



РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ДРУЖБЫ НАРОДОВ

Н. Ю. Кравченко

ФИЗИКА

УЧЕБНИК И ПРАКТИКУМ
ДЛЯ ПРИКЛАДНОГО БАКАЛАВРИАТА

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом высшего образования
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по естественнонаучным направлениям и специальностям*

Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru

Москва ■ Юрайт ■ 2017

УДК 53(075.8)
ББК 22.3я73
К77

Автор:

Кравченко Николай Юрьевич — старший преподаватель кафедры прикладной физики факультета физико-математических и естественных наук Российского университета дружбы народов.

Рецензенты:

Ерохин Н. С. — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом космогеофизики Института космических исследований РАН, профессор кафедры прикладной физики Российского университета дружбы народов;

Попов В. Ю. — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики Финансового университета при Правительстве Российской Федерации, профессор кафедры математики физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова;

Рыбаков Ю. П. — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической физики и механики Российского университета дружбы народов, заслуженный деятель науки Российской Федерации.

Кравченко, Н. Ю.

К77 Физика : учебник и практикум для прикладного бакалавриата / Н. Ю. Кравченко. — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 300 с. — Серия : Бакалавр. Прикладной курс.

ISBN 978-5-534-01027-5

В учебнике кратко рассматриваются теоретические основы общего курса физики, который включает в себя механику, теорию относительности, гидростатику и гидродинамику, молекулярную физику, электричество, магнетизм, оптику, квантовую механику, атомную и ядерную физику. Также даны представления о симметрии законов физики. Учебник включает в себя разбор актуальных аналитических задач, практических примеров, исследование ситуационных заданий. Книга снабжена методически проработанным практикумом, позволяющим успешно закрепить студентам теоретические знания.

Содержание учебника соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Для студентов и преподавателей высших учебных заведений технического профиля. Также книга адресована студентам, для которых физика не является профилирующей дисциплиной, но обязательна для изучения.

УДК 53(075.8)
ББК 22.3я73



Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

ISBN 978-5-534-01027-5

© Кравченко Н. Ю., 2015
© ООО «Издательство Юрайт», 2017

Оглавление

Предисловие	5
Введение, или несерьезно о серьезном.....	8
Глава 1. Механика.....	11
1.1. Кинематика материальной точки	11
1.2. Динамика материальной точки.....	17
1.3. Работа и энергия	22
1.4. Вращательное движение тел.....	26
1.5. Гравитационные силы. Силы инерции	33
1.6. Упругие свойства сплошных сред	37
1.7. Колебания частицы	39
1.8. Механические волны.....	42
1.9. Твердые тела.....	44
1.10. Явления переноса.....	46
<i>Задания для самостоятельной работы.....</i>	<i>49</i>
Глава 2. Теория относительности	54
2.1. Элементы специальной теории относительности Эйнштейна (релятивистской теории).....	54
2.2. Элементы общей теории относительности Эйнштейна	62
<i>Задания для самостоятельной работы.....</i>	<i>64</i>
Глава 3. Основы гидростатики и гидродинамики	67
3.1. Гидростатика	67
3.2. Движение жидкости и газа	69
<i>Задания для самостоятельной работы.....</i>	<i>76</i>
Глава 4. Молекулярная физика и теплота	80
4.1. Кинетическая теория газов	80
4.2. Реальные жидкости и газы	85
4.3. Законы термодинамики.....	88
4.4. Термодинамические процессы.....	93
4.5. Фазовые переходы.....	98
<i>Задания для самостоятельной работы</i>	<i>102</i>
Глава 5. Симметрия законов физики.....	108
Глава 6. Электричество и магнетизм	116
6.1. Электростатическое поле.....	116
6.2. Поле заряженных проводников и конденсаторов	122
6.3. Диэлектрики.....	126

6.4. Электронные свойства металлов	131
6.5. Контактные явления в металлах	133
6.6. Законы постоянного тока	134
6.7. Электрический ток в вакууме	139
6.8. Электрический ток в газе	143
6.9. Электрический ток в полупроводниках	147
6.10. Магнитное поле	152
6.11. Ускорители заряженных частиц	160
6.12. Плазма в магнитном поле	165
6.13. Электронно-лучевая трубка	168
6.14. Электромагнитная индукция	170
6.15. Магнитные свойства вещества	175
6.16. Электромагнитные колебания. Переменный ток	178
6.17. Электромагнитные волны	187
6.18. Уравнения Максвелла	190
<i>Задания для самостоятельной работы</i>	195
Глава 7. Оптика	204
7.1. Геометрическая оптика	204
7.2. Фотометрические величины и единицы их измерения	211
7.3. Интерференция света	214
7.4. Методы наблюдения интерференции	216
7.5. Дифракция света	225
7.6. Дифракция на простейших преградах	230
7.7. Дифракция рентгеновских лучей	238
7.8. Распространение света в веществе	239
7.9. Поляризация света	240
7.10. Закон Стефана — Больцмана	243
7.11. Фотоны и кванты. Фотоэффект	245
<i>Задания для самостоятельной работы</i>	248
Глава 8. Элементы квантовой механики	254
8.1. Волна де Бройля	254
8.2. Принцип неопределенности Гейзенберга	255
8.3. Уравнение Шредингера	257
8.4. Принцип запрета Паули	260
8.5. Квантовая статистика Бозе — Эйнштейна и Ферми — Дирака	263
<i>Задания для самостоятельной работы</i>	265
Глава 9. Элементы атомной и ядерной физики	266
9.1. Строение атома	266
9.2. Спектры водородоподобных атомов	270
9.3. Строение атомного ядра	271
9.4. Модель атомного ядра	273
9.5. Ядерные реакции. Механизм обменного взаимодействия	275
9.6. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада	276
<i>Задания для самостоятельной работы</i>	280
Заключение	283
Тесты-квесты	284
Рекомендуемая литература	299

Предисловие

Этот учебник создан на основе курса общей физики, читаемого мною на протяжении ряда лет студентам бакалавриата инженерного факультета Российского университета дружбы народов (РУДН), а также студентам направления подготовки «Информационная безопасность» Финансового университета при Правительстве Российской Федерации. Он также может быть полезен студентам вузов, для которых физика не является профилирующей дисциплиной, но обязательна для изучения.

