

Серия «Среднее профессиональное образование»

А. В. Благин, И. Г. Попова

# ФИЗИКА

## УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Рекомендовано Научно-методическим советом Международного научного общественного объединения «МАИТ» для использования в качестве учебного пособия для подготовки по предметам общеобразовательного цикла в учреждениях среднего образования (рецензия № РЭЗ 21-02 от «17» мая 2021 г.)

Ростов-на-Дону  
ФЕНИКС  
2022

УДК 53(075.32)  
ББК 22.3я723  
КТК 13  
Б68

**Рецензенты:**

*Р. В. Пигулев*, заведующий кафедрой физики Северо-Кавказского федерального университета, кандидат физико-математических наук, доцент;

*В. М. Мухортов*, профессор кафедры нанотехнологий Южного федерального университета, доктор физико-математических наук, профессор

**Благин А. В.**

Б68 Физика : учебное пособие / А. В. Благин, И. Г. Попова. — Ростов н/Д : Феникс, 2022. — 349, [1] с. : ил. — (Среднее профессиональное образование).

ISBN 978-5-222-36297-6

Пособие предназначено студентам системы среднего профессионального образования, а также учителям физики и педагогам дополнительного образования. Оно будет полезно студентам младших курсов и преподавателям физики вузов.

В книге содержится последовательное изложение всех разделов курса физики. В конце каждого раздела приведены примеры решения задач, а также вопросы и задачи для самостоятельной работы обучающихся. Особенностью пособия является использование большого количества примеров проявления физических законов в природе и применения представлений физики в современной технике и технологиях.

Учебное пособие полностью соответствует ФГОС СПО и типовой рабочей программе по физике.

УДК 53(075.32)  
ББК 22.3я723

# СОДЕРЖАНИЕ

ОТ АВТОРОВ.....	6
1. МЕХАНИКА.....	8
1.1. Кинематика поступательного движения.....	13
1.2. Кинематика вращательного движения.....	13
1.3. Динамика поступательного движения.....	14
Дополнение 1.3.1. Силы инерции.....	23
Дополнение 1.3.2. Элементы динамики вращательного движения.....	28
1.4. Законы сохранения в механике.....	32
1.5. Основы механики жидкостей и газов.....	37
1.6. Механические колебания и упругие волны.....	40
1.7. Элементы специальной и общей теории относительности.....	52
Упражнения с решениями и пояснениями.....	70
<i>Вопросы и задачи для самостоятельной работы</i> .....	79
2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА.....	84
2.1. Основы молекулярно-кинетической теории.....	84
2.2. Давление. Модель идеального газа. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории.....	85
2.3. Температура в молекулярно-кинетической теории как мера энергии теплового движения.....	86
2.4. Уравнение состояния идеального газа.....	87
2.5. Базовые понятия термодинамики.....	88
2.6. Внутренняя энергия.....	91
2.7. Количество теплоты. Теплоемкость.....	92
2.8. Уравнение теплового баланса.....	93
2.9. Работа в термодинамике.....	95
2.10. Первый закон термодинамики и его применение в тепловых процессах.....	97
2.11. Обратимые и необратимые процессы. Второй закон термодинамики.....	99
2.12. Циклические процессы и их КПД. Принцип действия тепловых двигателей.....	102
Упражнения с решениями и пояснениями.....	108
<i>Вопросы и задачи для самостоятельной работы</i> .....	114
3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ.....	117
3.1. Электрический заряд и его свойства.....	117
3.2. Взаимодействие зарядов в вакууме. Закон Кулона.....	118

3.3. Электрическое поле. Напряженность поля.....	119
3.4. Принцип суперпозиции электрических полей. Поле диполя.....	120
3.5. Линии напряженности. Поток вектора $\vec{E}$ .....	122
3.6. Поле заряженной плоскости и сферы .....	123
3.7. Работа сил электрического поля. Потенциальная энергия. Потенциал .....	125
3.8. Связь напряженности и потенциала электрического поля.....	128
3.9. Постоянный электрический ток. Сила тока. Плотность тока .....	141
3.10. Сопротивление проводников. Закон Ома.....	142
3.11. Соединение проводников в электрических цепях.....	143
3.12. Закон Ома для полной электрической цепи.....	145
3.13. Работа и мощность тока. Закон Джоуля–Ленца .....	147
3.14. Коэффициент полезного действия источника тока .....	148
3.15. Электрический ток в различных средах .....	149
3.16. Магнитное поле. Индукция магнитного поля .....	156
3.17. Сила Лоренца. Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле.....	160
3.18. Взаимодействие токов. Закон Ампера .....	162
3.19. Магнитное поле в веществе.....	163
3.20. Явление электромагнитной индукции. Закон Фарадея. Правило Ленца.....	165
3.21. Генератор переменного тока (генератор переменной ЭДС).....	167
3.22. Явление взаимной индукции. Трансформатор .....	168
Упражнения с решениями и пояснениями .....	175
<i>Вопросы и задачи для самостоятельной работы</i> .....	183
<b>4. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА.....</b>	<b>188</b>
4.1. Электрический колебательный контур.....	188
4.2. Закон сохранения энергии для процессов в контуре .....	191
4.3. Вынужденные электрические колебания .....	193
4.4. Диаграмма «ток — напряжение». Полное сопротивление цепи.....	197
4.5. Мощность переменного тока.....	199
4.6. Резонанс тока и напряжения .....	202
4.7. Электромагнитное поле и электромагнитные волны .....	205
4.8. Энергия волны. Давление электромагнитных волн .....	209
Упражнения с решениями и пояснениями .....	221
<i>Вопросы и задачи для самостоятельной работы</i> .....	230



---

5. ОПТИКА .....	233
5.1. Основные понятия оптики.	
Свет — электромагнитная волна.....	233
5.2. Геометрическая оптика.....	234
5.3. Волновая оптика. Принцип Гюйгенса.....	240
5.4. Дисперсия света .....	242
5.5. Интерференция волн .....	243
5.6. Дифракция волн .....	246
5.7. Спектральные приборы. Дифракционная решетка .....	248
Упражнения с решениями и пояснениями .....	252
Вопросы и задачи для самостоятельной работы .....	258
6. ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ.....	260
6.1. Модель атома. Постулаты Бора.....	260
6.2. Лазеры .....	263
6.3. Гипотеза Планка. Фотон.....	267
6.4. Фотоэффект и эффект Комптона.....	268
6.5. Состав атомного ядра. Изотопы. Энергия связи ядер .....	272
6.6. Ядерные реакции .....	275
6.7. Радиоактивность.....	276
6.8. Закон радиоактивного распада .....	278
6.9. Цепная реакция деления урана .....	279
Упражнения с решениями и пояснениями .....	282
Вопросы и задачи для самостоятельной работы .....	288
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	291
<i>Приложение 1. Элементы квантовой механики.</i>	
Сверхпроводимость и сверхтекучесть.....	291
Вопросы к Приложению 1 .....	311
<i>Приложение 2. Основы зонной теории твердых тел.....</i>	313
Вопросы к Приложению 2 .....	326
<i>Приложение 3. Элементы физики полупроводников.</i>	
<i>P-n-переход .....</i>	327
Вопросы к Приложению 3.....	336
<i>Приложение 4. Введение в электронику: принципы</i>	
<i>работы варикапа, фотодиода, прибора с зарядовой связью,</i>	
<i>транзистора, микрочипа .....</i>	337
Вопросы к Приложению 4.....	349
ЛИТЕРАТУРА .....	350

## ОТ АВТОРОВ

Настоящее пособие предназначено в первую очередь студентам колледжей инженерно-технических и ИТ-направлений. Оно может быть полезным всем категориям студентов, изучающих в том или ином объеме физику.

