров до и после взаимодействия, можно найти их импульсы: до взаимодействия:

$$p_1 = m_1 v_1 = m_1\sqrt{2gh_1}; \quad p_2 = 0;$$

после взаимодействия:

$$p_1' = m_1 v_1' = m_1\sqrt{2gh_1'}; \quad p_2' = m_2 v_2' = m_2\sqrt{2gh_2'}.$$

Ход работы

- С помощью весов измерьте массы шаров m_1 и m_2.
- Закрепите нити шаров в зажимах штативов таким образом, чтобы шары касались друг друга и их центры находились на одной горизонтали.

Примечание: в силу специфики измерений данная работа выполняется двумя учащимися.

- Отклоните нить с более тяжёлым шаром *1* на некоторый угол и с помощью линейки измерьте высоту h_1 над нижайшим положением шара. Следите, чтобы нити шаров были в одной вертикальной плоскости.
- Отпустив шар *1*, измерьте высоты h_1' и h_2', соответствующие положениям максимальных отклонений шаров после их соударения.
- Повторите опыт 3 раза и найдите средние значения высот h_1' и h_2'.
- По измеренным значениям высот h_1, h_1' и h_2' вычислите скорость v_1 первого шара перед столкновением, а также скорости v_1' и v_2' шаров сразу после их столкновения.
- Вычислите импульсы шаров p_1, p_1' и p_2'.
- Результаты измерений и вычислений запишите в таблицы в своей тетради.

№ опыта	h_1, м	h_1', м	h_2', м	$h_{1ср}'$, м	$h_{2ср}'$, м

m_1, кг	m_2, кг	v_1, м/с	p_1, кг · м/с	v_1', м/с	v_2', м/с	p_1', кг · м/с	p_2', кг · м/с

- Проверьте выполнение равенства $p_1 = p_1' + p_2'$.
- Сделайте вывод.

Практическая работа-исследование

Изучаем законы сохранения

ОПЫТНАЯ ПРОВЕРКА ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Закон сохранения механической энергии говорит о том, что механическая энергия замкнутой системы тел сохраняется. Проведём серию опытов, чтобы понять, какие факторы могут оказывать влияние на результаты измерений при опытной проверке выполнения закона сохранения энергии.

Цель работы

Проверить выполнение закона сохранения энергии тремя различными способами: в опытах с движением бруска, шарика и тележки на магнитной подвеске с наклонной плоскости.

ПОМОЩНИК

- В качестве оборудования можно использовать штатив, жёлоб, пластмассовый шарик, наклонную плоскость, брусок, электронный таймер, снабжённый фотоэлектрическими датчиками, тележку на магнитной подвеске, магнитную дорожку и линейку.

Примечание.

Для проверки выполнения закона сохранения энергии необходимо проверить равенство потенциальной энергии тела в начале опыта и кинетической энергии тела после скатывания с наклонной плоскости:

$$mgh = \frac{mv^2}{2}.$$

Так как значение массы стоит в правой и левой частях равенства, её можно сократить и проверить условие: $gh = \frac{v^2}{2}$.

- Укрепите жёлоб в наклонном положении при помощи штатива. Установите оптические датчики электронного таймера рядом друг с другом на горизонтальном участке пути. Измерьте расстояние d между датчиками.
- Проведите опыт со скольжением гладкого бруска по жёлобу. С помощью электронного таймера определите время прохождения бруска между датчиками.
- Результаты измерений и вычислений заносите в таблицу в своей тетради.
- Повторите опыт 3 раза. Определите среднее время движения.
- Считая движение бруска по горизонтальному участку пути равномерным, вычислите скорость движения бруска.
- С помощью линейки измерьте высоту h, с которой соскальзывает брусок, относительно горизонтального участка жёлоба.
- Выполнив расчёты, проверьте выполнение закона сохранения энергии для соскальзывания бруска с жёлоба. Чем можно объяснить полученные результаты? Сделайте вывод.
- Проведите описанный выше опыт со скатыванием шарика по жёлобу. С помощью электронного таймера определите время прохождения шарика между датчиками.
- Повторите опыт 3 раза. Определите среднее время движения.
- Выполнив расчёты, проверьте выполнение закона сохранения энергии для скатывания шарика с жёлоба. Чем можно объяснить полученные результаты? Сделайте вывод.
- Проведите опыт со скатыванием тележки на магнитной подвеске с магнитной дорожки. Для этого установите магнитную дорожку под небольшим углом. На нижний участок магнитной дорожки установите рядом друг с другом оптические датчики электронного таймера. Измерьте расстояние d между датчиками.
- С помощью электронного таймера определите время прохождения тележки между датчиками.
- Считая движение тележки между датчиками равномерным, вычислите скорость движения тележки.

- С помощью линейки измерьте высоту h, с которой скатывается тележка.
- Выполнив расчёты, проверьте выполнение закона сохранения энергии для скатывания тележки по магнитной дорожке. Сделайте вывод.
- Какой из опытов оказался наиболее подходящим для проверки закона сохранения энергии?

№ опыта	d, м	t, мс	v, м/с	h, м	gh, (м/с)^2	$\frac{v^2}{2}$, (м/с)^2

КЕЙС

ИССЛЕДУЕМ ЯВЛЕНИЕ СРЫВА

На уроке физики при изучении сил трения учитель рассказал учащимся о так называемом *явлении срыва*, которое можно наблюдать с помощью простого опыта. Для этого учитель положил нагруженный перегрузками деревянный брусочек на деревянную дощечку трибометра и прикрепил к нему динамометр. Постепенно увеличивая силу натяжения пружины динамометра, учитель продемонстрировал, что при некотором значении силы натяжения брусочек резко сорвался с места и начал скользить по дощечке.

«Вы, наверно, замечали, — сказал учитель, — что сдвинуть с места тяжёлый ящик действительно труднее, чем двигать его дальше по полу».

Явление срыва обусловлено наличием большого числа шероховатостей и зазубрин между соприкасающимися поверхностями, для разрыва связей между которыми на этапе начала движения требуется несколько большее усилие, чем для последующего равномерного скольжения. Это качественная сторона явления. Но показанный опыт с брусочком и динамометром позволяет получить и некоторые количественные оценки.

С помощью описанного выше опыта проделайте все необходимые измерения и получите оценку как максимального значения коэффициента трения покоя, так и значения коэффициента трения скольжения брусочка по деревянной линейке.

Этапы выполнения задания

- В качестве оборудования вам понадобятся: деревянная линейка, деревянный брусочек и набор разновесов из комплекта «Механика», электронные весы, линейка для проведения измерений, миллиметровая бумага.
- С помощью весов определите массу M брусочка и суммарную массу m перегрузков, помещаемых на брусочек (с точностью 0,1 г).
- Прикрепите динамометр к крючку брусочка и постепенно увеличивайте силу $F_{\text{упр}}$ натяжения пружины динамометра, измеряя при этом значения x деформации пружины (выполните 4—5 измерений, вплоть до срыва брусочка).
- Результаты измерений записывайте в таблицу в своей тетради.
- Как можно более точно определите показание динамометра $F_{\max}$, соответствующее срыву брусочка, и значение деформации пружины $x_{\max}$. Значение $F_{\max}$, очевидно, равно максимальному значению силы трения покоя: $F_{\text{тр max}} = F_{\max}$.

КЕЙС

- Сразу после срыва брусочек движется с замедлением и останавливается. При этом сила натяжения пружины имеет некоторое значение $F_{упр1}$, равное силе трения покоя $F_{тр1}$. Значение $F_{тр1}$ силы трения покоя и соответствующее значение x_1 деформации пружины запишите в таблицу.
- Запишем закон сохранения энергии с учётом работы, совершённой против сил трения:

$$\frac{kx_{max}^2}{2} = |A_{тр}| + \frac{kx_1^2}{2}, \quad \text{где} \quad |A_{тр}| = \mu_{max}(m + M)g(x_{max} - x_1).$$

Учитывая, что $\frac{kx_{max}^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2} = \frac{k}{2}(x_{max} + x_1)(x_{max} - x_1)$,

из записанных равенств получим:

$$x_{max} + x_1 = 2\mu_{max}\frac{(m + M)g}{k}.$$

Поскольку коэффициент упругости пружины $k = \frac{F_{тр.\,max}}{x_{max}}$, из последнего равенства находим:

$$\mu_{max} = \frac{F_{тр.\,max}(x_{max} + x_1)}{2(m + M)gx_{max}}.$$

- Перемещая медленно и равномерно брусочек по линейке, измерьте силу трения скольжения $F_{тр.\,ск}$ и деформацию пружины x_0.
- Найдите коэффициент трения скольжения: $\mu_{ск} = \frac{F_{тр.\,ск}}{2(m + M)g}$.
- Вычисленные и измеренные значения физических величин запишите в таблицу в своей тетради.

№	$F_{тр.\,пок} = F_{упр}$, Н	$F_{тр.\,max}$, Н	x, см	x_{max}, см	$F_{тр1}$, Н	x_1, см	$F_{тр.\,ск}$, Н	x_0, см	μ_{max}	$\mu_{ск}$

- По результатам из таблицы постройте график зависимости $F_{тр} = F_{тр}(x)$.
- На основе проведённого анализа сделайте выводы.

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Векторная физическая величина, равная произведению массы тела на скорость его движения, называется импульсом тела.
- Импульс силы равен изменению импульса тела.
- Векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, остаётся постоянной при любых движениях и взаимодействиях тел этой системы.

- При взаимодействии телá могут отскакивать друг от друга (абсолютно упругий удар) или соединяться вместе и двигаться как одно целое (абсолютно неупругий удар).
- Реактивным движением называется движение тела, возникающее при отделении от него с какой-либо скоростью некоторой его части.
- Реактивное движение используется для полётов в космос.
- Работа постоянной силы равна произведению модулей силы и перемещения точки приложения силы и косинуса угла между ними.
- Мощность — это физическая величина, равная отношению работы к интервалу времени, за который эта работа совершена.
- Если тело или система тел посредством действующих на них сил способны совершать работу, то говорят, что они обладают энергией.
- Потенциальная энергия — это энергия, которая определяется взаимным положением взаимодействующих тел или частей одного и того же тела.
- Кинетическая энергия — энергия, которой обладают движущиеся тела. Кинетическая энергия равна половине произведения массы тела на квадрат её скорости.
- Теорема об изменении кинетической энергии: изменение кинетической энергии тела (материальной точки) равно работе сил, действующих на это тело.
- Закон сохранения механической энергии: в замкнутой системе, в которой действуют только силы тяжести и силы упругости, механическая энергия сохраняется.

Вопросы для обсуждения

? По доске, лежащей на гладкой поверхности, начинает скользить брусочек, и через некоторое время из-за трения его скольжение относительно доски прекращается. Можно ли для определения конечной скорости доски и брусочка использовать закон сохранения импульса?

? Воздушный шар поднимается вверх. При этом его потенциальная энергия увеличивается. За счёт чего это происходит?

? Пружинный пистолет стреляет шариками известной массы. Как, пользуясь только одной линейкой, определить жёсткость пружины?

Темы исследовательских и проектных работ

- История покорения космоса.
- Устройство современных ракет.
- Фотонный двигатель: реальность или фантастика?
- Учёт закона сохранения импульса в технических устройствах.
- Работа и мощность технических устройств.
- Самые мощные машины.
- Откуда берётся и куда девается энергия?

Глава 6

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

...Каждая частица вещества, в котором распространяется волна, должна сообщать своё движение не только ближайшей частице... но необходимо сообщает его также и всем другим частицам, которые касаются её и препятствуют её движению...

Х. Гюйгенс

§ 50 МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ. ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое колебательные движения.
- Что такое колебательная система.
- Что такое свободные и вынужденные колебания.
- Что такое период и частота колебаний.
- Что такое амплитуда колебаний.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое неравномерное движение?
- Какие системы называются замкнутыми?
- Что такое период и частота обращения и как они связаны между собой?

В жизни мы часто наблюдаем движения, которые повторяются с течением времени. Один из примеров повторяющегося движения — движение по окружности. Наблюдая за движением маятника часов, движением качелей, колебаниями струн музыкального инструмента и т. п., можно заметить нечто общее во всех этих примерах — многократное повторение одного и того же цикла движений.

ПЕРИОДИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ. **Колебательное движение** — это движение, которое точно или приблизительно повторяется через одинаковые промежутки времени, при этом тело поочерёдно отклоняется то в одну, то в другую сторону от положения равновесия. В реальных условиях точного повторения движения не всегда можно добиться. Однако в некоторых случаях отклонения от точного повторения настолько малы, что ими можно пренебречь и считать движение *периодическим*.

В процессе колебаний изменяются также и физические величины, характеризующие это движение. Движения, при которых значения физических величин, изменяющихся в процессе колебаний, повторяются через равные промежутки времени, называются **периодическими.**

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Колебательные процессы, происходящие в природе, не обязательно являются механическими. Например, некоторые закономерности можно наблюдать для изменения температуры воздуха: днём температура повышается, а ночью — понижается. Поэтому можно говорить о *суточном колебании температуры*. Также метеорологи изучают *годовые колебания температур*.

Во время *приливов* и *отливов*, возникающих в результате взаимного притяжения Земли и Луны, происходят колебания уровня воды в морях и океанах. *Землетрясения* — это колебания земной поверхности, вызванные процессами, происходящими в литосфере.

СВОБОДНЫЕ И ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ. Механическое движение, которое совершают, например, качели или тело, подвешенное на пружине, называется *колебательным*. Так, например, если толкнуть качели, они будут продолжать раскачиваться некоторое время уже без нашего воздействия на них. Почему это происходит?

Первоначально была совершена механическая работа, в результате качели отклонились от положения равновесия и их потенциальная энергия увеличилась.

Под действием силы тяжести, возвращающей качели в положение равновесия, они могут совершать колебательные движения. Отличительной особенностью такого типа движения является то, что оно может совершаться без воздействия периодических внешних сил. Колебания, происходящие только за счёт начального запаса энергии, называются **свободными колебаниями.**

В отличие от свободных колебаний, **вынужденные колебания** происходят в случае, когда на тело или совокупность тел *периодически* действует некоторая внешняя сила. Примером вынужденных колебаний может служить такое движение качелей, когда их постоянно раскачивают.

КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА. Системы тел, которые способны совершать колебания, называются **колебательными системами.**

У всякой системы, способной совершать свободные колебания, имеется устойчивое *положение равновесия*. Например, у грузика на нитке — это то положение, при котором центр тяжести грузика находится на вертикали под точкой подвеса. Если мы выведем грузик из состояния равновесия или толкнём его, то он начнёт колебаться, отклоняясь то в одну, то в другую сторону от положения равновесия. При этом в процессе колебаний на тело будет действовать сила, которая возвращает это тело в положение равновесия.

ПЕРИОД И ЧАСТОТА КОЛЕБАНИЙ. При колебательном движении все положения колеблющегося тела периодически повторяются. Время, за которое совершается одно полное колебание, называется **периодом колебаний.**

Период колебаний обозначают буквой T и в СИ измеряют в *секундах*.

Аналогично периоду и частоте обращения тела по окружности колебательное движение характеризуется не только периодом, но и частотой. **Частота колебаний** — это физическая величина, равная числу колебаний в единицу времени. Частоту колебаний обозначают греческой буквой ν.