Настоящий курс общей физики охватывает наиболее важные темы из основных разделов физики: механика, теория относительности, основы гидростатики и гидродинамики, молекулярная физика и теплота, электричество и магнетизм, оптика, элементы квантовой механики, элементы атомной и ядерной физики.

Кроме того, в учебник включена оригинальная глава «Симметрия законов физики», помогающая читателю почувствовать универсальность физических законов.

При написании учебника были учтены основные трудности, возникающие у студентов при изучении курса общей физики. Учебник рассчитан на тех, кто уже имеет начальное представление о физике, поэтому в тексте уделено минимальное внимание общеизвестным фактам, но более глубоко разъяснены понятия, традиционно вызывающие сложности в понимании.

Я постарался сделать эту книгу нескудной, наполнив ее содержание не только терминами, определениями и формулами, но и живыми словесными описаниями, которые всегда использую на своих лекциях.

Студенты часто спрашивают, где можно почитать бумажный вариант моих лекций. И каждый раз мне приходилось разводить руками. Но теперь я с радостью смогу представить им свой труд.

Надеюсь, что изучение этого учебника станет полезным не только тем, кому он непосредственно адресован, но также и старшеклассникам, готовящимся к экзамену по физике, и всем тем, кого интересует устройство мира вокруг нас.

Я буду рад отзывам, а также с удовольствием учту ваши пожелания и замечания. Присылайте их по адресу электронной почты: n.y.kravchenko@gmail.com.

Учебник составлен в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по направлению бакалавриата «Управление в технических системах», «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», «Нефтегазовое дело», «Энергетическое машиностроение», «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», «Информационная безопасность» и адресован как прикладному, так и академическому бакалавриату.

Целью изучения дисциплины «Физика» является создание у студентов основ достаточно широкой теоретической подготовки в области физики, позволяющей ориентироваться в потоке научной и технической информации и обеспечивающей им возможность использования новых физических принципов в тех областях техники, в которых они специализируются.

Задачами курса физики являются: формирование у студентов научного мышления и современного естественнонаучного мировоззрения, в частности, правильного понимания границ применимости различных физических понятий, законов, теорий и умения оценивать степень достоверности результатов, полученных с помощью экспериментальных или математических методов исследования; усвоение основных физических явлений и законов классической и современной физики, методов физического исследования; выработка у студентов приемов и навыков решения конкретных задач из разных областей физики, помогающих студентам в дальнейшем решать прикладные задачи.

Дисциплина «Физика» входит в базовую часть математического, естественнонаучного и общетехнического цикла, предшествующего для дисциплин профессиональной направленности, и является обязательной для изучения.

В результате изучения данного учебника студент должен:

знать

- основные физические явления;
- фундаментальные понятия, законы и теории классической и современной физики;
- базовые теоретические понятия физики, являющиеся частью естественнонаучного мировоззрения;
- особенности физических эффектов и явлений;
- методы исследования физических явлений;

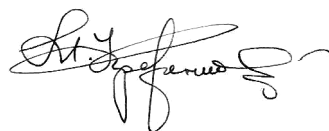
уметь

- применять полученные физические знания для решения конкретных задач из разных областей физики;
- обобщать, анализировать информацию;
- логически верно, аргументированно и ясно описывать основные физические явления;
- использовать основные законы физики в профессиональной деятельности;
- использовать основные естественнонаучные законы, применять математический аппарат в профессиональной деятельности, выявлять сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности;
- решать физические задачи;
- анализировать явления природы с точки зрения физических законов; видеть границы применимости тех или иных физических законов к описанию наблюдаемых явлений;

владеть

- навыками работы с измерительными приборами и проведения измерений;
- постановкой цели и выбором путей ее достижения;
- культурой мышления;

- способностью выявить естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлечением для их решения соответствующего физико-математического аппарата;
- навыками проведения математического доказательства следствий физических законов.



Н. Ю. Кравченко
Июнь 2015 г.
Москва

Введение, или несерьезно о серьезном

Мой дорогой читатель, прежде чем завлечь вас в дебри физических законов, я хотел бы оговорить некоторые особенности моего изложения.

Вы спросите: «А зачем вообще нам нужна физика с ее подчас сложными и не всегда понятными простому читателю законами?» Возможно, вы и правы, мой читатель. Но человечество с самого первого дня своего существования пыталось понять, что происходит вокруг нас и выяснить причины происходящего. Нет, никто не «придумывал законы», люди просто наблюдали за происходящими вокруг событиями и явлениями и находили связь между ними. Ньютон вовсе не «придумал» второй закон динамики, существовал он и до Ньютона, существует и по сей день. Великий Исаак Ньютон его просто сформулировал, поэтому и стал Великим. Умение формулировать свои мысли дорогого стоит. Надеюсь, прочитав этот учебник, вы тоже освоите это искусство. Но вернусь к ответу на поставленный вопрос. Неужели изучать физику нужно только для того, чтобы научиться управлять своими мыслями? Нет, не только. Я убежден, что все, что происходит с нами в жизни, происходит по тем же самым законам, что описаны в этой книге. Поймем эти законы, значит, научимся разбираться во всем, что происходит вокруг нас. Один известный банкир, физик по образованию, сказал: «Я смог разобраться с квантовой механикой, так неужели не смогу разобраться с банковским делом?» И разобрался.