Пособие представляет собой учебный курс, состоящий из шести разделов: «Механика», «Молекулярная физика и термодинамика», «Электричество и магнетизм», «Электродинамика», «Оптика» и «Основы квантовой и ядерной физики». В нем кратко рассмотрены основы специальной и общей теории относительности, базовые понятия квантовой механики и физики конденсированного состояния, физические основы электронной техники.

Впервые в учебной литературе по физике для СПО в доступной форме рассмотрены интересные и практически значимые вопросы, которые в традиционных учебных пособиях, как правило, рассматриваются лишь вскользь (например, силы инерции в механике, движение парусников, динамика вращательного движения, распределение молекул газа по скоростям, термодинамические циклы в автомобильных двигателях, принципы действия электронных устройств, ядерные реакции).

Пособие содержит дополнительный материал, знакомить с которым, имея возможность сверяться с изложением компактного и в то же время систематического и полного введения в современную физику, будет интересно всем любознательным читателям. Традиционный материал, входящий в рабочие программы дисциплины «Физика», уже многие десятилетия излагается сжато, конспективно, без громоздких математических выкладок.

Пособие может быть использовано студентами для самостоятельного изучения соответствующего материала. Оно является базой для подготовки к промежуточной аттестации и экзаменам по физике. Кроме того, книга должна помочь студенту и в тех случаях, когда он что-то не успел записать на занятии, какие-то занятия были им пропущены, в чем-то трудно оказалось разобраться по другим учебникам.

Авторы выражают надежду, что данное пособие будет способствовать развитию интереса к современной физике. Книга будет полезна учителям школ и преподавателям вузов, в сферу деятельности которых входит преподавание физики. Несомненно, они смогут пополнить свой «арсенал» наглядными и интересными примерами. Содержание пособия соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту и действующей образовательной программе.

Содержание учебного материала видно из оглавления. Даны краткие теоретические сведения и все формулы курса. В конце каждого раздела приводятся примеры решения задач по рассмотренным темам, а также вопросы и задачи для самостоятельного решения. Ответы приведены ко всем задачам. Ряд заданий посвящен открытиям в физике, сделанным в последние годы. Большинство вопросов и задач стандартные, в то же время в совокупности они обладают необходимой полнотой практической части курса, регламентированной Рабочей программой по физике для студентов СПО, обучающихся по укрупненной группе направлений подготовки «Инженерное дело, технологии и технические науки».

Из преподавательского опыта авторов следует, что примеры решения и контрольные задания при изучении начального курса физики (7–9-е классы) желательно приводить небольшими порциями после каждой темы. В ходе занятий происходит первое систематическое ознакомление обучающихся с явлениями и закономерностями их протекания. Поэтому необходимо закрепление знаний на каждом занятии. Для студентов системы СПО предпочтительно иное построение — большими порциями, по разделам. Предполагается, что студенты самостоятельно прорабатывают учебный материал после изучения каждого раздела, у них формируются осмысленные представления о классах явлений, своеобразии теории и методов изучения каждого раздела физики.

Для текущей работы преподаватель может отбирать задания по своему усмотрению, не ограничиваясь тем материалом, который приведен в пособии.

# 1. МЕХАНИКА

**Механика** изучает простейшую (механическую) форму движения материи, которая состоит в перемещении тел или их частей. Механика делится на кинематику, динамику и статику. **Кинематика** изучает движение без учета вызвавших его причин, **динамика** — с учетом причин, вызвавших перемещение, **статика** изучает равновесие тел. В курсе физики статика обычно отдельно не рассматривается.

## 1.1. Кинематика поступательного движения

**Основные понятия кинематики.** *Механическим движением*, или просто *движением*, называется изменение с течением времени положения тела в пространстве, определяемого по отношению к другим телам. Тело, по отношению к которому определяют характер движения, называется *телом отсчета*.

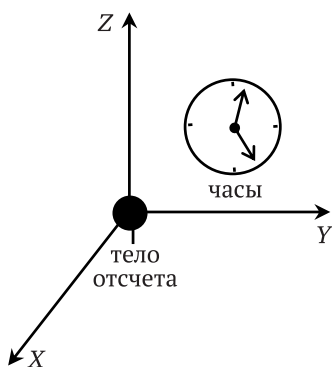


Рис. 1.1

Относительность движения проявляется в том, что характер движения одного и того же тела по отношению к разным телам отсчета неодинаков. Для описания движения необходимо ввести *систему отсчета* — совокупность тела отсчета, связанной с ним системы координат и часы (рис. 1.1).

Тело, размеры и форма которого несущественны в условиях данной задачи, называется *материальной точкой*.

Очевидно, трех декартовых координат достаточно, чтобы задать ее положение. Строго говоря, никакое реальное тело нельзя считать «точкой». Но такая идеализация вполне допустима, когда движение тела определяется перемещением любой из его точек и не берутся во внимание вращения и деформации этого тела.

Введем основные понятия кинематики: *траектория*, *перемещение*, *скорость*, *ускорение*.

**Траекторией** называется линия, которую описывает тело в пространстве во время движения. Движение, при котором любая прямая, связанная с телом, остается параллельной самой себе (рис. 1.2), называется *поступательным*. При поступательном движении тела все его точки движутся одинаково, поэтому в этом случае достаточно рассматривать движение одной точки.

**Перемещением** точки за некоторый промежуток времени называется вектор  $\Delta\vec{r}$ , направленный от положения точки в начальный момент времени к ее положению в конечный момент времени (рис. 1.3). Из рисунка 1.3 следует векторное равенство

$$\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1. \quad (1.1)$$

Пройденный *путь*  $\Delta S$  представляет собой скалярную величину, равную расстоянию, пройденному материальной точкой по траектории (см. рис. 1.3). Если траектория прямолинейная, то путь и модуль вектора перемещения совпадают, т. е.  $|\Delta\vec{r}| = \Delta S$ . Во всех других случаях  $|\Delta\vec{r}| < \Delta S$ .