Если период колебаний $T = 0{,}2$ с, то это означает, что продолжительность одного полного колебания составляет $^2/_{10}$, или $^1/_5$ с. Тогда за секунду тело совершит пять колебаний, т. е.

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{0{,}2}\frac{1}{\text{с}} = 5\ \text{с}^{-1}.$$

Таким образом, **частота колебаний является величиной, обратной периоду колебаний.** Единицей частоты колебаний является одно колебание в секунду, т. е. 1/с, или с^{-1}. Эта единица называется *герц* (Гц) в честь немецкого учёного Г. Герца:

$$1\ \text{Гц} = 1\ \text{с}^{-1}.$$

1 Гц — это частота таких колебаний, при которых за 1 с совершается одно полное колебание.

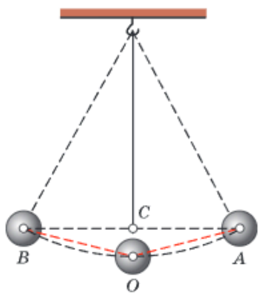
Генрих Рудольф Герц
(1857—1894)

ВАЖНО

Если обозначить величины: частота колебаний — ν, период колебаний — T, то связь между этими физическими величинами можно выразить дробью:

$$\nu = \frac{1}{T}.$$

АМПЛИТУДА КОЛЕБАНИЙ. Ещё одной характеристикой колебательного движения является **амплитуда колебаний** — наибольшее по модулю смещение тела от положения равновесия.



Амплитуду механических колебаний обозначают буквой A и измеряют в единицах длины — *метрах*, *сантиметрах* и т. д.

Как показывает опыт, амплитуда колебаний зависит от начального отклонения тела от положения равновесия, а также от того, какая скорость сообщается при этом телу.

Если в качестве колебательной системы рассматривать груз, подвешенный на нити, то в качестве амплитуды надо взять либо длину дуги OA, либо длину отрезка OA, либо длину отрезка AC (половина хорды BA). Дело в том, что для малых амплитуд (много меньших длины нити) эти длины различаются очень мало.

ВЫВОДЫ

- Механическое движение, которое точно или приблизительно повторяется через равные промежутки времени, называется механическими колебаниями.
- Колебания, происходящие только за счёт первоначального запаса энергии системы, называются свободными колебаниями.
- Колебания могут быть свободными и вынужденными.
- Механические колебания характеризуются периодом, частотой и амплитудой колебаний.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Периодическое движение; механические колебания; свободные колебания; вынужденные колебания; колебательная система; период и частота колебаний; амплитуда колебаний

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что такое колебательная система? Приведите примеры колебательных систем.
2. Являются ли примерами колебательного движения:
   1) движение велосипедиста по велотреку;
   2) движение трактора, вспахивающего поле;
   3) колебания маятника настенных часов;
   4) движение щётки пылесоса во время уборки комнаты;
   5) движение поезда, курсирующего между Санкт-Петербургом и Москвой;
   6) движение иглы швейной машины?
3. Что такое свободные и вынужденные колебания?
4. Провода линии электропередачи раскачиваются под действием ветра. Являются ли эти колебания свободными?
5. Что такое период и частота колебаний?
6. Что такое амплитуда колебаний?

ПРУЖИННЫЙ И МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МАЯТНИКИ § 51

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое пружинный маятник.
- Что такое математический маятник.
- Как выглядит график колебательного движения.

В качестве простейших колебательных систем рассмотрим пружинный и математический маятники.

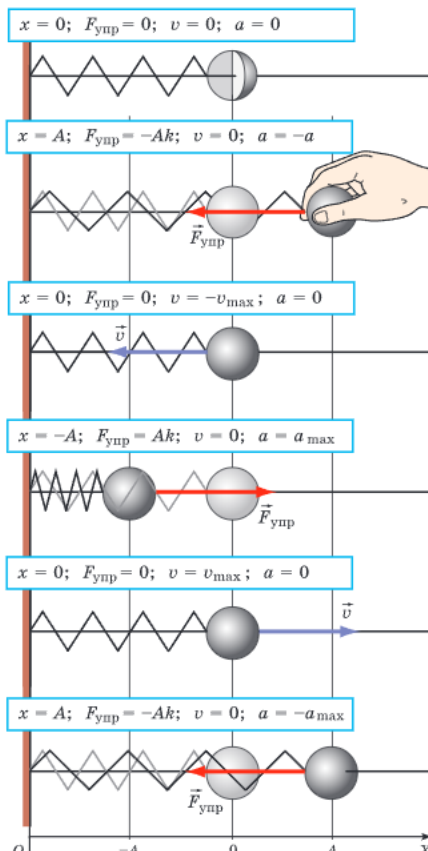
ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое колебательная система?
- Что такое равнодействующая сила?
- Правило параллелограмма для суммы векторов.

ПРУЖИННЫЙ МАЯТНИК. *Пружинный маятник* состоит из груза, пружины, стойки, к которой прикреплён левый конец пружины, и стержня, вдоль которого может двигаться груз практически без трения. При этом масса пружины много меньше массы груза, поэтому массой пружины пренебрегают. Груз (шарик с отверстием) может скользить по проходящему через отверстие гладкому стержню. Пока пружина не деформирована, сила упругости на тело не действует. Сила тяжести уравновешена силой реакции опоры. Поэтому груз находится в *положении равновесия*.

Направим ось OX вдоль стержня, выбрав в качестве начала отсчёта точку, определяющую положение равновесия груза. В этом положении сила упругости, скорость груза и его ускорение равны нулю.

Выведем груз из положения равновесия, растянув пружину на некоторое расстояние A. На груз будет действовать сила упругости пружины $\vec{F}_{упр}$, которая, согласно закону Гука, зависит от коэффициента жёсткости пружины k, пропорциональна смещению (отклонению груза от положения равновесия) и направлена к положению равновесия. Если груз отпустить, то под действием этой силы он начнёт двигаться к положению равновесия. При этом в положении, соответствую-



щем наибольшему растяжению пружины, груз будет обладать максимальным ускорением, так как в этом положении сила упругости максимальна. Направление силы упругости и направление вызванного ею ускорения совпадают с направлением скорости груза. Поэтому по мере приближения к положению равновесия его скорость всё время возрастает, достигая своего максимального значения. В положении равновесия сила упругости равна нулю и, следовательно, равно нулю и ускорение.

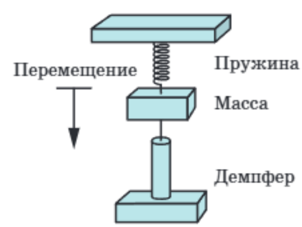
Далее тело продолжает своё движение по инерции. Поскольку пружина сжимается, в ней опять возникает сила упругости, которая направлена вправо, к положению равновесия. Поэтому скорость тела уменьшается, и оно останавливается в крайнем левом положении, характеризуемым координатой $x = -A$. В крайнем левом положении сила упругости максимальна и направлена к положению равновесия. Поэтому сразу после остановки тело вновь начнёт движение. Груз снова пройдёт положение равновесия, но уже слева направо и опять отклонится от него на расстояние A, т. е. вернётся в точку, откуда началось движение.

Таким образом, груз совершит одно полное колебание. Далее процесс повторится.

Одно из основных свойств всех колебательных систем заключается в том, что возникает периодически изменяющаяся сила, пропорциональная смещению тела, возвращающая систему в положение устойчивого равновесия.

В пружинном маятнике колебания совершаются под действием внутренней силы — силы упругости (сила трения пренебрежимо мала). Следовательно, свободные колебания — это колебания, происходящие под действием внутренних сил.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ



Пружинные маятники широко используются в работе таких приборов, как *акселерометры*, которые применяются в науке, промышленности, системах навигации, а также в современных гаджетах. Акселерометры предназначены для измерения *кажущегося ускорения*, т. е. разности истинного ускорения тела и ускорения свободного падения.

Простейший акселерометр представляет собой массивный груз, закреплённый на пружине. Демпфер, прикреплённый к нижней части груза, гасит возникающие колебания. Когда устройство ускоряется, груз на короткое время сохраняет своё первоначальное положение, и пружина деформируется. По деформации пружины прибор вычисляет ускорение.

Акселерометры могут фиксировать минимальные изменения ускорения и тем самым помогают определять положение устройства в пространстве. Поэтому в планшетах и смартфонах в зависимости от положения устройства изменяется ориентация изображения на экране. В системах навигации и наведения, использующих режим автопилота (например, на самолётах, кораблях, беспилотных аппаратах), акселерометры способствуют стабилизации движения. Акселерометры, встроенные в автомобили, при внезапном изменении скорости сигнализируют об опасности и заставляют раскрываться подушки безопасности

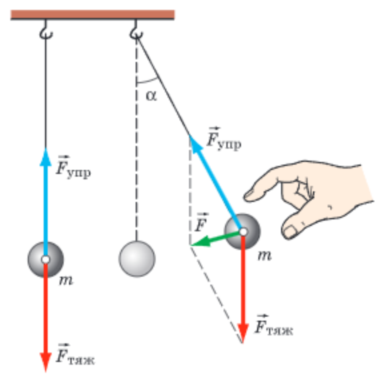
ФИЗИЧЕСКИЙ МАЯТНИК. Линейка, висящая на гвоздике, маятник часов, груз на верёвке, качели — всё это колебательные системы. Любая из этих систем способна совершать свободные колебания около положения равновесия. У всех этих колебательных систем возвращающая сила возникает в результате действия силы тяжести.

Колебательные системы, подобные грузу на верёвке или качелям, представляют собой физические тела, которые совершают колебания относительно точки подвеса или опоры. Такие системы называются **физическими маятниками.**

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МАЯТНИК. *Нитяной маятник* — это грузик малого размера, подвешенный на длинной тонкой нити. Изучая нитяной маятник, нить считают нерастяжимой, а массой нити и размерами грузика пренебрегают. Такая модель называется *математическим маятником*.

ВАЖНО

Математическим маятником называется точечное тело, подвешенное на тонкой нерастяжимой нити.



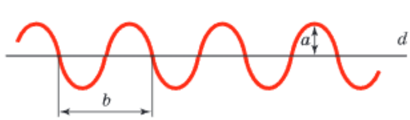
В данном случае колебательной системой является нить, подвешенное на ней тело, штатив, на котором нить закреплена, и Земля.

Рассмотрим рисунок с маятником. На покоящийся грузик, подвешенный на нити, действуют две силы: сила тяжести $\vec{F}_{тяж}$ и сила упругости $\vec{F}_{упр}$, которые уравновешивают друг друга. Если отклонить маятник от положения равновесия, то силы тяжести и упругости будут направлены под углом друг к другу, а их равнодействующая $\vec{F}$ уже не будет равна нулю. Действительно, равнодействующая сила равна векторной сумме всех сил, действующих на тело:

$$\vec{F} = \vec{F}_{тяж} + \vec{F}_{упр}.$$

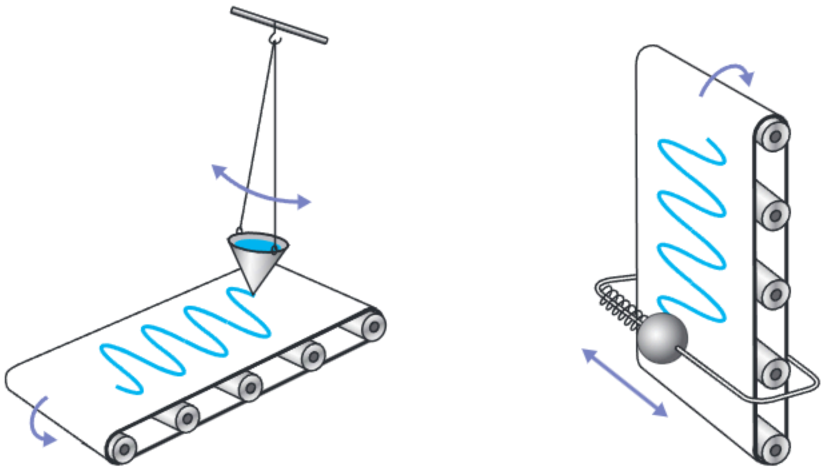
Так как складываемые векторы направлены не вдоль одной прямой, их сумму можно найти по правилу параллелограмма. Под действием силы $\vec{F}$ маятник начнёт двигаться к положению равновесия. По инерции груз пройдёт положение равновесия и отклонится от него в другую сторону. Дойдя до своего крайнего положения, маятник под действием равнодействующей сил начнёт вновь двигаться к положению равновесия. Пройдя его, он опять отклонится. Далее процесс будет повторяться.

ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ. Если в качестве маятника использовать воронку с песком или красящей жидкостью, а под колеблющимся маятником равномерно перемещать бумажную ленту, на ней останется характерный след. Вычерченная на ленте за некоторый промежуток времени кривая будет выглядеть так, как показано на рисунке.



Амплитуде колебаний здесь будет соответствовать расстояние a, которое показывает наибольшее отклонение кривой от прямой d, соответствующей положению равновесия маятника. Расстояние b соответствует расстоянию, на которое переместится бумажная лента за время, равное периоду колебаний воронки.

Аналогичный вид имеет графическое изображение колебаний и для пружинного маятника.



ВЫВОДЫ

- Простейшими колебательными системами являются пружинный и математический маятники.
- Свободные колебания — это колебания, происходящие под действием внутренних сил.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Пружинный маятник; математический маятник; физический маятник

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что такое пружинный маятник?
2. Что такое математический маятник?
3. Провода линии электропередачи раскачиваются под действием ветра. Являются ли эти колебания свободными?
4. Как выглядит график колебательного движения?
5. Приведите примеры объектов окружающего мира, которые можно считать маятниками.

ПЕРИОД КОЛЕБАНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА § 52

НОВОЕ В УРОКЕ

- От чего зависит период колебаний математического маятника.
- Как вычислить период колебаний математического маятника.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое пружинный и математический маятники?
- Каковы основные характеристики колебательного движения?

Наблюдая в Пизанском соборе за качанием подвешенной на длинной цепи центральной люстры со свечами (паникадила), которую толкнули при зажигании свечей, Г. Галилей обратил внимание на то, что амплитуда колебаний постепенно уменьшалась, но период оставался одним и тем же.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ КОЛЕБАНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА. В соборе Г. Галилей наблюдал за колебательной системой, которую приближённо можно считать математическим маятником. Для того чтобы математически описать закономерности, характеризующие колебания, элементарных знаний механики и математики уже недостаточно. Дело в том, что даже в простейших колебательных системах сила, возвращающая маятник в положение равновесия, а следовательно, и ускорение зависят от положения грузика и меняются со временем. Поэтому исследование закономерностей колебательного движения проведём при помощи эксперимента. Прежде чем начинать опыты, необходимо понять, какая физическая величина будет выбрана для изучения колебательного движения и от чего она может зависеть.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Интересно то, что период колебаний Галилей определял, пользуясь собственным пульсом. Зная, что длина цепи, на которой была подвешена люстра в Пизанском соборе, приблизительно составляет 49 м, можно оценить, сколько ударов пульса мог отсчитать Галилей за один период колебания. Оценки показывают, что период колебания такого маятника составляет около 14 с. Предполагая, что сердце бьётся с частотой 60 ударов в минуту, это число составляет 14 ударов.