Жизнь развивается по тем же самым физическим законам, которые мы с вами будем изучать. Хотите доказательств? Пожалуйста, представьте, что вы шли по улице и обронили десятирублевую монету. Значит ли это, что денег в государстве стало меньше ровно на 10 рублей? Нет, не значит. Скорее всего, вашу монетку поднял кто-то, идущий следом за вами, поэтому девальвации не произойдет. Тут, дорогой читатель, сработал *закон сохранения*. Слышали про такой?

Хотите еще примеры? Тогда представьте другую ситуацию. Вы зашли в полупустой вагон метро, где много свободных мест. Будете ли вы стоять или сядете на свободное место? Думаю, второе. А задумывались ли вы, что подвигло вас на этот поступок? Нет, вовсе не усталость, а самый простой физический принцип — *принцип минимума свободной энергии*.

Еще примеры? *Хорошо*, доводилось ли вам когда-либо спорить с человеком, который совершенно отказывался вас понимать и настаивал на своем? Наверняка. Но не думаете ли вы, что этот человек глупее вас? Конечно, нет. Просто те же самые вещи он рассматривает совершенно под другим углом. Тут, друзья мои, все дело в *законе отражения и преломления!*

Для закрепления материала, еще один пример. На этот раз вы зимой заливаете на спортивной площадке каток. И вдруг вода перестает литься. Вы обследуете шланг и обнаруживаете, что кто-то пережал его большим узлом. Неужели вы всерьез думаете, что вода не льется именно из-за этого? Конечно же, нет. Просто одновременно сработали несколько физических принципов: *закон Кирхгофа* для разветвленных цепей, *уравнение неразрывности*, *закон сохранения массы* и *закон Паскаля*. Обо всех этих законах и принципах я вам обязательно расскажу в этой книге.

Убедились, что физика повсюду? Отлично, тогда скорее приступим к ее изучению. Но только осторожнее, физика — дама языкастая! А язык ее — математика. Без нее, братцы, никуда. Мне кажется, что математика и логика — это почти одно и то же. Вы уже знаете, что все физические принципы и законы подчиняются строгой логике. Но попробуйте сформулировать эту логику не математическим языком, а своим собственным, тем, *что без формул*.

Например, решим задачу. На проводе сидит несколько птиц. Притом, две из них — сидят постоянно, никуда не улетаая, а остальные могут улетать и прилетать в любой момент. Вопрос: сколько птиц сидит на проводе в произвольный момент времени t (т.е. имеют нулевую скорость)? Тут все просто. Ответ $y = x + 2$, где y — искомая величина, x — количество свободных птиц, 2 — количество постоянных любителей экстрима (ведь сидеть на проводах небезопасно), константа. Но тут, конечно же, можно было обойтись и без формул. А что если у нас не птицы, а молекулы, а их поведение определяется следующей логикой

$$\varphi(v) = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}}.$$

Как вы тогда опишете эту логику словами? То-то же!

И последнее, о моделях. Я очень часто буду их использовать в своих описаниях. Дело все в том, что как бы мы ни старались, но нам до сих пор известно далеко не все. Часто бывает, что нам неизвестен механизм какого-либо процесса, но мы, тем не менее, можем рассчитать результат. Тут нам на помощь приходит модель. Я бы сказал так, что модель — это некий алгоритм, который позволяет нам получить верный результат, не вникая в механизм процесса.

Разберем такой пример. Вы вышли из дома в хорошем расположении духа и направились на экзамен по физике, и вдруг дорогу вам перебежала... черная кошка. Что вы сделаете дальше? Скорее всего, измените траекторию вашего дальнейшего движения. Какая связь между этими двумя событиями? Увы, науке это неизвестно... Но связь точно есть, в этом вы несколько не сомневались, выбирая другую дорогу. В этом случае, чтобы получить нужный результат (хорошую оценку на экзамене), вы использовали модель (выбрали другую траекторию). Хотя и не понимаете, как эта модель работает. И правильно сделали!

Другой пример о моделях. Если я спрошу у вас, сколько будет два яблока плюс три яблока, то вы ответите: «Пять яблок». При этом в вашем воображении возникнут сначала два сочных плода, затем еще три, а потом, пересчитав мысленно весь урожай, вы назовете ответ. А если тот же вопрос я

задам... калькулятору? Вряд ли он будет «рассуждать» так же, как вы. Скорее всего, он преобразует мой вопрос в электрический сигнал, заданные числа переведет в двоичную систему счисления и... *выдаст верный результат*. Способы размышления над вопросом у вас и у калькулятора разные, но результат, скорее всего, у калькулятора надежнее, так как у вас всегда есть шанс ошибиться. В этом случае, друзья, калькулятор использовал модель, которая помогла ему «думать» так, как он умеет. И не важно, что модель эта не имеет ничего общего с действительностью, ведь она дала *верный результат*.

Итак, вперед, к новым моделям, которые помогут нам понять основы мироздания!

Глава 1

МЕХАНИКА

В результате изучения данной главы студент должен:

знать

- основные понятия, законы и модели кинематики и динамики;
- единицы измерения физических величин;
- основные свойства упругих сред;
- классификацию сил;

уметь

- анализировать механические явления;
- грамотно применять законы кинематики и динамики к решению практических задач;

владеть

- методами решения задач кинематики и динамики;
 - навыками анализа наблюдаемых механических явлений.
-

1.1. Кинематика материальной точки

«Чужими руками хорошей работы не сделаешь», — написал в 1943 г. Петр Леонидович Капица¹. Поэтому, друзья мои, если вы действительно хотите понять физику, то придется в ней разбираться самостоятельно. Но я вам помогу...

Прежде, чем перейти к основной части, нам необходимо определиться с терминологией и некоторыми понятиями.