**Скорость при равномерном прямолинейном движении** равна отношению перемещения ко времени:

$$\vec{v} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}. \quad (1.2)$$

Спроецируем векторы  $\vec{v}$  и  $\Delta\vec{r}$  на траекторию (прямая линия) и получим для модуля скорости выражение

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \text{const}(t). \quad (1.3)$$

Выражение для скорости справедливо для любых промежутков времени, поэтому можно записать:

$$v = \frac{S}{t}, \text{ откуда } S = vt. \quad (1.4)$$

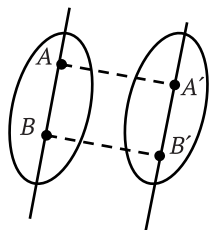


Рис. 1.2

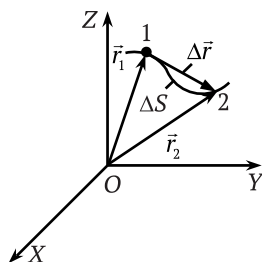


Рис. 1.3

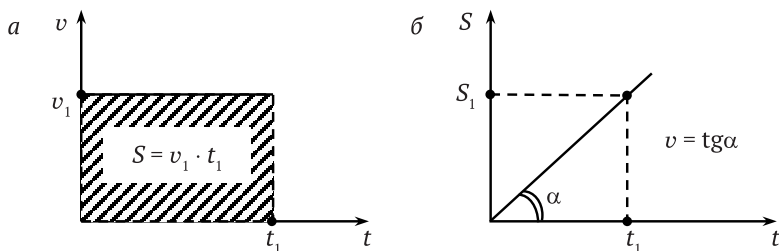


Рис. 1.4

Выражение (1.4) называется *уравнением равномерного прямолинейного движения*. На рисунке 1.4, а, б представлены графики скорости  $v = \text{const}(t)$  и пути  $S = vt$  равномерного прямолинейного движения. По графику скорости (см. рис. 1.4, а) можно найти путь, пройденный точкой за время  $t_1$ . Из рисунка 1.4, а получаем, что этот путь равен площади фигуры под графиком скорости. По графику пути (см. рис. 1.4, б) можно найти скорость:

$$v = \frac{S_1}{t_1} = \text{tg}\alpha. \quad (1.5)$$

Таким образом, **тангенс угла наклона графика пути к оси времени равен скорости**.

Отношение перемещения точки  $\Delta\vec{r}$  к промежутку времени  $\Delta t$  определяет *среднюю скорость перемещения* за это время:

$$\vec{v}_{\text{cp}} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}. \quad (1.6)$$

**Среднюю скорость прохождения пути** находят по формуле

$$v_{\text{cp}} = \frac{\Delta S}{\Delta t}. \quad (1.7)$$

Движение материальной точки в каждый момент времени  $t$  характеризуется мгновенной скоростью, которая определяется так:

$$\vec{v}_{\text{мгн}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}. \quad (1.8)$$

Мгновенная скорость направлена по касательной к траектории (рис. 1.5). Модуль скорости находим из формулы (1.8):

$$|\vec{v}_{\text{мгн}}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta\vec{r}|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t}.$$

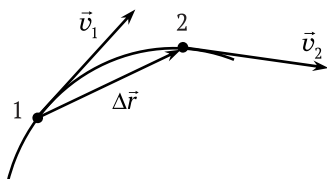


Рис. 1.5

Здесь учтено, что при  $\Delta t \rightarrow 0$   $|\Delta \vec{r}| \rightarrow \Delta S$ .

**Неравномерным (переменным)** называется движение, при котором скорость изменяется во времени. Изменение скорости точки при неравномерном движении характеризуется **ускорением**.

Ускорение точки  $a$  в данный момент времени  $t$  равно пределу соотношения приращения скорости  $\Delta \vec{v}$  ко времени  $\Delta t$ :

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}. \quad (1.9)$$

**Равноускоренным движением** называется движение с постоянным ускорением. Ускорение при таком движении

$$\vec{a} = \frac{\vec{v}_t - \vec{v}_0}{t}, \quad (1.10)$$

где  $\vec{v}_0$  — скорость тела в начальный момент времени;  $\vec{v}_t$  — скорость тела в момент времени  $t$ ;  $t$  — время, отсчитанное от начала движения.

В случае *прямолинейного равноускоренного движения* все векторные величины  $\vec{v}_t$ ,  $\vec{v}_0$  и  $\vec{a}$  направлены вдоль траектории. Поэтому проекция вектора ускорения на траекторию равна:

$$a = \pm \frac{v_t - v_0}{t}. \quad (1.11)$$

Из этой формулы находим **скорость равнопеременного движения** в любой момент времени  $t$  (мгновенную скорость):

$$v_t = v_0 \pm at. \quad (1.12)$$

График зависимости мгновенной скорости от времени  $t$  представлен на рис. 1.6. Из него следует, что тангенс угла наклона графика скорости к оси  $t$  равен ускорению:

$$a = \operatorname{tg} \alpha = \frac{v_t - v_0}{t}. \quad (1.13)$$

С помощью графика скорости равнопеременного движения можно найти путь  $S$ , пройденный телом за некоторое время  $t$ .

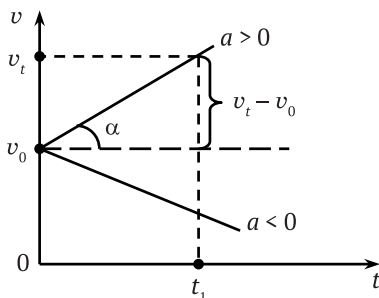


Рис. 1.6

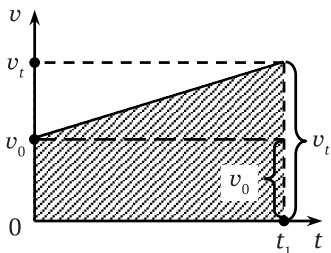


Рис. 1.7

Для этого необходимо найти площадь фигуры под графиком скорости (так же, как и для равномерного движения). Из рисунка 1.7 следует, что площадь фигуры под графиком

$$S = v_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad (1.14)$$

Вектор ускорения  $\vec{a}$  может не совпадать по направлению с вектором скорости  $\vec{v}$ , поэтому в общем случае справедливо:

$$S = v_0 t \pm \frac{at^2}{2}. \quad (1.15)$$

Это выражение называется *уравнением пути для переменного движения*. Знак « $-$ » учитывает, что ускорение может быть отрицательным.

Познакомимся со **свободным падением** — движением тел в безвоздушном пространстве под действием силы тяжести. Это движение исследовал Галилей. Он установил, что все тела, независимо от их формы и массы, падают в безвоздушном пространстве с одинаковым ускорением  $g$ , среднее значение которого вблизи поверхности Земли равно  $9,81 \text{ м/с}^2$ . Таким образом, из определения свободного падения следует, что оно представляет собой равнопеременное движение с ускорением  $g$ . Для свободного падения можно пользоваться формулами, полученными для равнопеременного движения:

$$g = \pm \frac{v_t - v_0}{t}; \quad v_t = v_0 \pm gt; \quad h = v_0 t \pm \frac{gt^2}{2}.$$

При решении задач на равноускоренное движение часто бывает полезной формула

$$v_t^2 - v_0^2 = \pm 2aS. \quad (1.16)$$

Получим эту формулу:

$$v_t = v_0 \pm at, \quad v_t^2 = v_0^2 \pm 2v_0 at + a^2 t^2; \\ v_t^2 - v_0^2 = \pm 2v_0 at + a^2 t^2 = \pm 2a \left( v_0 t + \frac{at^2}{2} \right) = \pm 2aS. \quad (1.17)$$

Для свободного падения эта формула имеет вид

$$v_t^2 - v_0^2 = \pm 2gh. \quad (1.18)$$



## 1.2. Кинематика вращательного движения

Рассмотрим движение тела по окружности с постоянной по модулю скоростью (рис. 1.8). За малое время  $\Delta t$  точка перемещается из положения 1 в положение 2. При этом радиус точки  $\vec{R}$  поворачивается на угол  $\Delta\varphi$ , и она проходит по окружности путь  $\Delta S$ . Из геометрии известно соотношение

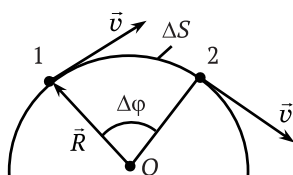


Рис. 1.8

$$\Delta S = R \cdot \Delta\varphi, \quad (1.19)$$

справедливое для любых углов  $\Delta\varphi$ . Угол должен выражаться в радианах.