В качестве характеристики колебаний математического маятника выберем *период колебаний*. Можно предположить, что период колебаний зависит от массы грузика (m), амплитуды колебаний (A) и длины нити (l). Так как равнодействующая сила, возвращающая грузик в положение равновесия, зависит от силы тяжести, можно также предположить наличие зависимости от ускорения свободного падения (g). Опыты с нитяными маятниками при фиксированной длине нити, различными амплитудами колебаний и различными массами грузиков позволили установить две закономерности.

Результаты опытов по измерению периода колебаний (в секундах) для нитяных маятников с длиной нити 1 м представлены в таблице. При этом в качестве погрешности измерений приведена приборная погрешность электронного секундомера.

Амплитуда, см	5	10	15
Масса 55 г	2,00 ± 0,01	1,99 ± 0,01	2,01 ± 0,01
Масса 7 г	1,99 ± 0,01	1,98 ± 0,01	1,97 ± 0,01

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Если отклонять маятник на различные (но не слишком большие) углы и затем отпускать, то он будет колебаться с одинаковым периодом, хотя и с разными амплитудами, т. е. **период колебаний маятника не зависит от амплитуды**.

2. Если при одной и той же длине маятника подвешивать грузы различной массы, период колебаний будет один и тот же. Следовательно, **период колебаний маятника не зависит от массы груза**.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Кроме Галилея, тщательные исследования колебаний математического маятника провёл голландский учёный Х. Гюйгенс (1629—1695). Гюйгенс существенно усовершенствовал маятниковые часы, сконструированные по идее Галилея. Опытным путём он установил, что независимость периода колебаний маятника от амплитуды колебаний (свойство изохронности колебаний) имеет место только для малых отклонений маятника от положения равновесия.

ФОРМУЛА ДЛЯ ПЕРИОДА КОЛЕБАНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА. Итак, период колебаний не зависит от амплитуды колебаний и массы маятника. А как период зависит от длины нити и ускорения свободного падения? В данном курсе мы не можем вывести эту формулу, так как её вывод выходит за рамки ваших сегодняшних знаний по математике. Поэтому приведём формулу для периода колебаний математического маятника без вывода:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \qquad (1)$$

Проверим размерности правой и левой частей (1). Период T измеряется в секундах, длина l — в метрах, ускорение свободного падения — в м/с^2, а числовой коэффициент 2π является величиной безразмерной. Получаем:

$$[T] = \text{с}; \quad \sqrt{\frac{[l]}{[g]}} = \sqrt{\frac{\text{м}}{\text{м}/\text{с}^2}} = \sqrt{\text{с}^2} = \text{с}.$$

Таким образом, размерности правой и левой частей равенства (1) совпадают.

Поскольку физика является экспериментальной наукой, проверим формулу (1) опытным путём. Для ускорения свободного падения примем его усреднённое значение $g = 9{,}81$ м/с^2.

Результаты измерений периода колебаний для трёх значений длины маятника приведены в таблице.

Длина, м	Период			$T_{ср} \pm \Delta T$, с	$T_{теор}$, с
	T_1, с	T_2, с	T_3, с		
0,6	1,56	1,56	1,54	1,55 ± 0,01	1,56

Окончание

Длина, м	Период			$T_{ср} \pm \Delta T$, с	$T_{теор}$, с
	T_1, с	T_2, с	T_3, с		
0,8	1,80	1,78	1,80	1,79 ± 0,01	1,79
1,0	2,01	2,00	1,97	1,99 ± 0,02	2,01

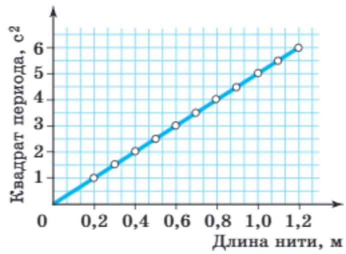
В таблице $T_{ср} = (T_1 + T_2 + T_3)/3$.

Ошибка измерений

$\Delta T = \left(|T_1 - T_{ср}| + |T_2 - T_{ср}| + |T_3 - T_{ср}|\right)/3$.

Из таблицы следует, что в пределах ошибок измерений эксперимент подтверждает формулу (1).

На графике приведена зависимость квадрата периода от длины нити. Очевидно, что в согласии с формулой (1) эта зависимость является линейной.



ВАЖНО

Если обозначить величины: длина нити математического маятника — l, ускорение свободного падения — g, то **период колебаний математического маятника** можно рассчитать по формуле

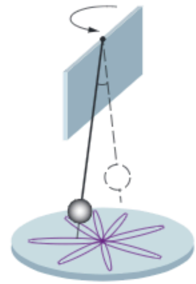
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Исследуя колебания маятника, Галилей установил, что время качаний маятников разной длины пропорционально квадратным корням из их длин. В 1638 г. он сформулировал этот закон в книге «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей...».

Зависимость периода колебаний маятника от ускорения свободного падения позволяет опытным путём определять значение g. Для этого надо измерить длину маятника и определить период его колебания, используя для этого большое число колебаний. Данный метод настолько точен, что позволяет изучить не только изменения значений ускорения свободного падения в зависимости от географической широты, но и заметить различия в значениях g на одной и той же широте. Эти различия возникают из-за неравномерной плотности земной коры. По изменению значения g на одной и той же географической широте можно судить о наличии месторождений полезных ископаемых. Подобные измерения вместе с другими данными позволили открыть Курскую магнитную аномалию.

МАЯТНИК ФУКО. Одним из видов математического маятника является маятник Фуко, названный так по имени французского физика Л. Фуко. В отличие от обычного маятника, который колеблется только в одной плоскости, маятник Фуко закреплён таким образом, что может свободно двигаться в любой вертикальной плоскости.



При первой публичной демонстрации опыта, проведённой в 1851 г., свинцовый груз массой 28 кг был подвешен на нити длиной 67 м к куполу Пантеона в Париже. Период колебаний маятника составлял около 16,5 с. За одно колебание плоскость колебаний немного поворачивалась. Условно рисунок получавшихся колебаний напоминал лепестки цветка. За час плоскость колебаний повернулась на 11°, т. е. примерно за 32 ч она совершала бы полный оборот и возвращалась в прежнее положение.

Вращение плоскости колебаний маятника является доказательством того, что Земля вращается вокруг своей оси. Пока груз маятника совершает колебания, Земля под маятником поворачивается.

Самый большой маятник Фуко с длиной нити 98 м был установлен в Исаакиевском соборе в Санкт-Петербурге. Он функционировал с 1931 по 1986 г.

Маятник Фуко, подвешенный на экваторе, не будет смещаться, так как ось вращения будет оставаться перпендикулярной к плоскости колебаний маятника. Маятник Фуко, установленный на Северном или Южном полюсе, будет просто описывать окружность.

ВЫВОД

Период колебаний математического маятника зависит от длины нити и ускорения свободного падения и не зависит от массы груза и амплитуды колебаний.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Период колебаний; математический маятник

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. От чего зависит период колебаний математического маятника?
2. Как вычислить период колебаний математического маятника?
3. Изменится ли поведение колеблющегося в лифте математического маятника, если лифт начнёт двигаться с ускорением вниз; вверх?
4. Что должен сделать часовой мастер с длиной маятника часов, чтобы они пошли правильно, если часы стали отставать?

ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ § 53

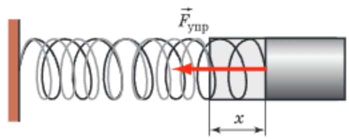
НОВОЕ В УРОКЕ

- Какие колебания называются гармоническими.
- Что представляет собой график гармонических колебаний.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Какие силы действуют на грузы при колебаниях пружинного и математического маятников?
- Как выглядит графическое изображение колебательного движения?

Среди различных колебательных процессов выделяется особый вид колебаний, которые называются *гармоническими*. Этот вид колебаний является основным для дальнейшего изучения более сложных колебательных систем.



ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ. Если пренебречь силой трения, то на груз пружинного маятника в горизонтальном направлении будет действовать только сила упругости пружины. Она, согласно закону Гука, зависит от коэффициента жёсткости пружины k, пропорциональна смещению (т. е. отклонению груза от положения равновесия) и направлена к положению равновесия: $F_{упр} = -kx$. Знак «минус» означает, что направление силы упругости противоположно направлению смещения груза. Колебания, которые происходят под действием силы, пропорциональной смещению колеблющегося тела из положения равновесия и направленной противоположно этому смещению, называются **гармоническими.**

ПЕРИОД КОЛЕБАНИЯ ПРУЖИННОГО МАЯТНИКА. С помощью математических преобразований можно получить формулу для периода колебаний пружинного маятника:

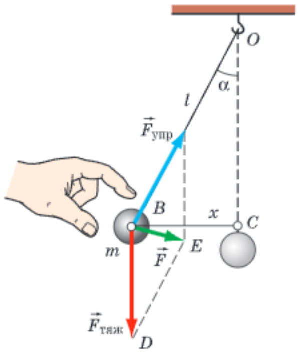
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \tag{1}$$

где k — жёсткость пружины (измеряется в кг/с^2 или Н/м), а m — масса груза. Способ экспериментальной проверки этой формулы аналогичен тому, который был использован для нитяного маятника.

ВАЖНО

Если обозначить величины: масса грузика пружинного маятника — m, жёсткость пружины — k, то **период колебаний пружинного маятника** можно рассчитать по формуле

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$



ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА. Рассмотрим математический (нитяной) маятник. Колебания маятника обусловлены тем, что равнодействующая $\vec F = \vec F_{тяж} + \vec F_{упр}$ силы тяжести и силы упругости, действующих на груз, отлична от нуля.

Обозначим x — смещение груза. Хотя перемещение происходит по дуге, но при малых углах отклонения можно считать, что смещение равно длине дуги. Учитывая, что угол BED близок к 90°, рассмотрим два треугольника OBC и DBE, которые будут подобными. Отношение соответствующих катетов равно отношению гипотенуз:

$$\frac{F}{x} = \frac{mg}{l}, \quad \text{или} \quad F = \frac{mg}{l}x. \qquad (2)$$

Величина $\frac{mg}{l}$ во время колебаний не меняется. Обозначим:

$$\frac{mg}{l} = k. \qquad (3)$$

Тогда выражение для модуля возвращающей силы можно записать: $F = kx$. При этом её направление противоположно направлению смещения груза. Как для пружинного маятника, так и для математического маятника возвращающая сила направлена в сторону, противоположную смещению, и пропорциональна ему, т. е. $F \sim -x$.

Таким образом, колебания нитяного маятника также являются гармоническими. Если выражение (3) подставить в (1), получится уже известная вам формула

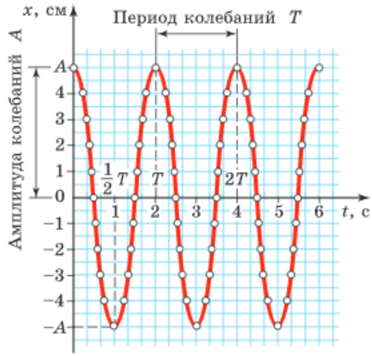
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \qquad (4)$$

Формула (1) для расчёта периода колебаний может применяться для различных видов гармонических колебаний, если под коэффициентом k понимать коэффициент пропорциональности между смещением и возвращающей силой.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Часы — одно из древнейших изобретений человечества.
Первые маятниковые часы изобрёл в 1656 г. голландский физик Христиан Гюйгенс. Он продолжил исследования Галилео Галилея, который установил, что колебания маятников повторяются через равные промежутки времени. Гюйгенс подобрал такую длину нити маятника, чтобы одно полное колебание совершалось за 1 с. Длина нити оказалась равна 99,38 см. В результате Гюйгенс разработал конструкцию часов, в которой движение маятника через шестерни управляло вращением стрелок часов. Маятниковые часы работали с достаточно высокой точностью и вскоре приобрели большую популярность.

ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ. Для получения зависимости координаты x смещения груза относительно положения равновесия от времени t была проведена видеосъёмка колебаний нитяного маятника с частотой 30 кадров в секунду. Затем была сделана раскадровка полученного видеосюжета и получены фотографии положения груза через каждые $^1/_{30}$ с. При этом в таблицу были занесены значения координаты x груза, измеренные с помощью линейки в соответствующие моменты времени. Затем данные таблицы нанесли на координатную плоскость, образованную координатной осью Ox и осью времени t, и точки соединили плавной линией.



Получившаяся кривая называется **осциллограммой** (от лат. *oscillum* — колебание и греч. *gramma* — запись). По графику видно, что смещение тела от положения равновесия изменяется по закону синуса (или косинуса). Кривые, подобные изображённой на рисунке, называются *синусоидами*.

ВЫВОДЫ

Колебания, которые происходят под действием силы, пропорциональной смещению колеблющегося тела из положения равновесия и направленной противоположно этому смещению, называются гармоническими.

Колебания таких систем, как нитяной и пружинный маятник, являются гармоническими.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Гармонические колебания; синусоида; период колебаний пружинного маятника

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Какие колебания называются гармоническими?
2. Что представляет собой график гармонических колебаний?
3. Изменится ли период колебаний математического маятника, если его из воздуха перенести в воду или масло?
4. Изменится ли период колебаний математического маятника, если его установить на тележку, которая движется равномерно и прямолинейно? Обоснуйте свой ответ.

§ 54 ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ. ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ

НОВОЕ В УРОКЕ

- Какие превращения энергии происходят при колебаниях маятника.
- Что такое затухающие колебания.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

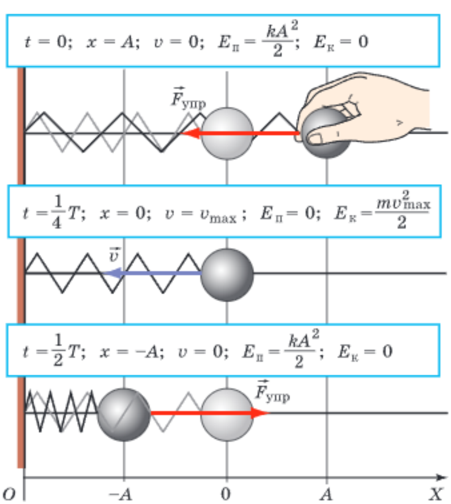
- Что такое потенциальная и кинетическая энергии?
- Как формулируется закон сохранения энергии?
- Какие колебания называются гармоническими?

При механических колебаниях происходят периодические изменения координаты тела, а также его скорости и ускорения. Следовательно, изменяется и механическая энергия колебательной системы. Рассмотрим, какие превращения энергии происходят в процессе колебаний и как изменяется энергия колебаний в реальных условиях, т. е. при учёте сил трения и сил сопротивления среды.

ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ ПРУЖИННОГО МАЯТНИКА. Превращение энергии при гармонических колебаниях удобно обсуждать на примере колебательной системы, состоящей из лёгкой пружины и прикреплённого к ней шарика с отверстием. Свободный конец пружины прикреплён к стойке, а шарик без трения скользит по проходящему через отверстие гладкому стержню.

Выведем шарик из положения равновесия, растянув пружину с жёсткостью k на некоторую длину $x = A$. В результате колебательной системе будет сообщён запас потенциальной энергии, равный $kA^2/2$.