Механическим движением будем называть любое изменение положения точки в пространстве.

Материальная точка — тело, размерами которого можно пренебречь. Иногда добавляют — «по сравнению с расстоянием до этого тела». А вот, скажем, автомобиль, движущийся сейчас за окном. Не такая уж это и точка! Можно ли к нему применять понятие «материальная точка»? Или, что еще хуже, поезд, движущийся из города *A* в город *B*. И он — тоже точка? Да, точка! В данном случае нам важны вовсе не размеры тела, даже если они очень велики, а то, что движение всего макрообъекта целиком ничем не отличается от движения любой точки, принадлежащей этому объекту. Иными словами, применительно к поезду, стол в третьем купе пятого вагона движется точно так же, как окно в седьмом купе десятого вагона. И на ко-

¹ П. Л. Капица — выдающийся советский физик, академик АН СССР, член Президиума АН СССР, лауреат Нобелевской премии по физике (1978 г.) за фундаментальные открытия и изобретения в области физики низких температур. Один из основателей Московского физико-технического института (МФТИ).

нечную станцию они, как вы догадываетесь, прибывают одновременно. Поэтому в нашем примере поезд — материальная точка.

Система отсчета — это совокупность трех понятий: точки отсчета, системы координат и прибора для измерения времени. Притом, заметьте, все три объекта представлены в нашем мире в широчайшем многообразии. Точкой отсчета может стать все, что угодно, любая точка в пространстве, как неподвижная, так и движущаяся. А прибор для измерения времени — не только часы. Метроном, например, чем не прибор для измерения времени? Или биение вашего сердца, его тоже можно считать таким прибором, если, конечно, вы не влюблены. В этом случае биение сердца ритмично, а здравый смысл исчезает.

Стоит особо поговорить о таком понятии, как **система координат**. Она предназначена для того, чтобы можно было абсолютно однозначно определить положение любой точки в пространстве. А, поскольку сделать это можно разными способами, то систем координат существует множество. Перечислю лишь некоторые из них: зональная система координат, система координат Гаусса — Крюгера, полярная, прямоугольная, сферическая, цилиндрическая (рис. 1.1). Мы в этом курсе будем использовать декартову систему координат, названную так в честь Декарта¹. Это — частный случай прямоугольной системы координат, в котором по осям установлены одинаковые масштабы. Координаты обозначают латинскими буквами x , y , z и называют абсциссой, ординатой и аппликатой соответственно. Для того, чтобы однозначно задать положение точки в пространстве, необходимо указать лишь три его координаты — (x, y, z) . Однако стоит быть внимательными: декартова система координат может быть *левосторонней* и *правосторонней*² (см. рис. 1.1 v, z).

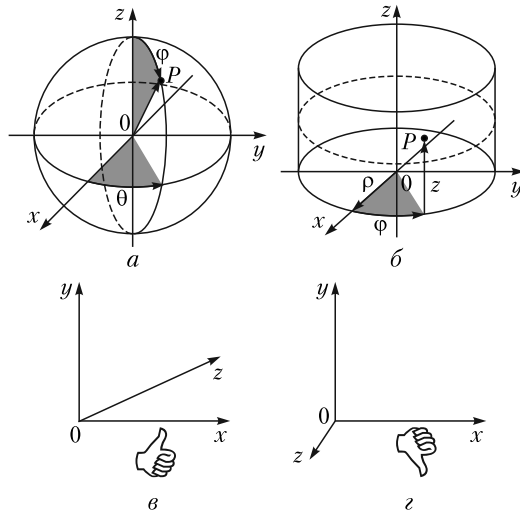


Рис. 1.1. Системы координат:

a — сферическая; $б$ — цилиндрическая; $в$ — декартова левосторонняя;
 z — декартова правосторонняя

¹ Рене Декарт (1596–1650) — французский философ, математик, механик, физик и физиолог, создатель аналитической геометрии и современной алгебраической символики.

² Часто говорят просто «правая система координат» и «левая система координат».

Рассмотрим свою правую руку. Расположим большой, указательный и средний пальцы в трех взаимно перпендикулярных направлениях. А теперь считайте, что большой палец показывает направление оси $0x$, указательный — направление $0y$, средний — $0z$. Получим правостороннюю декартову систему координат. А правило, которым мы ее определили, называют «правилом правой руки» (рис. 1.2).

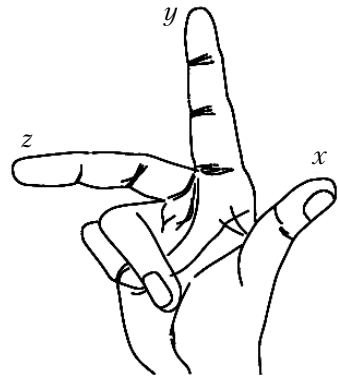


Рис. 1.2. Правило правой руки

В левосторонней системе координат одна из осей будет направлена в противоположную сторону (см. рис. 1.1, *в*). В сферической системе координат для определения положения точки в пространстве также достаточно задать три параметра — (ρ, θ, φ) , где ρ — кратчайшее расстояние до начала координат, а θ и φ — зенитный и азимутальный углы соответственно (см. рис. 1.1, *а*). В цилиндрической системе координат используют параметры (ρ, φ, z) , см. рис. 1.1, *б*.

Прямолинейное движение — движение по прямой линии.

Криволинейное движение — движение не по прямой. Необходимо заметить, что любое криволинейное движение можно представить как *совокупность двух типов движения* — прямолинейного и по окружностям разного радиуса.

Равномерное движение — движение с постоянной скоростью.

Переменное движение — движение, при котором ускорение точки отлично от нуля $a \neq 0$. Но, если $a = \text{const}$, то движение называют *равнопеременным*. При этом ускорение может быть как положительным, и такое движение называется *равноускоренным*, так и отрицательным, такое движение — *равнозамедленное*.