Разделив левую и правую части равенства (1.19) на  $\Delta t$ , получим

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = R \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}. \quad (1.20)$$

Если за любые равные промежутки времени тело проходит по окружности одинаковые пути, то модуль скорости остается постоянным.

Величину  $v = \frac{\Delta S}{\Delta t}$  называют *линейной скоростью*, а величину

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \quad (1.21)$$

называют *угловой скоростью при равномерном вращении*.

Таким образом, между линейной и угловой скоростью существует соотношение

$$v = R\omega. \quad (1.22)$$

Угловая скорость  $\omega$  измеряется в радианах в секунду.

Время  $T$ , за которое точка совершает один полный оборот, называется *периодом вращения*. За период  $T$  радиус-вектор поворачивается на угол  $2\pi$  радиан, поэтому

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n, \quad (1.23)$$

где  $n = \frac{1}{T}$  — число оборотов в секунду.

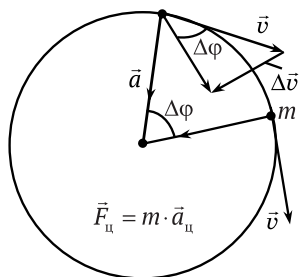


Рис. 1.9

Найдем ускорение  $a$ , с которым точка движется по окружности. Ускорение при равномерном вращении по окружности связано только с изменением направления скорости (рис. 1.9) и равно:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v \Delta \varphi}{\Delta t} = v \omega. \quad (1.24)$$

Это ускорение направлено к центру окружности, поэтому его называют *центростремительным*. Воспользовавшись соотношением между линейной и угловой скоростью, получим

$$a_{\text{ц}} = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R. \quad (1.25)$$

Если тело равномерно вращается по окружности под действием нескольких сил, то *равнодействующая всех сил направлена к центру окружности*. (Понятие силы приводится в начале следующего раздела.) Иногда *равнодействующую, направленную к центру вращения, называют центростремительной силой*. Центростремительная сила

$$F_{\text{ц}} = m \frac{v^2}{R} = m \omega^2 R. \quad (1.26)$$

### 1.3. Динамика поступательного движения

Динамика в первую очередь описывает взаимодействие тел. *Мерой механического взаимодействия тел является сила* — векторная величина, т. е. направленный отрезок, который обычно удобно проводить от одного взаимодействующего тела к другому. Измеряется сила в *ньютонах* (Н):

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

**Законы Ньютона. Первый закон Ньютона.** В качестве первого закона динамики Ньютон взял закон инерции Галилея: *свободное тело (внешние воздействия отсутствуют или скомпенсированы) сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. Такое движение называется движением по инерции. Инерция — свойство тел сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. При измене-*

нии величины или направления скорости тела оно оказывает сопротивление. В этом проявляется его инертность.

Смысл первого закона Ньютона передается следующим определением: *существуют такие системы отсчета, в которых свободное тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока взаимодействие с другими телами не выведет его из этого состояния.*

Системы отсчета, в которых выполняется первый закон Ньютона (закон инерции), называются *инерциальными*. Можно показать, что если система отсчета движется равномерно и прямолинейно относительно инерциальной системы, то она также является инерциальной. Таким образом, если известна одна инерциальная система отсчета, то их можно ввести сколь угодно много.

**Второй закон Ньютона.** Смысл второго закона Ньютона ясен из следующей формулировки: *равнодействующая всех сил, действующих на тело, равна произведению массы тела на ускорение:*

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = m\vec{a}. \quad (1.27)$$

Если на тело действует одновременно несколько сил и действие каждой не искажает действия других, то результирующая сила равна их векторной сумме:

$$\vec{F}_{\text{рез}} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n. \quad (1.28)$$

Выражение (1.28) представляет собой **принцип суперпозиции сил**. Он относится к фундаментальным принципам, установленным опытным путем.

Массу определяют как *меру инертности тела*. Опыт показывает, что отношение ускорений тел под действием одной и той же силы обратно пропорционально отношению их масс:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}. \quad (1.29)$$

**Третий закон Ньютона.** *Действие тел друг на друга носит характер взаимодействия. Тела действуют друг на друга с равными по величине и противоположно направленными силами (рис. 1.10):*

$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}. \quad (1.30)$$

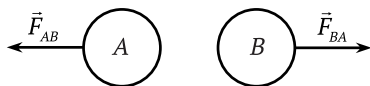


Рис. 1.10

Отметим, что силы взаимодействия не складываются, так как приложены к разным телам.

Таким образом, силу можно определить как *векторную величину, характеризующую взаимодействие тел*. Сила может сообщить телу ускорение либо деформировать его. Всегда происходит и то, и другое (динамическое и статическое действие), но в конкретных ситуациях существенно, как правило, что-то одно из них.

**Гравитационные силы. Закон всемирного тяготения. Сила тяжести. Вес тела.** Ньютон обобщил законы Кеплера, установленные для движения планет, и пришел к выводу о существовании гравитационных сил. Взаимодействие точечных тел с массами  $m_1$  и  $m_2$  описывается законом всемирного тяготения: *тела взаимодействуют друг с другом с силой, пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:*

$$F_{\text{гп}} = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (1.31)$$

где  $\gamma$  — гравитационная постоянная, равная  $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$ .

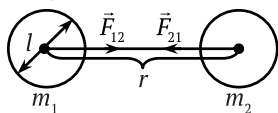


Рис. 1.11

Закон справедлив в такой форме для тел, размер которых  $l$  много меньше расстояния  $r$  между ними (рис. 1.11).

На все тела, находящиеся на любой планете, действует *сила тяжести*, определяемая выражением

$$F_T = mg, \quad (1.32)$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести на данной планете.

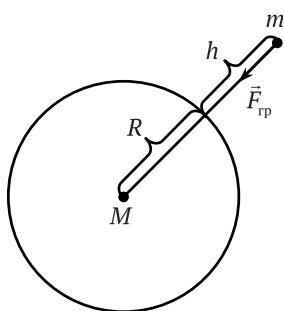


Рис. 1.12

По своей природе сила тяжести — гравитационная сила, поэтому, полагая в формуле (1.31)  $m_1 = m$ ,  $m_2 = M$  и приравнивая формулы (1.31) и (1.32), получаем для ускорения на поверхности планеты выражение

$$g = \gamma \frac{M}{R^2}, \quad (1.33)$$

где  $M$  — масса планеты;  $R$  — ее радиус.