Если шарик отпустить, то при его движении пружина будет сокращаться, а потенциальная энергия соответственно уменьшаться. Но одновременно будет увеличиваться скорость движения шарика и, следовательно, его кинетическая энергия. При прохождении шарика через положение равновесия потенциальная энергия пружины становится равна нулю, тогда как кинетическая энергия тела достигает своего максимального значения.



После прохождения шариком положения равновесия пружина начинает сжиматься, а скорость уменьшаться. Следовательно, будет уменьшаться и кинетическая энергия. Вместе с тем по мере сжатия пружины будет увеличиваться потенциальная энергия системы. В момент, когда отклонение шарика от положения равновесия станет равно амплитуде A, потенциальная энергия вновь достигнет своего максимального значения $kA^2/2$, а кинетическая энергия окажется равной нулю.

Таким образом, при колебаниях через каждую четверть периода происходит переход потенциальной энергии в кинетическую и обратно — кинетической в потенциальную. При этом частота изменения энергии вдвое больше частоты колебаний тела, поскольку потенциальная энергия не зависит от знака деформации пружины, а кинетическая энергия — от знака проекции скорости.

Полная механическая энергия груза, колеблющегося на пружине, равна сумме кинетической и потенциальной энергии:

$$E = E_к + E_п = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}. \quad (1)$$

ВАЖНО

Если трение в системе пренебрежимо мало́, то при свободных колебаниях полная механическая энергия системы, согласно закону сохранения энергии, остаётся неизменной: $E = \text{const}$.

В момент наибольшего отклонения тела от положения равновесия полная механическая энергия равна максимальному значению потенциальной энергии:

$$E_{п\,\max} = \frac{kA^2}{2},$$

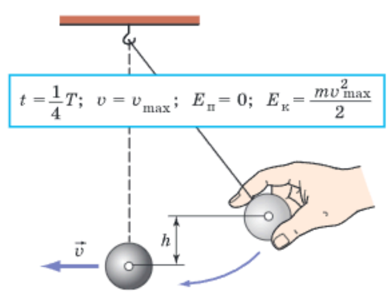
а в момент, когда тело проходит положение равновесия, — максимальному значению кинетической энергии:

$$E_{к\,\max} = \frac{mv_{\max}^2}{2}.$$

По закону сохранения механической энергии

$$E = \frac{kA^2}{2} = \frac{mv_{\max}^2}{2}. \quad (2)$$

Согласно равенству (2), полная механическая энергия пропорциональна квадрату амплитуды. Например, если амплитуда колебаний увеличивается вдвое, то механическая энергия системы увеличивается в 4 раза.



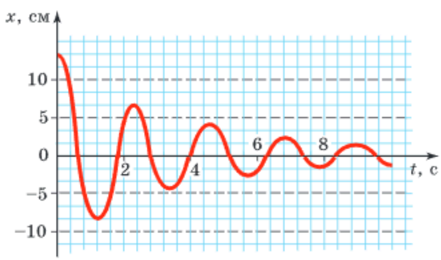
ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА. Превращение механической энергии можно наблюдать также при колебаниях математического маятника. Если за нулевой уровень отсчёта потенциальной энергии в поле тяжести принять положение равновесия маятника, то при отклонении грузика на некоторую высоту h его потенциальная энергия будет максимальна и равна $E_{п\,\max} = mgh$. После освобождения маятника потенциальная энергия груза переходит в энергию кинетическую, причём в нижней точке траектории потенциальная энергия принимает нулевое значение, а кинетическая энергия будет максимальна. Согласно закону сохранения механической энергии

$$E = \frac{mv_{\max}^2}{2} = mgh.$$

Казалось бы, такие колебания не должны затухать. Однако наличие силы трения и силы сопротивления воздуха приводит к тому, что происходит потеря механической энергии за счёт её превращения во внутреннюю энергию. Поэтому гармонические колебания рассматриваются как модель, так как в реальности всегда присутствуют силы трения и сопротивления среды.

ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ. Под влиянием силы трения происходит уменьшение амплитуды колебаний, и через некоторое время колебания прекращаются. Колебания с уменьшающейся амплитудой называются **затухающими.** Очевидно, чем больше силы сопротивления движению, тем быстрее прекращаются колебания.

Можно достаточно долго наблюдать колебания пружинного маятника в воздухе, поскольку в этом случае силы трения сравнительно невелики. Однако если возбудить колебания маятника в вязкой среде, например в глицерине, то амплитуда колебаний будет уменьшаться очень быстро. Например, на рисунке показана зависимость координаты x смещения грузика относительно положения равновесия от времени t для колебаний нитяного маятника, грузик которого помещён в воду.



ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Пружины, устанавливаемые в подвесках колёс транспортных средств, предназначены для гашения толчков, которые получает корпус машины на неровностях дороги. Однако это приводит также к раскачиванию кузова машины, что отрицательно сказывается на комфорте и безопасности движения. Гашение колебаний кузова осуществляется с помощью *амортизаторов*. На современных транспортных средствах устанавливаются в основном гидравлические и пневматические амортизаторы. В качестве рабочего вещества в гидравлических амортизаторах, как правило, используется минеральное масло. В пневматических амортизаторах рабочим телом является газ, находящийся под давлением 2—5 атмосфер (в зависимости от массы транспортного средства).

ВЫВОДЫ

- При отсутствии сил трения механическая энергия колебательной системы сохраняется.
- Колебания с уменьшающейся амплитудой называются затухающими.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Превращение энергии при колебаниях; затухающие колебания

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Какие превращения энергии происходят при колебаниях маятника?
2. Что такое затухающие колебания?
3. Являются ли затухающие колебания периодическими?
4. Отклоните нитяной маятник на небольшой угол и измерьте время, по истечении которого колебания практически полностью затухнут. Повторите опыт, увеличив вдвое начальное отклонение маятника. Сравните время затухания колебаний в обоих случаях и сделайте выводы.

ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ. РЕЗОНАНС

§ 55

Если при качании качелей не прикладывать никаких усилий, то качели достаточно быстро остановятся. Для того чтобы этого не произошло, обычно качели слегка подталкивают в такт их колебаниям. При этом лёгкого подталкивания качелей в определённые моменты времени оказывается достаточным, чтобы быстро раскачать качели до колебаний с большой амплитудой, а затем поддерживать эти колебания.

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое вынужденные колебания.
- Что такое резонанс и при каких условиях он возникает.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

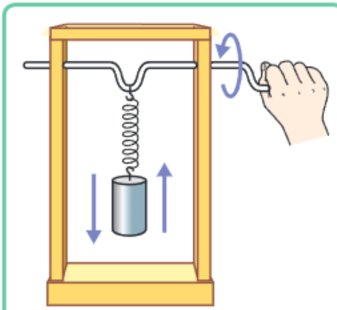
- Какие колебания называются свободными?
- От чего зависит период и частота колебаний маятника?
- Что такое затухающие колебания?
- Какие силы называются внутренними силами системы, а какие — внешними?

ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ. Так как колебания затухают вследствие потерь механической энергии, необходимо восполнять эти потери за каждый период колебаний. Это можно сделать, если воздействовать на колеблющееся тело периодически изменяющейся силой. Например, если в определённые моменты времени подталкивать грузик маятника рукой, он может качаться с неизменной амплитудой сколь угодно долго. Подобным образом обычно качают на качелях — их подталкивают в такт колебаниям.

Колебания, происходящие под действием внешней периодически изменяющейся силы, называются **вынужденными колебаниями.** При этом внешняя периодически изменяющаяся сила, вызывающая эти колебания, называется **вынуждающей силой.** В отличие от свободных колебаний, которые из-за наличия трения затухают, **вынужденные колебания получаются незатухающими**. Потери энергии в процессе этих колебаний компенсируются поступлением энергии за счёт работы внешней силы. Вынужденные колебания происходят до тех пор, пока действует вынуждающая сила.

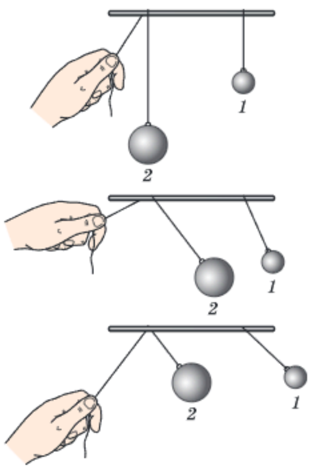
ИССЛЕДОВАНИЕ

Наблюдать вынужденные колебания удобно с помощью устройства, состоящего из груза, подвешенного на пружине, верхний конец которой прикреплён к оси, изогнутой в виде колена. При вращении рукоятки на пружину со стороны оси будет действовать внешняя сила, в результате чего груз начнёт постепенно раскачиваться. И хотя у пружинного маятника есть своя собственная частота колебаний, зависящая от массы груза и жёсткости пружины, данный опыт показывает, что частота установившихся колебаний оказывается равной частоте, с которой вращается рукоятка.



Таким образом, **вынужденные колебания совершаются с частотой, равной частоте изменения вынуждающей силы**. В этом заключается принципиальное отличие вынужденных колебаний от колебаний свободных. Свободные колебания могут происходить лишь с определёнными частотами и периодами колебаний, которые зависят от характеристик колебательной системы.

Амплитуда вынужденных колебаний при данной частоте вынуждающей силы не будет изменяться, хотя на колебательную систему по-прежнему действуют силы трения. Это означает, что **потери энергии из-за трения полностью компенсируются за счёт работы вынуждающей силы**.



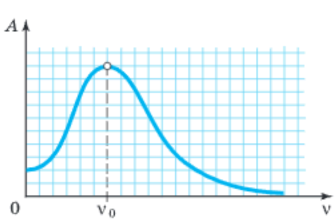
РЕЗОНАНС. Выясним, как амплитуда вынужденных колебаний зависит от соотношения между частотой вынуждающей силы и частотой свободных колебаний. Частота свободных колебаний называется **собственной частотой** колебательной системы.

Подвесим на нитях, прикреплённых к общей перекладине, маятник *1* и маятник *2* с существенно большей массой. Длина нити маятника *1* постоянна, этой длине соответствует вполне определённый период, следовательно, и определённая частота свободных колебаний. Длину нити маятника *2* можно изменять, подтягивая свободный конец нити, при этом меняется и его собственная частота колебаний.

Если привести в движение маятник *2*, то он через перекладину будет действовать на маятник *1* с некоторой вынуждающей силой, частота которой равна частоте колебаний маятника *2*.

При уменьшении длины маятника *2* наблюдается увеличение частоты его колебаний. При этом увеличивается и частота вынуждающей силы, действующей на маятник *1*. Опыт показывает, что при этом увеличивается амплитуда вынужденных колебаний маятника *1*. Увеличение амплитуды будет продолжаться до тех пор, пока длины маятников не станут равными. Когда длины маятников становятся равными, т. е. когда частота ν вынуждающей силы становится равной частоте ν_0 собственных колебаний маятника *1*, его амплитуда колебаний резко возрастает.

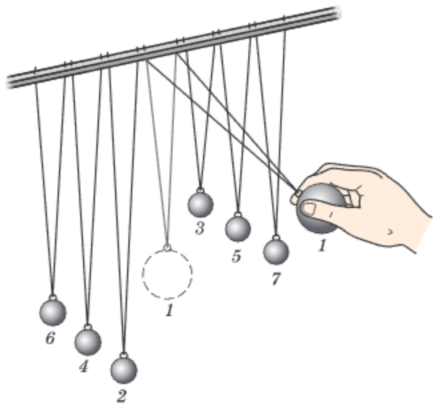
При дальнейшем уменьшении длины маятника *2* частота вынуждающей силы оказывается больше собственной частоты маятника *1* и амплитуда его колебаний уменьшается.



Качественная зависимость амплитуды вынужденных колебаний от частоты вынуждающей силы приведена на рисунке.

Явление резкого увеличения амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты вынуждающей силы с собственной частотой колебательной системы называется **резонансом**.

Проведём ещё один опыт. На рейку подвешивают несколько маятников разной длины. При этом маятник *1* массивный, а остальные маятники лёгкие. Маятник *1* приводят в движение в плоскости, перпендикулярной рейке. Он будет совершать свободные колебания, периодически действуя с некоторой силой на рейку. Рейка, в свою очередь, будет действовать на остальные маятники, которые начнут совершать вынужденные колебания с частотой колебаний маятника *1*. При этом маятники *2* и *3* останутся почти неподвижными, так как их собственные частоты значительно отличаются от частоты маятника *1*, т. е. амплитуды колебаний маятников *2* и *3* будут малы. Амплитуды маятников *4* и *5* будут больше, а маятники *6* и *7*, имеющие ту же длину нити, что и маятник *1*, начнут колебаться с большой амплитудой, *т. е. войдут в резонанс с маятником 1.*



При работе различных механизмов могут возникать периодические воздействия на сам механизм, обусловленные, например, наличием движущихся поршней, неточной центровкой вращающихся валов и т. п. Если частота периодических воздействий совпадёт с собственной частотой колебательной системы, то возникает резонанс и возможно разрушение механизма.
Вместе с тем явление резонанса используется и в практических целях. Например, на этом явлении основана работа частотомера — прибора для измерения частоты периодических процессов.
Особо важную роль резонанс играет в процессах генерации, передачи и приёма электромагнитных волн.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Резонансные явления могут вызывать необратимые разрушения в различных механических системах, например в неправильно спроектированных мостах. Так, в 1905 г. рухнул Египетский мост в Санкт-Петербурге, когда по нему проходил эскадрон кавалерии и более сотни обученных коней в такт ударяли копытами по мосту.
Чтобы предотвратить подобные повреждения, с тех пор строй солдат должен сбивать шаг при прохождении мостов.
В 1940 г. разрушился Такомский мост в США, на котором были установлены большие рекламные щиты. Под действием ветра, дующего с Гудзонова залива, мост стал раскачиваться, в результате чего амплитуда колебаний моста превысила допустимые значения.
Явление резонанса используют, когда с помощью небольшой силы необходимо получить большое увеличение амплитуды колебаний. Например, тяжёлый язык большого колокола можно раскачать, действуя сравнительно небольшой силой с частотой, равной собственной частоте колебаний колокола.

Резонанс — важное физическое явление, которое может быть как полезным, так и вредным или даже опасным, в зависимости от ситуации. Он может использоваться для повышения эффективности работы механизмов, таких как двигатели и насосы, путём увеличения амплитуды колебаний при определённой частоте. Однако резонанс может приводить к разрушению конструкций и устройств при слишком большой амплитуде колебаний. Чтобы избежать негативных проявлений резонанса, необходимо правильно выбирать частоту колебаний и контролировать амплитуду.

ВЫВОДЫ

- Колебания, происходящие под действием внешней периодически изменяющейся силы, называются вынужденными колебаниями.
- Внешняя периодически изменяющаяся сила, вызывающая эти колебания, называется вынуждающей силой.
- Явление резкого увеличения амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты вынуждающей силы с собственной частотой колебательной системы называется резонансом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Вынужденные колебания; вынуждающая сила; резонанс

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что такое вынужденные колебания?
2. Чем определяется частота вынужденных колебаний?
3. Приводит ли наличие силы трения к затуханию вынужденных колебаний?
4. При каких условиях возникает резонанс?
5. Почему при переноске воды в ведре после нескольких десятков шагов вода начинает выплёскиваться из ведра? Как избежать расплёскивания воды?

ВОЛНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ § 56

НОВОЕ В УРОКЕ

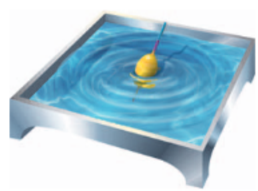
- Как колебания распространяются в среде.
- Что такое волны.
- Что такое упругие волны.
- Что такое продольные и поперечные волны.

Колебательные движения тело совершает, находясь в некоторой среде — в воздухе, воде и т. д. Теперь рассмотрим, что же происходит в этом случае, т. е. перейдём от рассмотрения колебательных движений к изучению распространения колебаний в различных средах.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что собой представляет колебательное движение?
- Каково внутреннее строение вещества?

РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ В ВОДЕ. Если бросить в воду камень, от него пойдут круги. Подобные процессы распространения возмущения представляют собой *волну*. Волны на поверхности воды всем хорошо знакомы. На поверхности моря, озера или реки часто можно наблюдать рябь, а если дует сильный ветер, то возникают волны.



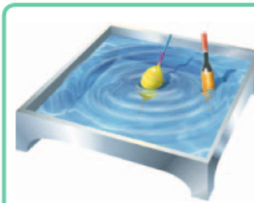
Рассмотрим эти явления подробнее. На поверхность воды в сосуде поместим лёгкий поплавок. Заставив его совершать колебания, мы увидим, что от него по воде идут круги — волны. Таким образом, колебания поплавка передаются сначала ближайшим частицам среды и далее от одних частиц среды к другим. Это обусловлено тем, что соседние частицы среды взаимодействуют между собой.

ВОЛНЫ. Колебания, распространяющиеся в пространстве с течением времени, называются **волнами.**

В обоих рассмотренных примерах причиной, вызвавшей возникновение волны, стали колебания. Мы будем рассматривать только *бегущие волны*, основное свойство которых заключается в том, что они, распространяясь в пространстве, переносят энергию без переноса вещества.

ИССЛЕДОВАНИЕ

В сосуд с водой, в котором находится поплавок, поместим ещё один поплавок. После того как первый поплавок начнёт совершать колебания, через некоторое время начнёт колебаться и второй поплавок за счёт энергии, полученной от волны. При этом сам поплавок будет оставаться на месте. Значит, частицы воды не переносятся волной, т. е. не происходит переноса вещества.

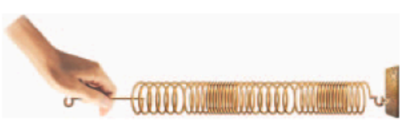


ЭТО ИНТЕРЕСНО

Волны на поверхности воды, возникающие вследствие воздействия ветра, часто называют *ветровыми*. Следует отметить, что направление распространения таких поверхностных волн не всегда совпадает с направлением ветра. Это связано с рядом причин, в том числе с характером водного пространства, над которым дует ветер (открытое море, узкий залив, близость береговой линии и т. п.). Кроме того, на характер распространения волн на поверхности воды оказывают влияние силы поверхностного натяжения.

Морские волны могут быть источником электроэнергии. Инженерные компании предлагают различные конструкции электрогенераторов, преобразующих энергию морских волн в электрическую. Например, буй устанавливается в океане и крепится на тросе к установке, расположенной на дне. Колебательные движения, которые совершает буй под действием морских волн, преобразуются во вращательное движение ротора электрогенератора.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ В ПРУЖИНЕ. Подобное волновое движение можно наблюдать в длинной пружине, расположенной горизонтально. Если один конец пружины закрепить, а другой слегка сжимать и отпускать, то по пружине будет распространяться волна. При сжатии пружины возникает сила упругости, которая заставляет витки пружины разжиматься. В этом месте пружины возникает разрежение. При ритмичном воздействии витки, подобно маятнику, колеблются около положений равновесия, то сближаясь, то удаляясь друг от друга. Эти колебания постепенно передаются от витка к витку вдоль всей пружины. Можно наблюдать, как по пружине распространяются сгущения и разрежения витков.



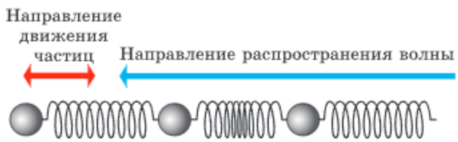
УПРУГИЕ ВОЛНЫ. Наряду с волнами на поверхности жидкости в механике изучают так называемые *упругие волны* — возмущения, распространяющиеся в различных средах в результате действия в них сил упругости. Например, упругими являются бегущие волны, распространяющиеся по пружине или вдоль резинового шнура, один из концов которого прикреплён к стене.

Как и в случае волн на поверхности воды, упругие волны являются бегущими волнами, которые при распространении в пространстве переносят энергию без переноса вещества.

ПРОДОЛЬНЫЕ И ПОПЕРЕЧНЫЕ ВОЛНЫ. Все волны делятся на два вида — *продольные* и *поперечные*. **Продольными** называются волны, в которых колебания происходят вдоль направления распространения волны. Волны, в которых колебания происходят перпендикулярно направлению их распространения, называются **поперечными**.

Характерной особенностью механических волн является то, что они распространяются в вещественных средах (твёрдых, жидких или газообразных). Распространение продольных и поперечных волн можно описать с помощью модели, в которой частицы среды представлены в виде совокупности шариков и пружинок.

В продольных волнах шарики смещаются вдоль цепочки, а пружинки растягиваются или сжимаются. Такая деформация называется *деформацией растяжения* или *сжатия*. В жидкостях или газах такая деформация сопровождается *уплотнением* или *разрежением*. Поскольку при сжатии и разрежении упругие силы возникают и в твёрдых телах, и в жидкостях, и в газах, то продольные механические волны могут распространяться в любых средах.



ПРОДОЛЬНАЯ ВОЛНА
Деформация растяжения или сжатия

Если один или несколько «шариков» сместить в направлении, перпендикулярном «цепочке», то возникнет *деформация сдвига*. В результате вдоль цепочки побежит поперечная волна. В жидкостях и газах упругая деформация сдвига не возникает. Смежные слои жидкости или газа могут свободно скользить друг относительно друга без проявления упругих сил. Следовательно, **поперечные волны не могут существовать в жидкой или газообразной среде**.

ПОПЕРЕЧНАЯ ВОЛНА
Деформация сдвига

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Как показали детальные исследования, волны на поверхности воды не являются ни продольными, ни поперечными. На самом деле частицы воды не колеблются относительно равновесных положений, а движутся по некоторым замкнутым траекториям.

ВЫВОДЫ

- Колебания, распространяющиеся в пространстве с течением времени, называются волнами.
- Волны бывают продольными и поперечными.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Волна; бегущие волны; упругие волны; продольные волны; поперечные волны

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что такое волны?
2. Что такое упругие волны?
3. Чем различаются продольные и поперечные волны?
4. В каких средах могут распространяться продольные волны, а в каких — поперечные?
5. Какие виды деформаций определяют характер волн, способных распространяться в твёрдых, жидких и газообразных средах?

§ 57 ДЛИНА ВОЛНЫ. СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ

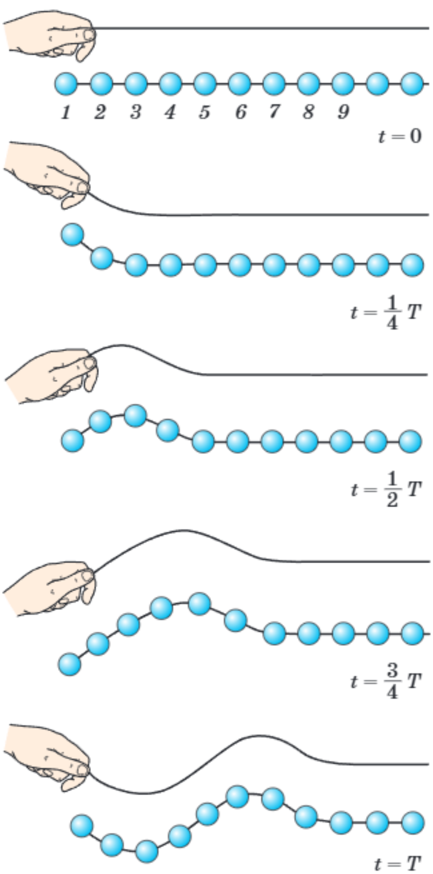
НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое длина волны.
- Что понимают под скоростью волны

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое волны?
- Какие выделяют виды волн?
- Что такое период и частота колебаний?

Рассмотрим более подробно процесс образования поперечной волны, используя модель из цепочки соединённых пружинками шариков-точек, взаимодействующих между собой посредством силы упругости.

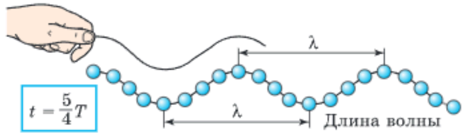


ДЛИНА ВОЛНЫ. Приведём первую точку в движение и заставим её совершать колебания. Будем рассматривать, как распространяются через каждые четверть периода (1/4 T) колебания этой точки.

При смещении точки *1* возникнут силы упругости, которые заставят точку *2* двигаться вслед за точкой *1*. Это приводит к возникновению сил упругости между точками *2* и *3* и т. д. Однако на возникновение деформации и сил упругости потребуется некоторое время. Поэтому точка *2* начнёт колебаться позднее точки *1*, точка *3* — позднее точки *2* и т. д. Так, за первую четверть периода точка *1* окажется в положении максимального отклонения, точка *2* будет двигаться вслед за ней, а на точку *3* только начнёт действовать сила упругости.

За вторую четверть периода точка *1* вернётся в положение равновесия. Точка *3* испытает максимальное отклонение, а точка *5* только начнёт движение.

К концу третьей четверти периода точка *1* испытает максимальное отклонение вниз, точка *3* будет проходить положение равновесия, точка *5* испытает максимальное отклонение вверх, а точка *7* только начнёт движение.



К концу периода точка *1* завершит полное колебание и снова окажется в положении равновесия, точка *3* отклонится на амплитудное значение вниз, точка *5* будет проходить положение равновесия, точка *7* отклонится на амплитудное значение вверх, а точка *9* только начнёт движение.

Мы видим, что точки *1* и *9* колеблются одинаково. Ещё через четверть периода они обе окажутся в положении максимального отклонения вверх, а ещё через четверть периода окажутся в положении равновесия. Таким образом, за время, равное периоду колебаний, волна распространяется от точки *1* до точки *9*.

Расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний, называется **длиной волны**. Можно также сказать, что **длина волны** — это расстояние между двумя ближайшими гребнями или впадинами поперечной волны либо расстояние между двумя ближайшими сгущениями или разрежениями продольной волны.

Длину волны обозначают греческой буквой λ (лямбда). Её основной единицей является *метр* (1 м).

СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ. Каждая волна распространяется с определённой скоростью. **Скоростью волны** v называется скорость распространения колебаний. Из рисунка видно, что за время, равное периоду колебаний T, волна распространяется на расстояние, равное длине волны λ. Поэтому

$$\lambda = vT.$$

Отсюда скорость распространения волны будет равна

$$v = \frac{\lambda}{T}.$$

Если учесть, что частота колебаний ν — величина, обратная периоду колебаний, то скорость распространения волны можно выразить через частоту колебаний:

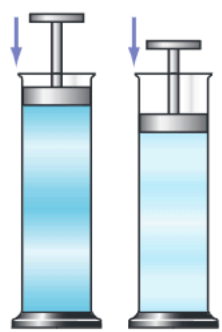
$$v = \lambda\nu.$$

ВАЖНО

Если обозначить величины: длина волны — λ, частота колебаний — ν, период колебаний — T, **то скорость распространения волны** можно рассчитать по формуле

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu.$$

Колебания частиц среды, в которой распространяется волна, являются *вынужденными*. Поэтому их период колебаний равен периоду колебаний источника волны. Однако скорость распространения волны, а соответственно и длина волны зависят от среды, в которой они распространяются. Это связано в первую очередь с агрегатным состоянием вещества. В твёрдых телах частицы расположены близко друг к другу и связь между ними сильная. В жидкостях частицы расположены дальше друг от друга, чем в твёрдых



Модель распространения волны в воде (*а*), в воздухе (*б*) телах, они слабее взаимодействуют друг с другом. В газах взаимодействие между частицами совсем слабое. Поэтому наибольшая скорость распространения волны — в твёрдых телах, наименьшая — в газах.

Измерьте длину, частоту и скорость распространения волн в воде

ПОМОЩНИК. Наберите воду в ванну. Бросьте вертикально вниз в воду небольшой металлический шарик. Наблюдайте волны, расходящиеся в разные стороны от места падения шарика.

На дно ванны положите линейку. Повторите опыт ещё раз. По делениям линейки определите длину волны, т. е. расстояние между двумя соседними гребнями или впадинами.

Измерьте расстояние от места падения шарика в воду до определённой точки и время распространения волны до данной точки. Разделив расстояние на время, вычислите скорость распространения волны.

Зная скорость и длину волны, вычислите частоту и период колебаний в волне.

ВЫВОДЫ

- Расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний, называется длиной волны.
- Все волны распространяются с определённой скоростью.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Длина волны; скорость распространения волны

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что такое длина волны?
2. Что такое скорость волны и как она определяется?
3. От каких характеристик колебаний зависит скорость волны?
4. Может ли изменяться скорость волны при переходе из одной среды в другую? Ответ поясните.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В ТВЁРДЫХ ТЕЛАХ. СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

§ 58

НОВОЕ В УРОКЕ

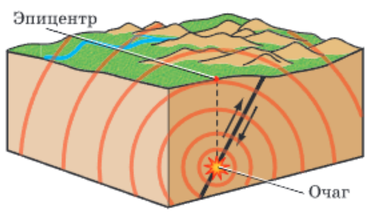
- Какие волны называются сейсмическими.
- Какие типы сейсмических волн существуют.
- Какие приборы используются для обнаружения и изучения сейсмических волн.

В твёрдых телах могут распространяться как продольные, так и поперечные волны. Примером механических волн в твёрдых телах являются **сейсмические волны** — колебания, распространяющиеся в земной коре.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое волны?
- Какие виды волн существуют?
- Что такое период и частота колебаний?

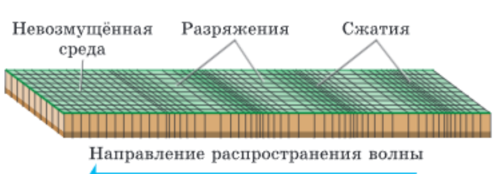
СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ. Волны, наблюдаемые в природе, нередко переносят огромную энергию и являются причиной разрушений. **Сейсмические волны** распространяются в земной коре при землетрясениях, извержениях вулканов или мощных взрывах. Землетрясения возникают при сдвигах и смещениях горных пород в земной коре на большой глубине. В результате возникают подземные толчки и колебания земной поверхности. Точка, в которой начинается движение пород, называется **очагом** или **гипоцентром** землетрясения. Сейсмические волны распространяются во все стороны от очага землетрясения, некоторые из них достигают земной поверхности. Точка на поверхности Земли, расположенная непосредственно над очагом, называется **эпицентром** землетрясения.