Скорость — это понятие уже более широкое, нежели предыдущие, разберем его более детально. *Средняя скорость* — путь, отнесенный к интервалу времени, за который этот путь пройден. Например, мы движемся на автомобиле из города *Б* (куда уже прибыли из города *А* на поезде) в город *В* и расстояние в 300 км преодолеваем за 4 ч. Это значит, что наша средняя скорость

$$\langle v \rangle = \frac{s_2 - s_1}{\Delta t} = \frac{300}{4} = 75 \text{ (км/ч)}.$$

Но в дороге мы делали две остановки. Значит, наша скорость не всегда была равна 75 км/ч. Могло даже быть так, что скорость нигде не была равна 75 км/ч вообще. В данном случае мы говорим о средней скорости.

Мгновенная скорость. Нобелевский лауреат по физике Ричард Фейнман в своих «Фейнмановских лекциях по физике»¹ описывает замечательный спор полицейского и автолюбительницы, превысившей скорость. Дорожный знак ограничивал скорость до «90».

— Вы превысили скорость. Здесь нельзя превышать 90 км/ч.

— Позвольте. 90 км? Я живу в миле отсюда. Я никак не могла проехать 90 км.

¹ Richard P. Feynman, Robert B. Leighton. Matthew Sands. The Feynman Lectures on Physics.

— Ну хорошо. Но ведь 90 км/ч — это 25 м/с.
 — Да. Но ведь на знаке написано 90 км/ч, а не 25 м/с. А значит, нарушения нет!

Давайте уйдем от этого спора. Ведь нам с вами совершенно понятно, что в этом разговоре дама говорит о скорости средней, полицейский же — о мгновенной. Что же есть мгновенная скорость? В этом примере, чтобы убедить даму, полицейскому нужно было бы взять к рассмотрению очень малый интервал времени, чем меньший, тем лучше, и замерить путь за *этом* интервал. Другими словами, искомая скорость есть

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} = \dot{x}.$$

Это — предел (\lim) отношения приращения функции (Δx) к приращению аргумента (Δt), когда последнее стремится к нулю ($\Delta t \rightarrow 0$). Это *классическое определение* производной.

Таким образом, мгновенная скорость есть производная перемещения по времени

$$v = \frac{dx}{dt} = \dot{x}.$$

Из этого уравнения можно выразить **путь**

$$S = \int_{(1)}^{(2)} ds = \int_{(1)}^{(2)} dx = \int_{(1)}^{(2)} v dt.$$

Если понятен смысл производной, то не составит труда понять *геометрический смысл пути*. Он состоит в том, что путь s численно равен площади фигуры S , ограниченной кривой $v(t)$ между точками 1 и 2 (рис. 1.3). Другими словами, если на участке $1 \rightarrow 2$ скорость точки не постоянна ($v \neq \text{const}$), то для определения пути, пройденного точкой, нельзя воспользоваться соотношением $s = v \cdot t$. Это выражение справедливо лишь для бесконечно малого участка пути, на котором можно определить лишь мгновенную скорость. В нашем же случае скорость изменяется во времени $v = v(t)$. Тогда для нахождения полного пути необходимо разбить весь этот путь на бесконечное количество таких малых участков, на каждом из них рассчитать произведение $ds = v \cdot dt$ и сложить (т.е. найти интеграл). Из рис. 1.3 видно, что произведение скорости v на интервал времени dt есть площадь малого прямоугольника. Сумма всех таких площадей есть площадь фигуры под кривой.

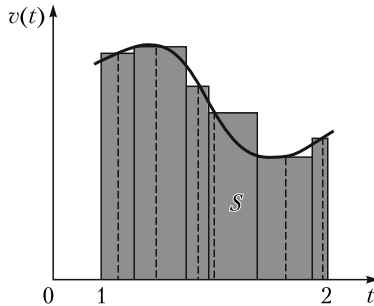


Рис. 1.3. Геометрический смысл пути

Ускорение. Равно как и скорость, ускорение также может быть средним и мгновенным. *Среднее ускорение* — изменение скорости за интервал времени. Другими словами, ускорение есть «скорость изменения скорости»,

$$\langle a \rangle = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}.$$

Мгновенное ускорение, по аналогии с мгновенной скоростью, есть первая производная скорости по времени либо (что то же самое) вторая производная перемещения по времени. То есть

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

или в другой форме

$$a = \dot{v} = \ddot{x}.$$

Уравнение движения. Еще Галилей заметил, что путь, пройденный телом, движущимся по наклонной плоскости, квадратично зависит от времени

$$x = x_0 + v_0 t \pm \frac{at^2}{2}. \quad (1.1)$$

Продифференцировав левую и правую части этого уравнения, получим

$$v = b_0 \pm at. \quad (1.2)$$

Уравнения (1.1) и (1.2) называют *уравнениями движения* материальной точки. Знак «±» перед ускорением говорит о его направлении. Если тело движется без ускорения, т.е. $a = 0$, то уравнение (1.1) преобразуется к виду:

$$x = x_0 + v_0 t.$$

Уравнения (1.1) и (1.2) могут быть применены только к случаю прямолинейного движения. В случае же движения тела по окружности становится затруднительным определение таких физических величин, как линейная скорость v , линейное ускорение a и координата x . Поэтому для описания движения тела по окружности используют *уравнения вращательного движения*

$$\begin{cases} \varphi = \varphi_0 + \omega_0 t \pm \frac{\varepsilon t^2}{2}; \\ \omega = \omega_0 \pm \varepsilon t. \end{cases}$$

В этой системе φ — угловое перемещение, $\omega = \dot{\varphi} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n$ — угловая скорость, $\varepsilon = \dot{\omega}$ — угловое ускорение.