На поверхности Земли  $g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$ .

Если тело массой  $m$  находится на некоторой высоте  $h$  над поверхностью планеты (рис. 1.12), то сила гравитационного взаимодействия между ними определяется выражением

$$F_{\text{гп}} = \gamma \frac{Mm}{(R+h)^2}. \quad (1.34)$$

Приравнивая формулы (1.32) и (1.34), получаем ускорение силы тяжести, действующей на тело на высоте  $h$ :

$$g = \gamma \frac{M}{(R+h)^2}. \quad (1.35)$$

Из анализа (1.35) следует, что с увеличением высоты ускорение  $g$  уменьшается.

Рассмотрим два тела: одно лежит на неподвижной опоре, другое висит на подвесе (рис. 1.13). На тела действует сила тяжести  $m\vec{g}$ , вследствие чего одно тело давит на подставку, а другое — растягивает подвес с некоторой силой  $\vec{P}$ .

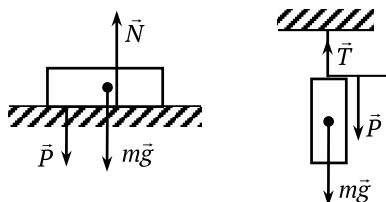


Рис. 1.13

Подставка действует на тело с силой  $\vec{N}$ , называемой *силой реакции опоры*, а подвес действует на тело с силой  $\vec{T}$ , называемой *силой натяжения*. Тела находятся в покое, следовательно, согласно первому закону Ньютона действующие на них силы скомпенсированы. Из третьего закона Ньютона следует, что сила реакции опоры  $\vec{N}$  и сила натяжения  $\vec{T}$  должны быть равны по величине тем силам, с которыми тела действуют на опору или растягивают подвес. Таким образом,

$$|\vec{N}| = |m\vec{g}| = |\vec{P}|; \quad |\vec{T}| = |m\vec{g}| = |\vec{P}|. \quad (1.36)$$

Определенная таким образом сила  $\vec{P}$  называется **весом тела**.

Из равенств (1.36) следует, что если тело находится на неподвижной горизонтальной опоре или висит на неподвижном подвесе, то его вес по модулю равен силе тяжести:  $P = mg$ .

Из первого закона Ньютона следует, что такое же определение веса справедливо, если подставка или подвес движется равномерно и прямолинейно (или покоится).

**Сила трения.** Различают внешнее и внутреннее трение. *Внешнее трение* препятствует относительному перемещению соприкасающихся тел. *Внутреннее трение* возникает между частицами одной и той же среды. Трение между твердыми телами называется *сухим*, а между слоями жидкости или твердым телом и жидкостью — *вязким*.

Во всех видах трения возникает *сила трения, направленная вдоль поверхности соприкасающихся тел противоположно скорости их относительного перемещения*.

Различают *трение покоя* и *трение скольжения*. Если относительного перемещения соприкасающихся поверхностей нет, то между ними существует сила трения покоя  $F_{\text{тр.о}}$ , которая препятствует предполагаемому движению одного тела по поверхности другого.

Если к телу, находящемуся в соприкосновении с другим телом, приложить возрастающую внешнюю силу  $F_{\text{внеш}}$  параллельно поверхности соприкосновения, то до некоторого значения  $F_{\text{внеш}}$  движения не возникает. Это свидетельствует о том, что сила трения покоя изменяется от нуля до предельного значения  $F_{\text{тр.макс}}$ .

Относительное движение возможно при условии:

$$F_{\text{внеш}} > F_{\text{тр.макс}}$$

Сила трения скольжения  $F_{\text{тр.ск}}$  между поверхностями соприкасающихся тел определяется выражением

$$F_{\text{тр.ск}} = \mu N_{\text{давл}}, \quad (1.37)$$

где  $\mu$  — коэффициент трения скольжения;  $N_{\text{давл}}$  — сила нормального давления, численно равная реакции опоры.

В некоторых случаях необходимо учитывать *силу трения качения*, которая зависит не только от силы нормального давления  $N_{\text{давл}}$ , но и от радиуса  $R$  катящегося тела:

$$F_{\text{тр.ск}} = \frac{f}{R} N,$$

где  $f$  — коэффициент трения качения, измеряемый в метрах; его можно приближенно считать равным длине «сплюсненности» катящегося тела в месте касания с поверхностью. Несложно понять, что такая сплюсненность, а значит, и коэффициент  $f$  для паровозного колеса, катящегося по рельсу, будут крайне малы.

**Силы упругости. Закон Гука.** Под действием внешних сил тела изменяют свои размеры и форму — *деформируются*. Простейшим видом деформации является деформация растяжения (или сжатия). Если под действием внешней силы первоначальная длина тела  $l$  удлинилась на  $\Delta l$ , то деформацию характеризуют *относительным удлинением*:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}. \quad (1.38)$$

Действие силы характеризуется *напряжением*  $\sigma$  — величиной, равной отношению силы к площади сечения тела, перпендикулярного направлению силы:

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (1.39)$$

Опыт показывает, что если под действием силы деформация не превышает определенной для каждого тела величины, то после прекращения действия силы тело восстанавливает первоначальные форму и размеры. *Свойство тел восстанавливать форму и размеры называется упругостью. Силы, восстанавливающие форму и размеры тел, называют упругими силами, или силами упругости. Предельная деформация, при которой тело еще сохраняет упругие свойства, называется пределом упругости.*

Если деформация превышает предел упругости, то после прекращения действия сил остается так называемая *остаточная деформация*. Деформация тела за пределами упругости называется *пластической*, в отличие от *упругой* деформации.

Зависимость между упругой деформацией и силой выражается **законом Гука**: *сила упругости пропорциональна удлинению тела*:

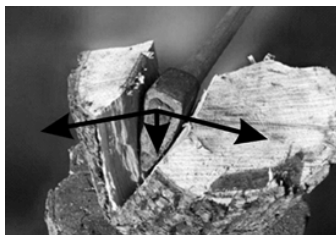
$$F = -k\Delta l, \quad (1.40)$$

где  $k$  — коэффициент упругости тела.

Знак «-» показывает, что сила упругости направлена в сторону, противоположную удлинению тела.

**Разложение сил. Движение парусников. Спутник в конце полета.** Из геометрии известно, что любой вектор можно представить в виде суммы двух и более векторов бесконечным числом способов. Это имеет интересный аспект в физике: взаимное расположение тел, образующих систему, «диктует» определенные естественные для нее способы разложения сил.