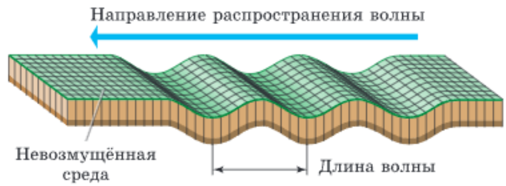


При землетрясениях происходят сдвиги земной коры, достигающие 10—15 м.

Подводные землетрясения вызывают *цунами* — огромные волны в океане.

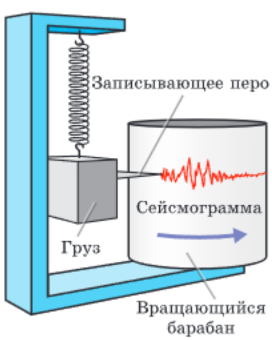
Существует три типа сейсмических волн. *Первичные*, или *p*-волны, представляют собой продольные волны сжатия и разрежения в земной поверхности. Колебания частиц пород в них происходят вдоль направления распространения волны. Скорость распространения первичных волн составляет 1,5—13 км/с. *Вторичные*, или *s*-волны, представляют собой поперечные волны. В этом случае движение частиц перпендикулярно распространению волны. Скорость распространения вторичных волн примерно в 1,7 раза меньше, чем первичных. Самые сильные разрушения производят *поверхностные* волны — волны, которые распространяются по поверхности Земли.





Сейсмические волны изучают специалисты *сейсмологи*, которые исследуют причины и процессы землетрясений, а также делают прогнозы по очагам их возникновения.

Верхние этажи высотных зданий могут качаться из-за сейсмической активности или сильных ветров. Поэтому при проектировании высоток важно уделять особое внимание надёжности несущих конструкций. Для гашения возможных колебаний верхних этажей небоскрёбов, а также для предотвращения разрушений и повреждений в случае землетрясений применяются *демпферы*. Они представляют собой массивные блоки, которые встраиваются в конструкцию зданий и закрепляются с помощью пружин. Демпфер подбирается таким образом, чтобы его частота колебаний была близка к резонансной частоте здания, что позволяет уменьшать амплитуду колебаний здания.
Ещё одним из путей решения проблемы *сейсмоустойчивости* домов и сооружений является создание вокруг жилого комплекса ряда чередующихся цилиндрических ям, которые обеспечивают рассеяние и поглощение энергии сейсмических волн.



СЕЙСМОГРАФ. Для изучения землетрясений используются специальные приборы — *сейсмографы*. Они предназначены для записи колебаний земной поверхности, вызванных сейсмическими волнами.

Основной частью простого механического сейсмографа является маятник, соединённый с пером, чертящим непрерывную линию на бумажной ленте. Во время землетрясений маятник остаётся неподвижным, тогда как бумага начинает сотрясаться, и на ней появляется волнистая линия, отражающая колебания земной коры.

Современные электронные сейсмографы записывают и обрабатывают информацию в цифровом виде. Результат записи сигнала от сейсмических волн называется **сейсмограммой.** По сейсмограмме можно определить амплитуду колебаний почвы и их частоту.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Первый сейсмограф изобрёл в 132 г. китайский учёный и изобретатель Чжан Хэн. Устройство представляло собой большой бронзовый сосуд, внутри него был вертикально помещён маятник, к которому примыкали восемь пружин-рычагов, выведенных наружу. На внешних стенках к ним крепились металлические драконьи головы, у каждой из которых в пасти находилось по бронзовому шарику. В результате подземных толчков маятник приходил в движение, что приводило к нажиму одного из рычагов, и из головы дракона выпадал шарик в открытый рот одной из восьми жаб, размещённых у основания сосуда. По тому, какой из шариков выпадал, узнавали, в каком направлении происходит землетрясение.

Так как скорость распространения *p*-волн больше, чем скорость *s*-волн, они доходят до сейсмической станции не одновременно. Сейсмограф сначала регистрирует первичные волны, а затем — вторичные. Если измерить промежуток времени между приходом *p*- и *s*-волн, то, зная скорость их распространения, можно определить расстояние *r* от эпицентра землетрясения до сейсмической станции. Однако этого недостаточно, чтобы определить направление распространения сейсмической волны и указать точные координаты эпицентра землетрясения. Можно только сказать, что эпицентр находится в любой точке окружности найденного радиуса *r*.

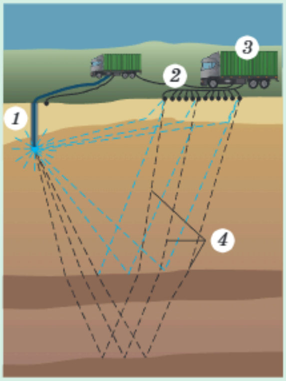
Чтобы определить местоположение очага землетрясения, нужны записи по крайней мере с трёх сейсмических станций. Для каждой станции определяют расстояния до эпицентра, а затем на карте вокруг станций рисуют окружности соответствующих радиусов. Пересечение трёх окружностей и показывает эпицентр землетрясения.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Учёные обнаружили, что сейсмические волны распространяются не только на планете Земля, но и на других космических объектах. Сейсмографы, установленные на Луне и Марсе, смогли зарегистрировать колебания их поверхностей. Анализируя распространение сейсмических волн, планетологи могут узнать внутреннее строение планеты, в жидком или твёрдом состоянии находится тот или иной её слой.

Сейсморазведка — это геофизический метод изучения земной коры и верхних слоёв мантии с помощью сейсмических волн. Метод состоит в следующем. На поверхности земли или в скважине производят взрыв, который порождает в почве упругие волны. Эти волны отражаются или преломляются в подземных слоях, имеющих различную плотность пород. Сейсмоприёмники, установленные на пути следования волн, регистрируют сигналы. Обработанные данные позволяют определить геологические характеристики горных пород, такие как структура, состав и свойства.

Одним из основных преимуществ сейсморазведки является возможность обнаруживать скрытые геологические структуры, такие как нефть и газ. С помощью сейсморазведки можно также исследовать вулканическую активность и определять места даже слабых землетрясений.



1 — скважина;
2 — система сейсмоприёмников;
3 — сейсморазведочная станция;
4 — волны, отражённые от глубинных заложений

ВЫВОДЫ

- Сейсмические волны — колебания, распространяющиеся в земной коре.
- Сейсмограф — прибор для измерения и записи сейсмических волн.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Сейсмические волны; сейсмограф; сейсмограмма

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Чем различаются первичные и вторичные сейсмические волны?
2. Опишите принцип работы сейсмографа.
3. Можно ли по сейсмограмме определить положение эпицентра землетрясения?

Свойства механических волн § 59

Все волны делятся на продольные и поперечные. Основное свойство волн — перенос энергии без переноса вещества. Для характеристики волн используют такие физические величины, как амплитуду, период, частоту, длину волны и скорость волны. Рассмотрим, какими ещё свойствами обладают механические волны.

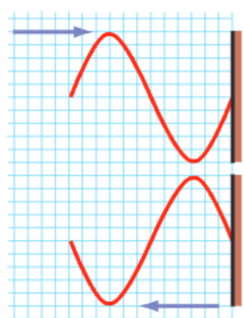
НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое интерференция волн и при каких условиях её можно наблюдать.
- Что такое дифракция волн и при каких условиях вóлны изменяют направление своего распространения.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое механические волны?
- Какие виды волн существуют?
- Что понимают под длиной и скоростью волны?

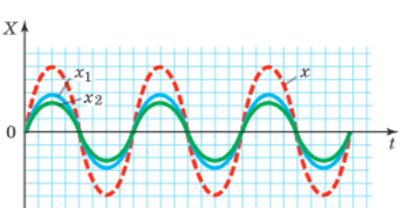
ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ ВОЛН. В однородной среде волны распространяются одинаково во все стороны от источника колебаний. Но что произойдёт, если на пути волны появится какая-либо преграда или препятствие? Волна может изменить своё направление и *отразиться* от препятствия. Например, если возбудить волну в упругом шнуре, один конец которого закреплён, то, дойдя до препятствия, волна отразится и будет распространяться в противоположном направлении. При этом скорость и длина волны останутся неизменными.



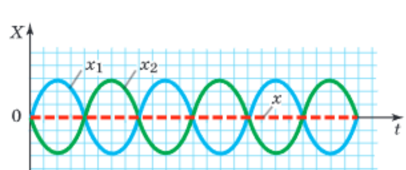
При переходе из одной среды в другую волна может изменять своё направление, и при этом будет наблюдаться *преломление* волны. Преломление волны при переходе из одной среды в другую обусловлено различием скоростей в этих средах.

При переходе морских волн с глубины на мелководье высота волн растёт, длина волны и скорость уменьшаются.

СЛОЖЕНИЕ ВОЛН. Если в воду одновременно бросить два камня на небольшом расстоянии друг от друга, то на поверхности воды появится рябь. При этом, когда две волны накладываются друг на друга, каждая волна распространяется по по-

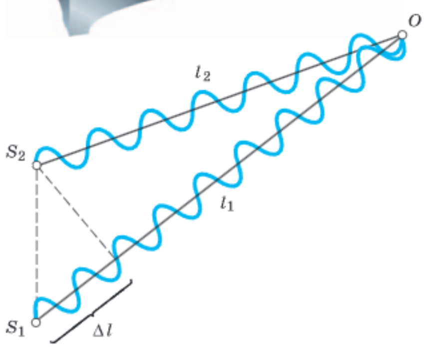


Взаимное усиление волн



Взаимное ослабление волн

верхности воды так, как если бы другой волны вовсе не было. Кроме того, там, где гребни одной волны встречаются с гребнями другой, получаются более высокие волны, т. е. их амплитуда колебаний становится больше. В этом случае принято говорить, что волны *усиливают* друг друга. Там же, где гребни одной волны накладываются на впадины другой, амплитуда колебаний становится значительно меньше. В этом случае мы наблюдаем взаимное *ослабление* волн. Если амплитуды волн равны, то возможно их полное гашение, и ряби на поверхности воды в этих местах не будет.



ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВОЛН. Рассмотрим более подробно опыт по возбуждению волн на поверхности воды. Пусть в прямоугольной кювете возбуждаются две круговые волны с помощью двух ударников в виде шариков, укреплённых на пластине, которая совершает периодические колебания. При этом в некоторой точке O на поверхности воды будет наблюдаться сложение колебаний, образованных двумя волнами от источников S_1 и S_2.

Обозначим пути, проходимые волнами от источников до точки наблюдения O, соответственно l_1 и l_2. Результат сложения волн, приходящих в точку наблюдения, будет зависеть от того, как каждая волна достигает данной точки: в виде гребня или в виде впадины. Это, в свою очередь, зависит от *разности хода* волн $\Delta l = l_1 - l_2$: если разность хода, например, равна длине волны, то первая волна придёт в точку наблюдения позже второй на время, в точности равное периоду колебаний. Последнее означает, что в этом случае гребни волн совпадают и наблюдается *усиление* колебаний. Усиление колебаний будет наблюдаться всегда в тех случаях, когда на разности хода *укладывается целое число длин волн*.

Если на разности хода укладывается половина длины волны (в общем случае *нечётное число полуволн*), то первая волна отстаёт от второй на половину периода (на нечётное число полупериодов). При такой разности хода гребень одной волны будет накладываться на впадину другой, и в точке O будет наблюдаться взаимное *ослабление* (*гашение*) волн. При этом важно подчеркнуть, что для получения устойчивой картины усиления и ослабления результирующих колебаний необходимо, чтобы разность хода волн не зависела от времени.

ВАЖНО

Амплитуда результирующего колебания в данной точке будет максимальна, если разность хода двух волн равна целому числу длин волн:

$$\Delta l = k\lambda, \quad \text{где} \quad k = 0, 1, 2, \dots .$$

Амплитуда результирующего колебания в данной точке будет минимальна, если разность хода двух волн равна нечётному числу полуволн:

$$\Delta l = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad \text{где} \quad k = 0,\ 1,\ 2,\ \dots .$$

Явление сложения в пространстве волн одной частоты, при котором образуется постоянное во времени и пространстве распределение амплитуд результирующих колебаний, называется **интерференцией**. Интерференция наблюдается для всех волновых процессов: механических и электромагнитных.

ДИФРАКЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЛН. Вероятно, вам приходилось наблюдать за поведением волн на поверхности воды, когда волна встречает на своём пути некоторое препятствие. При этом, если размеры препятствия малы по сравнению с длиной волны, например торчащий из воды прутик, небольшой камешек и т. п., то волны его свободно огибают, смыкаясь за ним. Совсем другая картина наблюдается, когда размеры препятствия сравнимы с длиной волны или превосходят её. В этом случае за препятствием (например, большим камнем) образуется область невозмущённой водной поверхности.

Явление отклонения волн от прямолинейного распространения, огибание волнами препятствий называется **дифракцией** (от лат. *diffraction* — разломанный).

Рассмотрим опыт, наглядно демонстрирующий явление дифракции. С помощью узкой дощечки возбуждают волны на поверхности воды, налитой в прямоугольную кювету, снабжённую экраном со щелью. Для этого придают дощечке периодически колебательные движения в направлении, перпендикулярном её продольной оси. В результате по поверхности воды последовательно распространяются гребни со впадинами между ними.

Опыт показывает, что если на пути волн установлен экран со щелью, размеры которой велики по сравнению с длиной волны, то волны проходят сквозь щель, почти не изменяя своей формы и направления распространения. Совершенно иная картина распространения волн наблюдается в случае, когда размеры щели меньше длины волны. При этом кардинально меняется форма волн за щелью — они становятся круговыми.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Движение волн в морях и океанах может приводить к разрушениям береговых склонов и прибрежных объектов. Поэтому для защиты береговой линии или портов от сильных волн устанавливают гидротехнические заградительные сооружения — *волнорезы* и *молы*. Их действие основано на дифракции. Встречаясь с волнорезом, часть волны отражается в сторону моря, а другая часть огибает препятствие. В результате изменяются направление и скорость волн, что помогает значительно уменьшить их энергию и высоту и, следовательно, предотвратить повреждение береговых сооружений.

Инженеры-гидротехники проектируют гидротехнические сооружения с учётом рельефа дна и характеристик волн в заданном районе. Моделирование дифракции волн позволяет точно рассчитать размер и форму отверстий в волнорезах, чтобы уменьшить повреждения от волн и предотвратить заторы.

Кроме того, волны могут оказывать значительное влияние на плавучие сооружения, такие как гигантские морские платформы. При их проектировании необходимо правильно подобрать материалы с высокой прочностью и рассчитать возможные деформации, обусловленные воздействием волн.

ВЫВОДЫ

- Волны могут испытывать отражение и преломление.
- Явление сложения в пространстве волн одной частоты, при котором образуется постоянное во времени и пространстве распределение амплитуд результирующих колебаний, называется интерференцией.
- Явление отклонения волн от прямолинейного распространения, огибание волнами препятствий называется дифракцией.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Отражение и преломление волн; интерференция; дифракция

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. При каких условиях возможно усиление или гашение при сложении волн?
2. Что такое интерференция волн?
3. Какое явление называется дифракцией?
4. При каком соотношении между длиной волны и размерами препятствия дифракция волн проявляется наиболее отчётливо?