Направление угловой скорости ω определяется *правилом правого винта*: если вкручивать винт с правой резьбой, направление его поступательного движения совпадает с направлением угловой скорости (рис. 1.4). Направление углового ускорения ε совпадает с направлением угловой скорости, если скорость вращения растет, и противоположно — если скорость вращения падает (см. рис. 1.4).

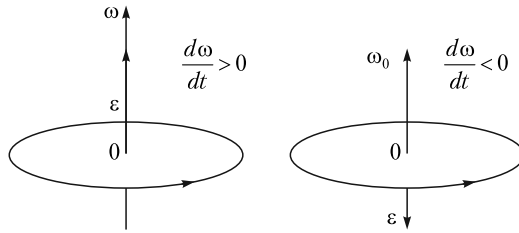


Рис. 1.4. Угловая скорость ω и угловое ускорение ε

Полное ускорение

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

где a_n — нормальное (или центростремительное) ускорение; a_τ — тангенциальное ускорение точки (рис. 1.5).

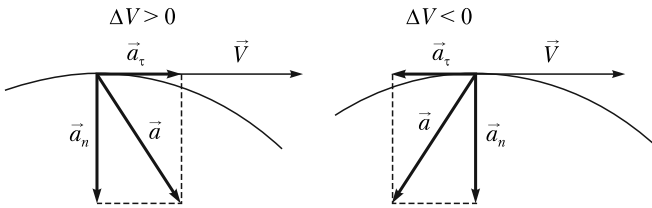


Рис. 1.5. Нормальное и тангенциальное ускорения

Связь линейных и угловых величин. Здесь скажем только, что линейные и угловые физические величины связаны между собой следующими соотношениями

$$a_n = \frac{v^2}{R} = R\omega^2; \quad a_\tau = \dot{v} = R\varepsilon; \quad s = R\varphi; \quad v = \omega R.$$

Последнее соотношение легко запоминается с помощью забавного мнемонического правила: *знает каждый инженер: v равно ωR* . А если вы не планируете стать инженером, тогда просто сверяйте размерности величин.

Пример решения задачи

Дано: снаряд вылетел из орудия под углом α к горизонту с начальной скоростью v_0 . Определить максимальную высоту подъема этого снаряда и дальность его полета.

Решение: запишем уравнения движения в виде

$$x = x_0 + v_0 t \pm \frac{at^2}{2}; \quad v = v_0 \pm at.$$

Поскольку движение снаряда происходит в двумерной плоскости, распишем проекции уравнений движения на горизонтальную и вертикальную оси.

$$l = v_0 t \cos \alpha; \tag{1}$$

$$h = v_0 t \sin \alpha - \frac{gt_1^2}{2}; \tag{2}$$

$$0 = v_0 \sin \alpha - gt_1. \tag{3}$$

В этих уравнениях l — искомая дальность полета, h — искомая высота полета, t — полное время полета, $t_1 = t/2$ — время полета до середины пути, где снаряд достигает максимума высоты. Из (1.3) выражаем время t_1

$$t_1 = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}; \quad (4)$$

$$t = 2t_1 = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}. \quad (5)$$

Подставляем (4) в (2), а (5) в (1) и получаем

$$h = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{g} - \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g};$$

$$l = \frac{2v_0^2 \sin \alpha}{g} \cos \alpha = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

Уравнения движения и масса тела. Заметьте, что в уравнения движения (1.1) и (1.2) не входит масса тела. Это означает, что ни скорость, ни координата движущегося тела не зависят от массы. А теперь возьмите в правую руку монету достоинством 10 руб., а в левую — достоинством 1 коп. Как вы думаете, если одновременно отпустить эти монеты без начальной скорости, какая из них быстрее упадет на пол? Согласно уравнениям (1.1) и (1.2) — одновременно, ведь ни скорость, ни время движения не зависят от массы. Сомневаетесь? Тогда попробуйте сами.

А теперь замените одну копейку на лист бумаги. И повторите опыт. Неужели и на этот раз монета упадет одновременно с листом? Конечно же, нет. Почему?

Ответ достаточно прост. Уравнения движения не учитывают сопротивление воздуха. Поэтому при отсутствии сопротивления либо в случае равенства сил сопротивления обоих тел, они упадут одновременно. (В нашем случае сопротивления разных монет почти равны, следовательно, они упадут почти одновременно, независимо от массы). А вот для листа уже появляется достаточная сила сопротивления воздуха, для этого случая уравнения движения не работают. Поэтому лист, конечно же, упадет позже.

В 1590 г. профессор Пизанского университета Галилео Галилей провел свои знаменитые опыты: с 294-й ступеньки Пизанской башни он бросал на землю шары разной массы, чтобы убедить мир в том, что время падения не зависит от массы. *И убедил.*

1.2. Динамика материальной точки

В 1633 г. инквизиция начала процесс против Галилея по подозрению в ереси из-за его научных воззрений. Больного 70-летнего ученого доставили в Рим и, угрожая пытками, заставили подписать отречение от его взглядов на планетарное устройство мира. Только в 1971 г. католическая церковь отменила решение об осуждении Галилея. Теперь даже маленькие дети знают, что «она все-таки вертится!».

Принцип инерции Галилея: тело, предоставленное самому себе, остается неподвижным или движущимся прямолинейно и равномерно, если на него не действуют силы или действие всех сил скомпенсировано.

Другими словами, если тело не трогать, то оно будет лежать, где лежало, или ехать, как и ехало. Как часто говорят, «по инерции». Так полагал и Ньютон, предложив нам

1-й закон Ньютона (закон инерции): «Всякое тело продолжает удерживаться в состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние». Так писал *сам мэтр*.