Возникает **рычаг** — механизм усиления воздействия, задаваемого не тем, кто воздействует, а самой системой. Подобно этому в физике колебаний выделяется особый класс периодических процессов — **автоколебания**. Это колебания, в которых потери энергии системой на сопротивление среды компенсируются энергией внешнего воздействия. Но это воздействие, в отличие от вынужденных колебаний, не имеет периодического характера: оно непрерывно. В системе заложен механизм, позволяющий расходовать энергию воздействия постепенно и периодически. Так, смычок скрипки движется по струне непрерывно, зазубринами на волосе подтягивая ее и изменяя длину; в момент максимального сопротивления происходит срыв струны и ее проскальзывание — последующая вибрация струны создает музыкальный звук. Менее мелодичный звук слышен при открывании двери на несмазанных петлях. Энергия передается двери непрерывно человеком или, например, ветром. Неровности на стыках петель приводят к вибрациям сначала самих петель, а затем воздуха — так образуется в этом случае звук. Скрипка со смычком, несмазанная дверь, стул, который вы тянете по паркету, часы, которые вы заводите раз в сутки, — все это примеры автоколебательных систем.



**Рис. 1.14.** Разложение сил при раскалывании полена

Вернемся к *авторазложению сил*. Простейший пример — это действие топора-колуна. Небольшая сила, ненамного превосходящая вес рабочей части колуна, раскладывается на две составляющие (рис. 1.14), что приводит к раскалыванию твердого дерева.

Подобное явление также наблюдается, когда, например, налипший на провод и смерзшийся снег, находящийся далеко от концов провода, обрывает его.

Рассмотрим также движение парусного судна против ветра. На языке мореходов это называется *идти в бейдевинд*. Строго навстречу ветру идти не получится. Однако особенности системы «воздух — парусник — вода» и конструкция парусника позволяют двигаться под углом  $\approx 22^\circ$  к ветру. На рисунке 1.15



показано взаимное расположение воздушного потока, паруса ПП' и судна (ось которого обозначена  $AB$ ). Сила  $\vec{F}_0$  давления ветра, очевидно, сонаправлена с его скоростью. Разложим ее на 2 составляющие: вдоль плоскости паруса —  $\vec{F}_S$  и перпендикулярно ей —  $\vec{F}$ . Для воздействия на парусник имеет значение только вторая составляющая —  $\vec{F}$ , так как сила  $\vec{F}_S$ , направленная вдоль паруса, работает вхолостую: трение ветра о ткань паруса очень невелико.

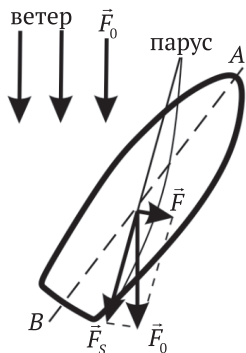


Рис. 1.15

Силу  $\vec{F}$ , в свою очередь, разложим на 2 составляющие:  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$  (рис. 1.16), где первая из них —  $\vec{F}_1$ , ориентирована вдоль судна, она и толкает его против ветра под прямым углом. Сила же  $\vec{F}_2$ , действующая перпендикулярно килю, полностью уравнивается силой сопротивления воды. С этой целью киль парусного судна изготавливают глубоким, из жесткого материала.

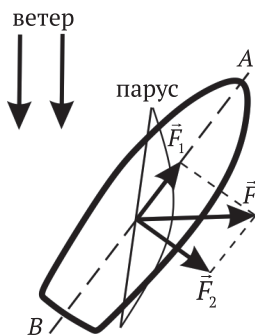


Рис. 1.16

Очевидно, встречный ветер, заходя, заставляет парусник изменить курс под углом не менее  $22^\circ$  в сторону.

Спустя какое-то время мореходам необходимо повернуть парус так, чтобы судно начало возвращаться к прежнему курсу. В итоге парусник в среднем сохраняет направление движения, переключая паруса с одного борта на другой и меняя галсы (левый — правый — левый...) (рис. 1.17). Такой ход судна против ветра называется *лавировкой*.



Рис. 1.17. Траектория парусника, идущего против ветра

Интересно то, что при движении парусника на его палубе создается свой собственный «вымпелный» ветер. Он представляет

собой сложение истинного ветра и встречного, вызванного движением судна. Чтобы это понять, пройдите быстро несколько шагов с зажженной свечкой — увидите, как пламя будет отклоняться в сторону, противоположную направлению вашего движения. Устройство парусного судна должно включать настройку паруса по «вымпельному» ветру. К мачте крепятся ветроуказатели, которые в обиходе мореходов называются *колдунами*, или *виндексами*.

Еще один интересный пример — парадокс искусственного спутника Земли, завершившего свою миссию на орбите. Теряя энергию, он приближается к Земле и входит в плотные слои атмосферы, где трение приводит к его расплавлению и испарению оставшегося вещества — говорят, что спутник «сгорел в верхних слоях атмосферы». *Парадокс заключается в том, что, испытывая действие сил торможения, спутник ускоряется.* То есть растут его скорость и кинетическая энергия!

Из рисунка 1.18 видно, что парадокс разъясняется, если учесть, что объект движется по винтовой линии — в данном случае траектории, близкой к окружности, но с непрерывно уменьшающимся радиусом. При этом результирующая сила  $\vec{F}$  (показана на рис. двойной белой стрелкой) может быть разложена на пару составляющих двумя естественными способами:

1)  $\vec{F} = m\vec{g} + \vec{F}_{\text{сопр}}$  (это силы со стороны других тел, в данном случае силы тяжести со стороны Земли и силы сопротивления со стороны атмосферы) и 2)  $\vec{F} = \vec{F}_\tau + \vec{F}_n$ , здесь результирующая сила представлена суммой компонент по направлению движения и перпендикулярно ему (тангенциальная и нормальная составляющие).

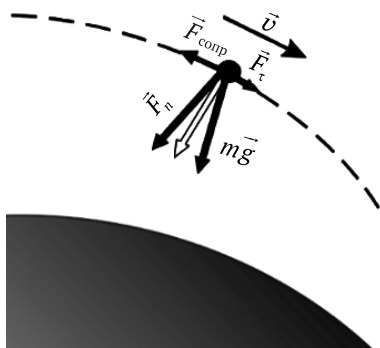


Рис. 1.18

Нормальная (центростремительная) компонента  $\vec{F}_n$  направлена не в подспутниковую точку, как это было бы при движении тела по окружности, а несколько назад, из-за спиралевидности траектории. Вторая компонента  $\vec{F}_\tau$  при этом оказывается направленной вперед, по касательной к траектории — по скорости, кото-

рая при этом получает положительное приращение. Кинетическая энергия возрастает за счет уменьшения потенциальной энергии спутника в гравитационном поле Земли.

**Момент силы. Условие равновесия тела относительно оси вращения.** Пусть к точке  $A$  тела приложена сила  $\vec{F}$  (рис. 1.19).

Под действием силы  $\vec{F}$  тело может вращаться относительно точки  $O$ . Кратчайшее расстояние от точки  $O$  до направления действия силы (перпендикуляр  $l$ ) называется *плечом силы*.

*Моментом силы  $\vec{F}$  относительно точки  $O$*  называется вектор  $\vec{M}$ , модуль которого равен:

$$M = F \cdot l. \quad (1.41)$$

Направление вектора  $\vec{M}$  связано с направлением вращения правилом правого винта (см. рис. 1.19).