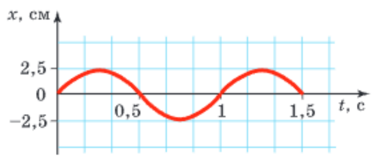
РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ § 60

ЗАДАЧА 1. Для определения ускорения свободного падения ученик воспользовался математическим маятником с длиной подвеса 1,5 м. В эксперименте он наблюдал 20 колебаний за 50,2 с. Какое значение ускорения свободного падения получил ученик?

Дано:	Решение.
$l = 1{,}5$ м $t = 50{,}2$ с $N = 20$	Период колебаний математического маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, откуда $g = 4\pi^2\frac{l}{T^2}$. Период колебаний можно найти по формуле $T = \frac{t}{N}$. Тогда $g = 4\pi^2\frac{lN^2}{t^2}$; $g = 4 \cdot 3{,}14^2 \cdot \frac{1{,}5 \cdot 20^2}{50{,}2^2} = 9{,}4$ (м/с^2).
g — ?	

Ответ: 9,4 м/с^2.

ЗАДАЧА 2. Груз массой 200 г подвешен на пружине и совершает гармонические колебания, график которых приведён на рисунке. Определите жёсткость пружины.



Дано:	Решение.
$x\ (t)$ $m = 0{,}2$ кг	Период колебаний пружинного маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, откуда $k = 4\pi^2\frac{m}{T^2}$. По графику гармонических колебаний определим, что период колебаний $T = 1$ с. Тогда $k = 4 \cdot 3{,}14^2 \cdot \frac{0{,}2\ \text{кг}}{(1\ \text{с})^2} = 7{,}9$ Н/м.
k — ?	

Ответ: 7,9 Н/м.

ЗАДАЧА 3. При наблюдении поперечной волны было отмечено, что для перемещения точки из положения максимального отклонения в положение равновесия требуется 0,2 с. Определите период, частоту и скорость волны, если длина волны составляет 3 м.

Дано:	Решение.
$\lambda = 3$ м $t = 0{,}2$ с	Период колебаний данной точки в 4 раза больше времени, которое необходимо для её перемещения из положения максимального отклонения в положение равновесия: $T = 4t$; $T = 0{,}8$ с. $\nu = \frac{1}{T}$; $\nu = \frac{1}{0{,}8\ \text{с}} = 1{,}25$ Гц. $v = \lambda\nu$; $v = 3\ \text{м} \cdot 1{,}25\ \text{Гц} = 3{,}75$ м/с.
T — ? ν — ? v — ?	

Ответ: 0,8 с; 1,25 Гц; 3,75 м/с.

ЗАДАЧА 4. В штиль на озере с катера бросили в воду массивный якорь, в результате чего по воде пошли волны. Человек, стоящий на берегу на расстоянии 100 м от катера, заметил, что за время 5 с волны 20 раз ударились о береговую линию. При этом расстояние между соседними гребнями волн составило 0,5 м. За какое время волна дошла от катера до берега?

Дано:	Решение.
$s = 100$ м $\tau = 5$ с $n = 20$ $\lambda = 0{,}5$ м — t — ?	Если за время τ волна совершила n колебаний (всплесков или ударов о берег), то период колебаний волны $T = \frac{\tau}{n}$. Зная длину волны λ и период колебаний T, находим скорость волны: $v = \frac{\lambda}{T} = \frac{\lambda n}{\tau}$. Теперь можно вычислить искомое время: $t = \frac{s}{v} = \frac{s\tau}{\lambda n}$; $t = \frac{100\text{ м} \cdot 5\text{ с}}{0{,}5\text{ м} \cdot 20} = 50$ с.

Ответ: 50 с.

ЗАДАЧА 5. Подвешенное на длинной верёвке цилиндрическое ведёрко, доверху наполненное водой, совершает малые гармонические колебания. В центре донышка ведёрка имеется отверстие, через которое постепенно вытекает вода. Как с течением времени будет изменяться период колебаний ведёрка? Трением и затуханием колебаний пренебрегите.

Решение.

В отличие от периода колебаний обычного математического маятника, период колебаний ведёрка зависит не просто от длины верёвки, а от расстояния от точки подвеса до положения центра тяжести ведёрка с водой. По мере вытекания воды центр тяжести ведёрка сначала будет понижаться, затем достигнет своего нижайшего положения, при котором в ведёрке ещё будет некоторое количество воды, а когда вода полностью вытечет — центр тяжести вновь займёт своё первоначальное положение (в центре ведёрка). Следовательно, по мере вытекания воды период колебаний сначала будет увеличиваться, затем достигнет своего наибольшего значения, после чего начнёт уменьшаться и достигнет своего первоначального значения к моменту, когда ведёрко станет пустым.

Ответ: период колебаний сначала будет увеличиваться, достигнет своего наибольшего значения, после чего начнёт уменьшаться и достигнет своего первоначального значения к моменту, когда ведёрко станет пустым.

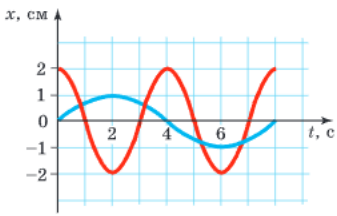
Задачи для самостоятельного решения

1. Маятник совершает 150 колебаний за 5 минут. Определите период и частоту колебаний маятника.
2. Скорость комара составляет 2 м/с, при этом он совершает 800 взмахов крыльями за 1 с. Определите период колебаний крыльев комара и скажите, сколько взмахов крыльями сделает комар, пролетев расстояние 18 м.

3. Маятник часов имеет длину 25 см. Сколько времени длится одно колебание? Известно, что часы спешат на 1 мин в сутки. На сколько нужно изменить длину маятника, чтобы часы показывали точное время?

4. Определите отношение длин маятников, если за одно и то же время один из них совершил 90 колебаний, а другой — 60.

5. Как изменится период колебаний математического маятника, если его длину увеличить на 5 %?



6. Маятниковые часы показывают точное время на Земле. За какое время минутная стрелка сделает полный оборот, если эти маятниковые часы поместить на Луну? Ускорение свободного падения на Луне примите равным 1,6 м/с^2.

7. По графику, приведённому на рисунке, определите амплитуду, период и частоту колебаний.

8. На пружине жёсткостью 25 Н/м подвешен груз массой 160 г. Определите период колебаний груза на пружине. Постройте график колебаний, если их амплитуда составляет 3 см. При построении графика примите, что в момент времени $t = 0$ координата $x = 0$.

9. Груз массой 200 г подвешен на пружине и совершает гармонические колебания с периодом 1 с. Груз какой массы нужно дополнительно подвесить к маятнику, чтобы период колебаний увеличился до 2 с?

10. Груз на пружине совершает гармонические колебания с периодом 0,3 с. На сколько уменьшится длина пружины, если снять с неё груз?

11. Маятник длиной 1,5 м находится в вагоне движущегося поезда. При какой скорости поезда маятник будет особенно сильно раскачиваться? Длина рельсов составляет 25 м.

12. Рыболов заметил, что за 10 с поплавок совершил 15 колебаний, а расстояние между соседними гребнями волн 80 см. Определите скорость распространения волн.

13. Мальчик плещется у одного края бассейна и создаёт волны. Человек, стоящий у противоположного края бассейна, заметил, что расстояние между соседними гребнями волн составляет 0,4 м. Причём первая волна дошла до этого края бассейна через 15 с после того, как мальчик начал плескаться, и за 5 с произошло 8 ударов о борт бассейна. Определите расстояние между указанными краями бассейна.

§ 61 ЛАБОРАТОРНЫЕ И ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ

Лабораторная работа № 5

Изучение колебаний нитяного маятника

Цель работы

Выяснить, от каких величин зависит и от каких не зависит период колебаний нитяного маятника.

Оборудование и материалы

Штатив с муфтой и лапкой, три груза разной массы, нить, секундомер, линейка.

Теоретическая справка

Период гармонических колебаний математического маятника вычисляется по формуле

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (1)$$

где l — длина нити; g — ускорение свободного падения.

Это означает, что в определённых пределах (при малых углах отклонения нити от вертикали), которые соответствуют гармоническим колебаниям, период колебаний не зависит от амплитуды колебаний и массы груза.

Выполнив работу, вы проверите, насколько справедлива эта формула для реального маятника.

Ход работы

Задание 1. Зависимость периода колебаний нитяного маятника от длины нити

- Прикрепите нить к грузу и подвесьте его к штативу так, чтобы длина нити l оказалась равна 1 м.
- Отклоните груз от положения равновесия на 4—5 см и отпустите.
- Измерьте время t, за которое маятник совершает $N = 20$ полных колебаний.
- Проведите несколько таких опытов, каждый раз увеличивая длину маятника на 10 см.
- Для каждого опыта вычислите период колебаний нитяного маятника: $T_{\text{эксп}} = \frac{t}{N}$.
- Вычислите теоретическое значение периода колебаний маятника $T_{\text{теор}}$ по формуле (1).
- Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу в своей тетради.

№ опыта	l, м	t, с	N	$T_{\text{эксп}}$, с	$T_{\text{теор}}$, с

- Постройте график зависимости периода колебаний нитяного маятника $T_{\text{эксп}}$ от длины нити l, соединив экспериментальные точки плавной линией.
- Другим цветом постройте график зависимости периода колебаний математического маятника $T_{\text{теор}}$ от длины нити l. Совпадают ли построенные графики?
- Как зависит период колебаний нитяного маятника от его длины?

Задание 2. Зависимость периода колебаний нитяного маятника от массы груза

- Установите длину нити маятника 1 м.
- Отклоните груз нитяного маятника (с известной массой m) от положения равновесия на 4—5 см и отпустите.
- Измерьте время t, за которое маятник совершает $N = 20$ полных колебаний.
- Прикрепите к нити поочерёдно грузы разной массы и повторите опыт.
- Для каждого опыта вычислите период колебаний нитяного маятника: $T_{эксп} = \frac{t}{N}$.
- Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу в своей тетради.

№ опыта	l, м	m, г	t, с	N	$T_{эксп}$, с

- Зависит ли период колебаний нитяного маятника от массы груза? (Учтите, что разница в значении периода не более цены деления вашего прибора включается в погрешность измерений.)

Задание 3. Зависимость периода колебаний нитяного маятника от амплитуды

- Отклоните груз нитяного маятника от положения равновесия на 5 см и отпустите.
- Измерьте время t, за которое маятник совершает $N = 20$ полных колебаний.
- Повторите опыт с другой амплитудой колебаний (например, 10 и 15 см).
- Для каждого опыта вычислите период колебаний нитяного маятника: $T_{эксп} = \frac{t}{N}$.
- Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу в своей тетради.

№ опыта	l, м	A, см	t, с	N	$T_{эксп}$, с

- Зависит ли период колебаний маятника от амплитуды колебаний в исследуемом интервале 5—15 см? (Учтите, что разница в значении периода не более цены деления вашего прибора включается в погрешность измерений.)
- Сделайте выводы.

Лабораторная работа № 6

Изучение колебаний пружинного маятника

Цель работы

Выяснить, от каких величин зависит и от каких не зависит период колебаний пружинного маятника.

Оборудование и материалы

Штатив с муфтой и лапкой, набор грузов по механике, набор пружин различной жёсткости, динамометр, секундомер, линейка.

Теоретическая справка

Период гармонических колебаний идеального пружинного маятника вычисляется по формуле

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \qquad (2)$$

где m — масса груза; k — жёсткость пружины.

Это означает, что период колебаний не зависит от амплитуды колебаний, но зависит от массы груза и жёсткости пружины.

Выполните измерения с реальным пружинным маятником и установите, насколько хорошо эта формула выполняется для реального пружинного маятника.

Ход работы

Задание 1. Зависимость периода колебаний пружинного маятника от массы груза

- Закрепите пружину в штативе и подвесьте к ней один груз массой $m = 0{,}05$ кг.
- Измерьте удлинение Δx пружины с подвешенным грузом.
- Вычислите жёсткость пружины по формуле $k = \frac{mg}{\Delta x}$ (поскольку сила тяжести груза уравновешивается силой упругости пружины: $k\Delta x = mg$).
- Отклоните груз вниз от положения равновесия на 1—2 см и отпустите.
- Измерьте время t, за которое маятник совершает $N = 20$ полных колебаний.
- Проведите несколько таких измерений, прикрепляя к пружине поочерёдно 2, 3, 4 и 5 грузов.
- Для каждого опыта вычислите период колебаний пружинного маятника: $T_{\text{эксп}} = \frac{t}{N}$.
- Вычислите теоретическое значение периода колебаний пружинного маятника по формуле (2).
- Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу в своей тетради.

№ опыта	k, Н/м	m, кг	t, с	N	$T_{\text{эксп}}$, с	$T_{\text{теор}}$, с

- Постройте график зависимости периода колебаний пружинного маятника $T_{\text{эксп}}$ от массы груза m, соединив экспериментальные точки плавной линией.
- Другим цветом постройте график зависимости периода колебаний пружинного маятника $T_{\text{теор}}$ от массы груза m. Совпадают ли они?
- Сделайте вывод о том, как зависит период колебаний пружинного маятника от массы груза.

Задание 2. Зависимость периода колебаний пружинного маятника от жёсткости пружины

- Закрепите пружину в штативе и подвесьте к ней один груз массой $m = 0{,}1$ кг.
- Вычислите жёсткость пружины по формуле $k = \frac{mg}{\Delta x}$, как описано ранее.
- Отклоните груз вниз от положения равновесия на 1—2 см и отпустите.
- Измерьте время t, за которое маятник совершает $N = 20$ полных колебаний.

- Определите описанным способом жёсткости остальных пружин и повторите опыты при одной и той же массе груза.
- Для каждого опыта вычислите период колебаний пружинного маятника: $T_{эксп} = \frac{t}{N}$.
- Вычислите теоретическое значение периода колебаний пружинного маятника по формуле (2).
- Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу в тетради.

№ опыта	k, Н/м	m, кг	t, с	N	$T_{эксп}$, с	$T_{теор}$, с

- Постройте график зависимости периода колебаний пружинного маятника $T_{эксп}$ от жёсткости пружины k, соединив экспериментальные точки плавной линией.
- Другим цветом постройте график зависимости периода колебаний пружинного маятника $T_{теор}$ от жёсткости пружины k. Совпадают ли они?
- Сделайте вывод о том, как период колебаний пружинного маятника зависит от жёсткости пружины.

Задание 3. Зависимость периода колебаний пружинного маятника от амплитуды

- Закрепите пружину в штативе и подвесьте к ней один груз массой $m = 0{,}1$ кг.
- Отклоните груз пружинного маятника вниз от положения равновесия на расстояние $A = 1$ см и отпустите.
- Измерьте время t, за которое маятник совершает $N = 20$ полных колебаний.
- Повторите измерения с различными амплитудами колебаний (например, от 1 см до 5 см).
- Для каждого опыта вычислите период колебаний пружинного маятника: $T_{эксп} = \frac{t}{N}$.
- Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу в своей тетради.

№ опыта	k, Н/м	m, кг	A, см	t, с	N	$T_{эксп}$, с

- Сделайте вывод о зависимости периода колебаний пружинного маятника от амплитуды.
- Как вы думаете, будет ли зависеть период колебаний пружинного маятника от амплитуды при больших значениях A?

Лабораторная работа № 7

Измерение ускорения свободного падения с помощью нитяного маятника

Цель работы

Определить ускорение свободного падения с помощью нитяного маятника.