Современная формулировка закона немного видоизменилась, но суть осталась прежней: «Существуют такие системы отсчета, относительно которых тело сохраняет свою скорость неизменной при отсутствии внешних сил или их взаимной компенсации. Такие системы отсчета называются инерциальными (ИСО)».

Все три утверждения суть одно и то же. Но коль скоро мы заговорили об инерции, то стоит поговорить и о мере инертности, такой как *масса*.

Масса и есть мера инертности тела, т.е. свойство, показывающее, насколько сильно тело сопротивляется изменению своей скорости. Попробуйте-ка подбросить вверх два разных камня — один с массой в 500 г, а второй — 5 кг. Который из них сильнее сопротивляется вашей силе? Конечно, второй. Связано это лишь с тем, что масса второго камня больше, следовательно, больше и инертность.

В повседневной жизни часто путают два понятия — массу и вес тела. Это, конечно же, не коснется вас, если вы прочитаете следующий абзац.

Вес тела. Обычно говорят, что вес тела — это сила, с которой тело действует на опору или подвес: $P = mg$. Если в магазине вы просите продавца «взвесить вам килограмм фруктов», то он так и делает, «взвешивает» при помощи прибора под названием «весы». Логично предположить, что весы определяют вес (т.е. $P = mg$), но вот показывают они массу (т.е. $m = P/g$, где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения, ускорение силы тяжести). Надеюсь, теперь вы не будете путать вес с массой. А может ли вес быть равным нулю? Конечно, может. Ведь многие из вас слышали про **невесомость**. Это как раз тот случай, когда вес тела равен нулю, т.е. $P = mg = 0$. Если тело не подвешено и не имеет опоры, то оно свободно падает. Именно в этом состоянии вес равен нулю. *Вес, но не масса.* А теперь подумайте над вопросом: как может произведение двух ненулевых величин ($m \neq 0, g \neq 0$) быть равным нулю ($P = mg = 0$)? Если вы уже знаете ответ, то не зря дочитали до этого момента. Если нет, то помните: мы с вами только в самом начале повествования, впереди еще много ответов.

2-й закон Ньютона (закон динамики). Будет правильно записать его в таком виде

$$\vec{a} = (\sum_i \vec{F}_i) / m.$$

Здесь $\sum_i \vec{F}_i$ — векторная сумма всех сил, действующих на тело. Под действием этих сил тело и приобретает ускорение \vec{a} .

2-й закон Ньютона в дифференциальной форме. Выведем дифференциальную форму закона

$$F = ma = m \frac{dv}{dt} = \frac{d(mv)}{dt}.$$

В данном выражении учтено, что $d(mv) = mdv$, так как массу m считаем постоянной величиной и ее можно вынести за знак дифференцирования. Кроме того, напомним, что *импульс* тела определяется выражением $p = mv$, это значит, что $d(mv) = dp$ и, окончательно

$$F = \frac{dp}{dt} = \dot{p}.$$

Последнее выражение и называют *дифференциальной формой 2-го закона Ньютона*. В таком виде закон утверждает, что *сила — есть производная импульса по времени*. Как вы помните, производная по времени суть скорость, а следовательно, можно сказать, что *сила — есть скорость изменения импульса*.

Пример решения задачи

Дано: два бруска с массами m_1 и m_2 соединены нерастяжимой нитью и перекинуты через невесомый блок так, как показано на рис. 1.6. Коэффициент трения между вторым бруском и поверхностью — k , угол наклона поверхности — α . Определить, куда и с каким ускорением a будут двигаться бруски. Найти силу натяжения нити T .

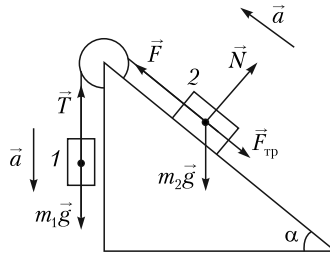


Рис. 1.6. Иллюстрация к задаче

Решение: на рис. 1.6 изображены направления всех сил, действующих на бруски. Запишем 2-й закон Ньютона для обоих брусков на направления их движения. При этом предположим, что система будет двигаться в сторону первого бруска (т.е. ускорение направлено налево). Если последнее неверно, то в ответе мы получим отрицательное ускорение.

$$m_1g - T = m_1a; \tag{1}$$

$$T - m_2g\sin\alpha - F_{\text{тр}} = m_2a. \tag{2}$$

Кроме того, силу трения можно выразить как

$$F_{\text{тр}} = m_2gk. \tag{3}$$

Из (1) выразим T и подставим в (2). Из (3) $F_{\text{тр}}$ также подставим в (2).

$$T = m_1(g - a); \tag{4}$$

$$m_1(g - a) - m_2g\sin\alpha - m_2gk = m_2a. \tag{5}$$

Раскрываем скобки в (5) и выражаем ускорение a

$$m_1g - m_2g\sin\alpha - m_2gk = (m_1 + m_2)a \Rightarrow a = \frac{m_1 - m_2\sin\alpha - m_2k}{m_1 + m_2}g. \tag{6}$$

В (4) подставляем (6)

$$T = m_1g \left(1 - \frac{m_1 - m_2\sin\alpha - m_2k}{m_1 + m_2} \right).$$

Направление ускорения будет зависеть от числового значения знаменателя в выражении (6) и совпадет с выбранным нами направлением в случае, если

$$m_1 > m_2(k + \sin \alpha).$$

3-й закон Ньютона. Нам он знаком в формулировке: *сила действия равна силе противодействия*. Или: *два тела взаимодействуют друг с другом с силами, равными по модулю и противоположными по направлению*: $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$.