Тело, имеющее неподвижную ось вращения, будет находиться в равновесии, если сумма моментов, вращающих тело по часовой стрелке, будет равна сумме моментов, вращающих тело против часовой стрелки (рис. 1.20):

$$\sum_{i=1}^n \vec{M}_i = 0, \quad (1.42)$$

$$\text{или } F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2. \quad (1.43)$$

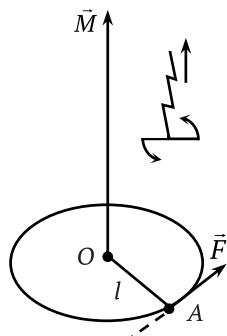


Рис. 1.19

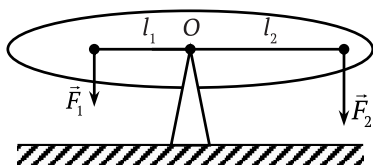


Рис. 1.20

### Дополнение 1.3.1. Силы инерции

Законы Ньютона «работают» в инерциальных системах отсчета (СО). Но они позволяют описывать также движение и в неинерциальных СО. Приведем пример. Грузовик движется прямолинейно с постоянной скоростью. В его кузове лежит арбуз. Водитель резко затормаживает машину. Арбуз начинает катиться в кузове по направлению движения — к кабине, хотя прямого воздействия на него со стороны других тел не было.

Причиной ускоренного движения арбуза относительно кузова явилась *поступательная сила инерции*, возникшая из-за отрицательного ускорения самой системы отсчета, т.е. грузовика. Именно эта сила толкает нас вперед в автобусе при его резком торможении.

Опыт показывает, что так называемое «поле сил инерции», возникающее при ускорении СО, сообщает всем телам, независимо от их массы, одно и то же ускорение, равное по модулю и противоположно направленное вектору ускорения системы отсчета:

$$\vec{F}_{\text{ин}} = -m\vec{a}.$$

Таким образом, поступательная сила инерции пропорциональна массе тела. Единственная сила в механике, которая обладает таким же свойством, — это сила тяжести. В общей теории относительности (ОТО), завершенной Эйнштейном в 1915 г., спустя 10 лет после опубликования его работ по специальной теории относительности, утверждается следующее: *поля сил инерции по своим проявлениям полностью эквивалентны гравитационным полям*. По этой причине масса, определяемая как мера инертности тела («инертная масса»), равна массе, являющейся характеристикой способности тела притягивать и притягиваться к другим телам («гравитационная масса»). ОТО имеет ряд важнейших следствий, имеющих большое значение в физике Космоса. Далее будут изложены основные понятия ОТО.

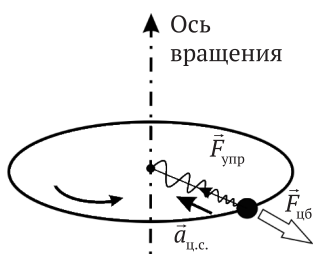


Рис. 1. 21. Центробежная сила инерции

Во вращающейся СО на тело действует еще одна *сила инерции* — *центробежная*. Пусть на гладкой платформе в виде диска расположен груз массой  $m$ , прикрепленный к оси диска пружиной (рис. 1.21).

Если систему привести во вращение, пружина растянется, при этом возникнет сила упругости, которая сообщает центростремительное ускорение грузу — так, что второй закон Ньютона относительно неподвижного наблюдателя имеет вид

$$m\vec{a}_{\text{ц.с.}} = \vec{F}_{\text{упр}}.$$

В некоторый момент времени в проекции на ось, направленной вдоль пружины к центру платформы, можно записать:

$$m\omega^2 r = F_{\text{упр}}.$$

Для второго наблюдателя, стоящего на платформе и вращающегося вместе с ней, шар неподвижен, а его ускорение равно нулю. Значит, должна быть некоторая сила, уравновешивающая силу упругости, чтобы выполнялось условие:

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0 \text{ и } \vec{a} = 0.$$

Эту силу называют **центробежной силой инерции**:

$$\vec{F}_{\text{ц.б.}} = -\vec{F}_{\text{упр}}.$$

Видно, что ускорение, сообщаемое этой силой инерции, также не зависит от массы тела. По модулю оно равно центростремительному ускорению:

$$\vec{a}_{\text{ц.б.}} = -\vec{a}_{\text{ц.с.}}, \quad a_{\text{ц.б.}} = \omega^2 r.$$

Наконец, если материальная точка массой  $m$  еще и движется поступательно относительно вращающейся системы отсчета (рис. 1. 22), на нее действует еще одна сила инерции — *сила Кориолиса*:

$$\vec{F}_K = 2m \cdot [\vec{v} \cdot \vec{\omega}],$$

где  $\vec{v}$  — вектор скорости поступательного движения материальной точки относительно вращающейся СО;

$\vec{\omega}$  — вектор угловой скорости вращения СО. Действие этой силы наглядно проявляется в движении маятника Фуко — математического маятника, выполняемого в виде близкого к идеальному металлического массивного шара на длинном подвесе. Так, в Исаакиевском соборе (г. Санкт-Петербург) длина троса составляла 98 м, масса груза — 54 кг. Плоскость колебаний маятника постепенно поворачивалась (за 1 час примерно на  $13^\circ$ ), причиной чего было суточное вращение Земли. Маятник Фуко демонстрировался там до 1986 г.

Рассмотрим еще один пример. По течению реки движется плот. Река вращается вместе с Землей. На плот будет действовать сила, направленная к правому берегу реки (если это

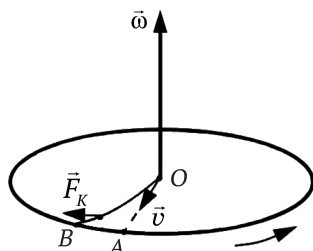


Рис. 1. 22. Сила Кориолиса

происходит в Северном полушарии Земли). Это в общем случае равнодействующая всех сил инерции — поступательной, центробежной и силы Кориолиса. Эта равнодействующая мала (поскольку обычно невелика скорость течения реки и угловая скорость вращения Земли вокруг оси составляет  $\approx 10^{-5}$  с), и для пассажира плота, преодолевающего несколько километров по реке, будет незаметна. Но на частицы речной воды эта сила действует в течение тысячелетий. В итоге правые берега рек размываются и становятся на некоторых участках заметно круче левых. *Интересно то, что это не зависит от направления течения реки.* Рассмотрим реку Дон, где он становится полноводным — в среднем и нижнем течении.

В районе Воронежа его течение направлено точно на юг, т.е. к экватору. В направлении экватора радиус вращения поверхности Земли возрастает, водные массы отстают от вращения, прижимаясь к западному — правому берегу.

Далее Дон поворачивает на восток. Скорость течения здесь суммируется с линейной скоростью вращательного движения планеты, рассмотренная выше центробежная сила также возрастает. Она действует в направлении увеличения радиуса (рис. 1. 23). А радиус возрастает к югу, поэтому вода размывает южный берег, который опять — правый.



**Рис. 1. 23.** Среднее и нижнее течение реки Дон (тонкими стрелками обозначена скорость течения реки, широкими — сила Кориолиса)

Затем на реке следует небольшой участок с течением на север. Здесь водные массы движутся в те широты Земли, где радиус вращения меньше. Вода теперь опережает вращение и оказывает давление на восточный — правый берег.