Оборудование и материалы

Штатив, груз, нить, секундомер, линейка.

Ход работы

- Прикрепите нить длиной $l = 1$ м к грузу и подвесьте его к штативу.
- Отклоните груз от положения равновесия на 4—5 см и отпустите.
- Измерьте время t, за которое маятник совершает $N = 20$ полных колебаний.
- Повторите опыт 5 раз, каждый раз увеличивая длину нити на 10 см.
- Для каждого опыта вычислите период колебаний маятника по формуле: $T_{\text{эксп}} = \frac{t}{N}$.
- Вычислите значения квадрата периода колебаний нитяного маятника $T^2_{\text{эксп}}$.
- Постройте график зависимости квадрата периода колебания маятника от длины нити.
- Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу в своей тетради.

№ опыта	l, м	t, с	N	$T_{\text{эксп}}$, с	$T^2_{\text{эксп}}$, с^2	$g_{\text{эксп}}$, м/с^2

- Пользуясь формулой периода колебаний маятника, вычислите ускорение свободного падения для каждого опыта. Найдите среднее значение ускорения свободного падения.
- Отличается ли измеренное значение ускорения свободного падения от известного значения $g = 9{,}8$ м/с^2? Если отличается, то с чем это может быть связано? При какой длине маятника результат получился наиболее точным?

Практические работы-исследования

Изучаем механические колебания

ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКА ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

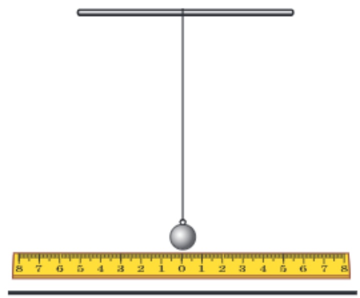
График зависимости координаты груза математического маятника от времени представляет собой синусоиду. Проверим это на опыте. Для этого используем видеосъёмку колебаний маятника и компьютерный секундомер, позволяющий измерять время с точностью до долей секунды.

Цель работы

Построить график гармонических колебаний.

ПОМОЩНИК

- В качестве оборудования можно использовать штатив, нить, металлический шарик, смартфон или фотокамеру. В этом опыте вместо обычной линейки удобно использовать линейку с нулём отсчёта посередине.



- Прикрепите нить длиной $l = 1$ м к шарику и подвесьте его к штативу. Установите линейку горизонтально на столе так, чтобы шарик располагался над отметкой «0».
- Установите смартфон или камеру для съёмки колебаний.
- Начните съёмку. Отклоните шарик от положения равновесия на 10 см и отпустите. После четырёх-пяти колебаний остановите съёмку.
- Откройте записанный видеофайл в видеоредакторе. Сделайте стоп-кадры для одного из колебаний через каждые 0,2 с.
- По полученным фотографиям рассмотрите положения шарика через каждые 0,2 с и запишите в таблицу значения координаты x шарика, измеренные по линейке, и время t. Заметьте, что координата $x = 0$ соответствует отметке на линейке, при которой шарик находится в равновесии. Координаты шарика, лежащие слева от положения равновесия, записываются со знаком «минус».
- Полученные точки нанесите на координатную плоскость (xt) и соедините их плавной линией.
- Сделайте вывод.

Дополнительное задание

- Поместите маятник в прозрачную кювету с водой и повторите опыт. Какие колебания вы наблюдаете? Через сколько полных колебаний амплитуда колебаний значительно уменьшится?

ИЗУЧЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ МАЯТНИКА, СОСТОЯЩЕГО ИЗ ДВУХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЁННЫХ ПРУЖИН

В § 23 мы рассмотрели последовательное и параллельное соединение пружин, и вы уже знаете, как определить эффективную жёсткость системы, состоящей из нескольких пружин. Рассмотрим, как определить период колебаний пружинного маятника, состоящего из двух последовательно соединённых пружин.

Цель работы

Определить период колебаний пружинного маятника, состоящего из двух последовательно соединённых пружин.

ПОМОЩНИК

- В качестве оборудования можно использовать штатив с муфтой и лапкой, две пружины, жёсткости которых известны, набор грузов из механики, линейку, секундомер.
- Закрепите первую пружину в штативе и прикрепите к ней последовательно вторую пружину. К системе пружин подвесьте груз массой 50 г.
- Отклоните груз пружинного маятника вниз от положения равновесия на 2—3 см и отпустите.

- Измерьте время t, за которое маятник совершает $N = 20$ полных колебаний.
- Вычислите период колебаний пружинного маятника: $T_{\text{эксп}} = \frac{t}{N}$.
- Вычислите теоретическое значение периода колебаний пружинного маятника по формуле (2), используя эффективное значение жёсткости системы пружин: $\frac{1}{k_{\text{эф}}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$.
- Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу в своей тетради.

№ опыта	k, Н/м	m, кг	t, с	N	$T_{\text{эксп}}$, с	$T_{\text{теор}}$, с

- Повторите опыт, используя другие пружины.
- Сделайте вывод.

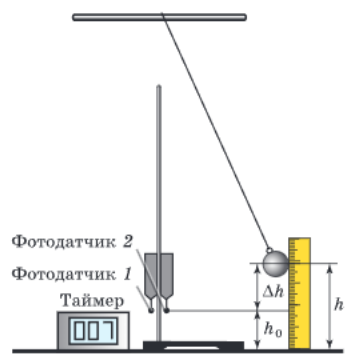
ПРОВЕРКА ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ ПОМОЩИ МАЯТНИКА

Рассмотрим ещё один способ проверки закона сохранения механической энергии. Для этого используем нитяной маятник и электронный таймер, с помощью которого можно определить скорость маятника в нижней точке.

Цель работы

Проверить закон сохранения энергии при помощи нитяного маятника.

ПОМОЩНИК



- В качестве оборудования можно использовать штатив с муфтой и лапкой, шарик, нить, линейку, электронный таймер, снабжённый двумя фотоэлектрическими датчиками.
- Прикрепите нить длиной $l = 1$ м к шарику и подвесьте его к штативу. Укрепите на штатив оптические датчики таймера на уровне положения равновесия маятника, установив их непосредственно рядом друг с другом.
- Измерьте расстояние s между датчиками.
- Измерьте расстояние h_0 между шариком в положении равновесия и поверхностью стола. Измерьте высоту h, с которой шарик маятника начинает движение.
- С заданной высоты h осторожно отпустите шарик и зафиксируйте с помощью таймера время t его пролёта между датчиками.
- Так как расстояние между датчиками таймера мало́, скорость шарика при движении между ними можно считать мгновенной. В этом случае скорость шарика можно найти по формуле $v = \frac{s}{t}$. Это скорость шарика в нижней точке.
- Примем за нулевой уровень потенциальной энергии высоту, на которой находится шарик в положении равновесия. Тогда кинетическая энергия шарика в нижней точке маятника: $E_{\text{к}} = mv^2/2$, а потенциальная энергия шарика в верхней точке маятника: $E_{\text{п}} = mg\Delta h$, где $\Delta h = h - h_0$.

- Для проверки закона сохранения энергии нужно проверить равенство $mv^2/2 = mg\Delta h$, или $v^2/2 = g\Delta h$.
- Проделайте несколько опытов, увеличивая высоту, с которой шарик начинает движение. Проверьте выполнение закона сохранения энергии в каждом случае.
- Сделайте вывод.

КЕЙС

НЕОБЫЧНЫЙ МАЯТНИК

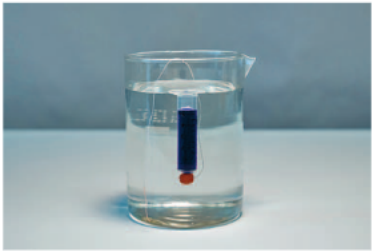
На обобщающем уроке физики, посвящённом колебаниям, наши знакомые ученики Петя и Саша задали учителю вопрос, суть которого заключалась в следующем: возможно ли возникновение колебаний в системе без прямого внешнего воздействия на эту систему? Учитель похвалил ребят за вопрос и ответил в целом утвердительно.

Как пояснил учитель, возникновение колебаний возможно в случае, когда части системы находятся в состоянии неустойчивого равновесия. В качестве примера представляет интерес рассмотреть поведение двух жидкостей различной плотности в процессе их смешивания.

Опираясь на рекомендации учителя, попытайтесь проверить возможность возникновения таких колебаний.

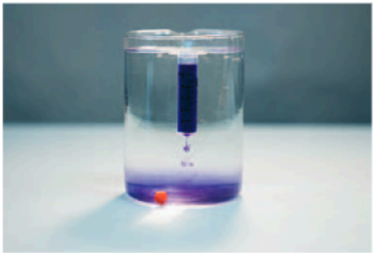
ПОМОЩНИК

- В качестве оборудования нам потребуются: цилиндрический стеклянный сосуд объёмом около 1 л, прозрачный пластиковый корпус от шприца на 3—5 мл, пластилин, чернила, нить, соль, вода.
- Широкий сосуд наполните чистой водой.
- От корпуса шприца отрежьте его нижний патрубок, в результате чего образуется отверстие диаметром 2—3 мм.
- В отдельном сосуде приготовьте концентрированный солевой раствор и подкрасьте его чернилами.
- Из пластилина изготовьте пробку в виде шарика, в который закатайте один из кончиков нити.
- Отверстие в малом сосуде аккуратно закройте пробкой и налейте в него подкрашенный солевой раствор (примерно до $^3/_4$ его высоты).
- Осторожно опустите малый сосуд в вертикальном положении в широкий сосуд и добейтесь его устойчивого плавания. При этом свободный конец нити держите над поверхностью воды.



КЕЙС

- Придерживая за верхнюю часть малый сосуд, лёгким движением с помощью нити отсоедините пробку, освобождая тем самым отверстие в малом сосуде.
- Внимательно наблюдайте за процессом вытекания подкрашенной жидкости из малого сосуда. Действительно ли имеет место периодический процесс выталкивания более плотной жидкости в воду?
- Соответствует ли наблюдаемая картина фотографии реального процесса возвращения системы к устойчивому состоянию?



ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Механическое движение, которое точно или приблизительно повторяется через равные промежутки времени, называется механическими колебаниями.
- Колебания могут быть свободными и вынужденными.
- Колебания, происходящие только за счёт первоначального запаса энергии системы, называются свободными колебаниями. Свободные колебания происходят под действием внутренних сил.
- Механические колебания характеризуются периодом, частотой и амплитудой колебаний.
- Простейшими колебательными системами являются пружинный и математический маятники.
- Период колебаний математического маятника зависит от длины нити и ускорения свободного падения и не зависит от массы груза и амплитуды колебаний.
- Колебания, которые происходят под действием силы, пропорциональной смещению колеблющегося тела из положения равновесия и направленной противоположно этому смещению, называются гармоническими.
- Колебания таких систем, как математический и пружинный маятники, являются гармоническими.
- При отсутствии сил трения механическая энергия колебательной системы сохраняется.
- Колебания с уменьшающейся амплитудой называются затухающими.

- Колебания, происходящие под действием внешней периодически изменяющейся силы, называются вынужденными колебаниями. Внешняя периодически изменяющаяся сила, вызывающая эти колебания, называется вынуждающей силой.
- Явление резкого увеличения амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты вынуждающей силы с собственной частотой колебательной системы называется резонансом.
- Колебания, распространяющиеся в пространстве с течением времени, называются волной.
- Волны бывают продольными и поперечными.
- Расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний, называется длиной волны. Все волны распространяются с определённой скоростью.
- Сейсмические волны — колебания, распространяющиеся в земной коре. Сейсмограф — прибор для измерения и записи сейсмических волн.
- Явление сложения в пространстве волн одной частоты, при котором образуется постоянное во времени и пространстве распределение амплитуд результирующих колебаний, называется интерференцией.
- Явление отклонения волн от прямолинейного распространения, огибание волнами препятствий называется дифракцией.

Вопросы для обсуждения

? Объясните, в чём различия между продольными и поперечными волнами.

? Изменится ли период колебаний пружинного маятника, если его перенести из воздуха в воду?

? Изменится ли период колебаний математического маятника, если его поместить: на экватор; на полюс?

? Почему строй солдат должен идти вольным шагом по мосту или эстакаде?

? Почему в квартире начинают дрожать стёкла, если по улице проезжает тяжёлая автомашина?

Темы исследовательских и проектных работ

- Автоколебательные системы.
- Полезный резонанс.
- Вредный резонанс.
- Резонанс механических волн в природе.
- Волновые явления в природе.
- Самые большие волны.
- Землетрясение как волновой процесс.
- Строительство и резонанс.
- Применение маятниковых систем в технике.
- Исследования Галилея.

Ответы к задачам для самостоятельного решения

ГЛАВА 1

1. 30 м; 40 м; 50 м.
2. 1 ч; 90 км.
3. 11:45; 105 км.
5. 20 м/с.
6. 7,5 км/ч.
7. 1,5 мин; 135 м.
8. 55 м; 129 м.
9. 2,5 м/с^2; 15 м/с; 105 м.
10. 1,4 с; 10 м.
12. 383,4 м; 0,5 с.
13. 12 м.
14. 29,8 км/с.
15. 0,6 м/с^2.
16. 13,1 м/с; 26,2 рад/с; 13,1 м/с.
17. 37,7 м/с.

ГЛАВА 2

1. 0,125 м/с^2.
2. 24 Н.
3. 10 м/с^2.
4. 6400 км.
5. Уменьшилось на 0,13 м/с^2.
6. Земля притягивает Луну в 1,3 раза сильнее, чем Солнце притягивает Луну.
7. $G = \dfrac{4\pi^2 R^3}{T^2 M_C}$.
8. 7,6 км/с.
9. В 2 раза.
10. 42 000 км.
11. 0,6.
12. 0,58.
13. 8,2 м/с^2, вверх.
14. 20 Н/м; 180 Н/м; 40 Н/м.

ГЛАВА 3

1. 50 Н.
2. ≈ 90°.
3. 54 мН.
4. 250 Н.
5. 52,2 Н; 53,8 Н.

ГЛАВА 4

1. 1,9.
2. 35,2 см.
3. 100 см^3.
4. 0,024 л/с.
5. 8 м/с.

ГЛАВА 5

1. 2,3 м/с.
2. 5000 кг · м/с.
3. 1 кг · м/с; 0,5 кг · м/с; 100 Н; 10 Н.
4. 400,8 м/с.
5. 40 м/с.
6. 1,8 м/с.
7. 7,1 км/с.
8. 120 Дж.
9. Во втором случае в 3 раза больше.
10. За вторую половину времени падения в 3 раза больше.
11. 4,5 м/с.
12. 11,2 м/с; 1045 Н.
13. 48 м.

ГЛАВА 6

1. 2 с; 0,5 Гц.
2. 1,25 · 10^{-3} с; 7200.
3. 1 с; 0,3 мм.
4. $l_2 / l_1 = 2{,}25$.
5. Увеличится на 2,5 %.
6. ≈ 2,5 ч.
7. 1 см; 4 с; 0,25 Гц; 2 см; 8 с; 0,125 Гц.
8. 0,5 с.
9. 600 г.
10. 2,2 см.
11. 10,2 м/с.
12. 1,2 м/с.
13. 9,6 м.