Давайте попробуем разобраться в этом более детально. Представьте, что вы привязали веревку к стене и тянете за нее с некоторой силой \vec{F} . Вам кажется, что, согласно последнему утверждению, стенка отвечает вам «взаимностью» и тянет в противоположную сторону с силой $-\vec{F}$. Вы можете регулировать свою мышечную силу, увеличивать или уменьшать ее. Значит ли это, что стена будет в ответ регулировать свою? Нет. Но, тем не менее, $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$. Как понять физику этого процесса? Очень просто: если считать, что 2-й закон Ньютона верен, то верен и 1-й закон Ньютона, ибо он — частный случай закона динамики. Если тело неподвижно или движется равномерно (т.е. $v = \text{const}$, $a = 0$), то и $F = ma = 0$. Равенство нулю силы означает, что на тело силы не действуют или они скомпенсированы. *Мы получили формулировку 1-го закона.*

А теперь снова вернемся к стене и веревке. *Если верен 1-й закон Ньютона (а следовательно и 2-й), то верен и 3-й закон.* Посмотрите на стену — она неподвижна. Ее скорость равна нулю. Следовательно, согласно 1-му закону, сумма всех сил тоже должна быть равна нулю. Одну ненулевую силу мы точно ощущаем — это сила наших мышц, тянущих за веревку. Значит должна быть и другая сила, в сумме с нашей дающая ноль. *Да, она есть. Это сила упругости веревки.* Стена тут, как вы, наверное, догадались, не при чем.

Таким образом, все три закона Ньютона есть проявления одного и того же физического принципа.

Границы применимости законов. Следует отметить, что все законы и принципы, которые мы рассматриваем в этом разделе, справедливы лишь для *инерциальных систем отсчета* (ИСО). В *неинерциальных системах отсчета* (НИСО) они имеют совершенно иной вид, но об этом мы поговорим позже.

Пример: движение тела в поле силы тяжести Земли

Рассмотрим падение тела в поле силы тяжести. В этом случае, согласно 2-му закону Ньютона, $F = ma = m(d^2x/dt^2)$. В параграфе 1.1 мы уже говорили об *уравнении движения* $x = x_0 + v_0t \pm at^2/2$. Подставим это уравнение во 2-й закон Ньютона и учтем, что $a = g$

$$F = m \frac{d^2x}{dt^2} = m \frac{d^2 \left(x_0 + v_0t \pm \frac{at^2}{2} \right)}{dt^2} = m \frac{d(v_0 \pm gt)}{dt} = \pm mg.$$

Получилось верное равенство. Из математики вам, наверное, известно, что решением уравнения является такая функция, которая при подстановке в это уравнение дает верное равенство. Что мы и получили.

Следовательно, уравнения движения (1.1) и (1.2) являются решением 2-го закона Ньютона. Тем самым мы доказали, что все описываемые до это-

го момента законы не просто связаны друг с другом, а являются разными проявлениями одного и того же принципа.

Более того, то же самое справедливо, если рассмотреть *закон сохранения импульса*.

Закон сохранения импульса. Импульс замкнутой системы тел сохраняется (не изменяется). Или

$$p = p_1 + p_2 + \dots = \text{const.}$$

А так ли это на самом деле? Конечно так, это мы легко докажем. Только что мы убедились в справедливости законов Ньютона, например, 3-го: ($F_{12} = -F_{21}$) и 2-го: ($F = dp/dt$). Подставим одно в другое и получим, что

$$\frac{dp_1}{dt} = -\frac{dp_2}{dt} \Rightarrow \frac{dp_1}{dt} + \frac{dp_2}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d(p_1 + p_2)}{dt} = 0 \Rightarrow p = p_1 + p_2 + \dots = \text{const.}$$

Следовательно, *закон сохранения импульса* есть лишь проявление законов Ньютона. Еще раз напомним, что закон работает только в ИСО.

Движение тел с переменной массой (реактивное движение). Уравнение Мещерского. Рассмотрим случай применения закона сохранения импульса на примере движения тела переменной массы. Например, если надуть воздушный шарик и, не завязывая, выпустить его из рук, то он начнет хаотично двигаться в пространстве с некоторой скоростью. Это — пример *реактивного движения*. Другой пример — движение ракеты. Если считать, что mv — импульс ракеты до старта, то через некоторое время после старта dt импульс системы «ракета — газ» станет равным

$$(m - dm)(v + dv) + dm_{\text{газ}} dv_{\text{газ}} - mv = Fdt,$$

где $dm_{\text{газ}} dv_{\text{газ}}$ — импульс газа. Раскроем скобки и выбросим малые величины ($dmdv \rightarrow 0$, $dm_{\text{газ}} \rightarrow 0$, $dm + dm_{\text{газ}} \rightarrow 0$), затем разделим обе части уравнения на dt . Получим

$$m \frac{dv}{dt} = v \frac{dm}{dt} + F.$$

Это — 2-й закон Ньютона в дифференциальной форме для реактивного движения. Здесь $v(dm/dt)$ — реактивная сила.

Формула Циолковского. Раз уж мы заговорили о движении ракеты, то не можем не вспомнить, что мысли Человечества о полете в космос стали приобретать реальные очертания, когда в 1896 г. простой учитель физики из провинциальной школы под Калугой Константин Эдуардович Циолковский вывел¹ формулу, позволяющую рассчитать максимальную скорость одноступенчатой ракеты в идеальном случае. И все дело здесь даже «не в формуле, а в том, что он первый увидел в ней возможность выхода человека в мировое пространство»². Сегодня формулу Циолковского чаще записывают в иной форме, но мы намеренно оставим ее в первоизданном виде (рис. 1.7). В формуле v — скорость ракеты, v_1 — скорость вырывающихся газов, M_1, M_2 — массы топлива и ракеты соответственно.

¹ Впервые опубликована в журнале «Научное обозрение», 1903, № 5.

² Академик Б. В. Раушенбах, Земля и Вселенная, 2001, № 4.