Наконец в нижнем течении Дон несет свои воды на запад. Скорость течения теперь направлена против линейной скорости вращения Земли, и центробежная сила уменьшается — вода устремляется в направлении уменьшения радиуса — на север, воздействует на северный — правый берег.

Очевидно, в Южном полушарии размываются левые берега рек. *На экваторе равнодействующая сил инерции направлена вертикально вверх* и на движение тел по земной и морской поверхности не влияет, однако приводит к уменьшению веса тел.

Сила Кориолиса является также причиной неодинакового износа рельсов железнодорожных путей с односторонним движением, смещения зарядов, выпущенных из артиллерийских орудий, и других явлений. Одним из факторов поражения российской эскадры в Цусимском сражении 1905 г. явилась системная ошибка стрельбы. Корабельные орудия «Варяга», «Стерегущего» и других российских кораблей были пристреляны в Кронштадте (60° северной широты). В Цусиме (35° с. ш. (северной широты)) равнодействующая сил инерции имеет иное значение и направление относительно курса корабля. Орудия японских крейсеров были пристреляны примерно в тех же широтах, что и Цусима, поэтому системной ошибки у них не было. Случайные же ошибки (вызванные неточностью прицелов, резкими маневрами кораблей) у противоборствующих сторон были одинаковы.

*Силы инерции не подчиняются третьему закону Ньютона, поскольку они порождаются не взаимодействием тел, а ускорениями систем отсчета.* В этом плане их можно назвать фиктивными силами. Вдумчивый анализ понятия «сила» приводит к выводу, что это — категория нашего разума, но не природы. Хотя выражение «силы в природе» является общепринятым. Так же обстоит дело с понятиями «энергия», «волна» и многими другими базовыми концептами физики. В природе есть движение и взаимодействие. Для их описания наука вводит свой понятийный аппарат. (К этому вопросу вернемся при обсуждении основ общей теории относительности Эйнштейна.)

### Дополнение 1.3.2. Элементы динамики вращательного движения

Для описания вращательного движения второго закона Ньютона недостаточно, точнее, этот закон необходимо записать для других величин, которые учитывают распределение массы в системе. Астрономы еще несколько столетий назад

Газовый хвост кометы

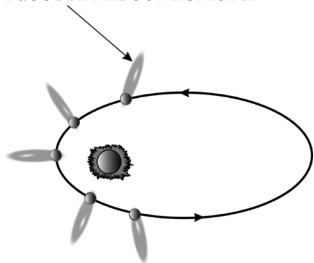


Рис. 1. 24

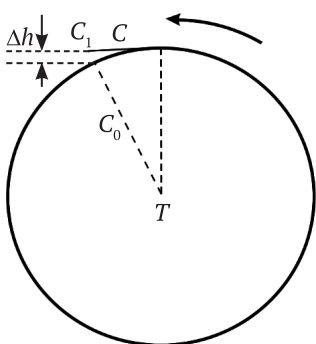


Рис. 1. 25

заметили, что скорость кометы, движущейся по вытянутой орбите, заметно увеличивается в период, когда комета видна особенно ярко, т.е. когда она проходит близко к Солнцу (рис. 1.24). По мере удаления ее от Солнца движение кометы замедляется. Луна, на которую действует ничем не уравновешенная сила тяготения Земли, все время «падает» на Землю (рис. 1.25), но при этом расстояние ее от Земли испытывает лишь небольшие изменения с периодом в один месяц, в целом оставаясь постоянным. На рисунке 1.25 показаны два положения Луны на ее орбите относительно Земли,  $C$  и  $C_0$  — с интервалом  $\sim 2,5$  суток. Относительно касательной  $CC_1$  спутница Земли приблизилась на  $\Delta h$ , однако осталась на том же расстоянии  $R$  от нас.

Пуля, вылетевшая из винтовки с нарезным стволом, летит в мишень точнее, чем выпущенная из гладкоствольного оружия (рис. 1. 26): в полете она вращается. Стремясь сохранить момент импульса, ее головная часть смещается перпендикулярно действию силы и в итоге описывает небольшую окружность относительно направления полета, сохраняя это направление. Такой эффект называется *гироскопическим*, или *эффектом волчка*. Понаблюдаем за детской игрушкой — волчком (юлой). При замедлении вращения юла начинает «кувыр-



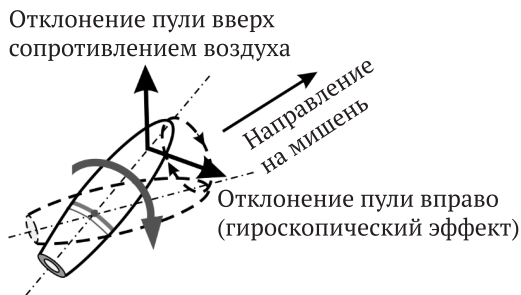


Рис. 1. 26

каться» — ее ось описывает конус вокруг направления устойчивого вращения, юла «стремится сохранить статус-кво».

Велосипедист, набрав скорость на ровной дороге, может не держаться за руль и не только сохраняет равновесие, но может даже совершать плавные повороты, слегка отклоняя свое тело в разные стороны (рис. 1.27). Все это можно объяснить законом сохранения момента импульса.



Рис. 1. 27

Момент импульса материальной точки в простейшем случае движения по окружности есть произведение ее импульса на радиус:

$$L = pr = mvr.$$

Момент импульса является векторной величиной. В общем случае  $\vec{L} = \vec{r} \cdot \vec{p}$ , т. е. представляет собой векторное произведение радиуса-вектора точки на вектор ее импульса.

Направлен этот вектор перпендикулярно плоскости, в которой расположены векторы  $\vec{r}$  и  $\vec{p}$ . Единицей измерения момента импульса служит «килограмм-метр квадратный на секунду»:  $[L] = [\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}]$ . Для простейшего случая направления векторов  $\vec{L}$ ,  $\vec{r}$  и  $\vec{p}$  указаны на рис. 1.28.

Вектор момента импульса  $\vec{L}$  при описании динамики вращательного движения

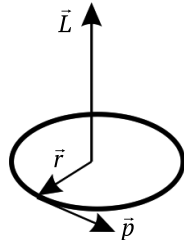


Рис. 1.28



Учебное издание

**Благин Анатолий Вячеславович**  
**Попова Инна Григорьевна**

# **ФИЗИКА**

## **УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

Ответственный редактор *Д. Волкова*  
Выпускающий редактор *Г. Логвинова*

Формат 84x108<sup>1/32</sup>. Бумага газетная.  
Печать офсетная. Тираж 2000 экз. Заказ №

**Издатель и изготовитель:** ООО «Феникс».  
Юр. и факт. адрес: 344011, Россия, Ростовская обл.,  
г. Ростов-на-Дону, ул. Варфоломеева, д. 150  
Тел/факс: (863) 261-89-65, 261-89-50

Изготовлено в России. Дата изготовления: 06.2021. Срок годности не ограничен.

**Отпечатано в АО «ТАТМЕДИА»**

Филиал «Полиграфическо-издательский комплекс "Идел-Пресс"».

Юр. адрес: 420097, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Академическая, д. 2  
Факт. адрес: 420066, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Декабристов, здание 2