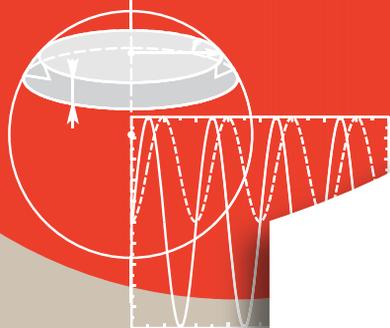


Н. П. Калашников  
М. А. Смондырев

# ОСНОВЫ ФИЗИКИ



ЛАБОРАТОРИЯ

**пилот**

УДК 53(075.8)  
ББК 22.3я73  
К17

*Серия основана в 2009 г.*

**Калашников Н. П.**

К17 Основы физики [Электронный ресурс] : в 2 т. Т. 1 / Н. П. Калашников, М. А. Смондырев. — Эл. изд. — Электрон. текстовые дан. (1 файл pdf : 545 с.). — М. : Лаборатория знаний, 2017. — (Учебник для высшей школы). — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10".

ISBN 978-5-00101-528-4 (Т. 1)

ISBN 978-5-00101-527-7

Учебник соответствует программе дисциплины «Физика» для технических вузов общего профиля. Два его тома входят в состав учебного комплекта, включающего также учебное пособие «Основы физики. Упражнения и задачи» тех же авторов.

Во многих отношениях данный учебник не имеет аналогов. Ряд оригинальных методических приемов и способов изложения материала, включение новых, зачастую неожиданных тем и ярких примеров, отсутствующих в традиционных курсах физики, позволяют учащимся приобрести навыки уверенного самостоятельного мышления, глубоко уяснить физические основы самых различных реальных природных явлений, давать их практические, качественные оценки, оперируя размерностями и порядками величин.

Для студентов инженерно-технических и естественнонаучных специальностей.

**УДК 53(075.8)**  
**ББК 22.3я73**

**Деривативное электронное издание на основе печатного аналога:** Основы физики : в 2 т. Т. 1 / Н. П. Калашников, М. А. Смондырев. — М. : Лаборатория знаний, 2017. — 542 с. : ил. — (Учебник для высшей школы). — ISBN 978-5-00101-004-3 (Т. 1); ISBN 978-5-00101-003-6.

**В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации**

ISBN 978-5-00101-528-4 (Т. 1)

ISBN 978-5-00101-527-7

© Лаборатория знаний, 2017

## Часть I

# Физические основы механики

*Когда кончился бензин,  
автомобиль вынужден был  
остановиться. Это я тоже  
сам вчера видел. А после этого  
еще болтают об инерции,  
господа! Не едет, стоит, с  
места не трогается! Нет  
бензина. Ну, не смешно ли?*

---

Ярослав Гашек. «Похождения  
бравого солдата Швейка»

# Глава 1

## Измерения физических величин

Предметом естествознания в широком смысле является познание окружающего нас мира. Задача естественных наук состоит в том, чтобы сформировать в нашем сознании такую модель физического мира, которая наиболее полно отражала бы его свойства и обеспечивала бы такие соотношения между элементами модели, какие существуют между элементами внешнего мира. Дж. Максвелл писал: «Точные науки стремятся к тому, чтобы свести загадки природы к определению некоторых величин путем операций над числами». Поэтому естественные науки «говорят» с природой на языке математики. Принцип *nulla scientia potest sciri sine mathematica* (никакую науку нельзя познать без математики) был сформулирован еще в средневековье. Но откуда взять эти числа, которыми оперирует математика, которые должны фигурировать в уравнениях, выражающих те или иные закономерности природы? Единственным источником их может служить сама природа.

### 1.1 О разнице вопросов «как?» и «почему?»

Учебники принято начинать с определения предмета исследования соответствующей науки. Трудно удержаться, чтобы не процитировать прелестное и наивное определение из первого учебника физики на русском языке<sup>1</sup>, изданного при Екатерине II: «Физика есть сколько приятная, столько и полезная наука, толкующая свойства тел или предметов, нас окружающих. Физика научает нас обо всем рассуждать здраво и основательно, а чрез то самое и необходимо нужна для всякого человека».

*Естествознание* — комплекс экспериментальных наук, в основе которых лежат наиболее общие закономерности, изучаемые физикой. Естественные науки начинаются с наблюдений и измерений, ими же проверяются и питаются в

---

<sup>1</sup>Иоганн Якоб Эберт. Краткое руководство к физике. СПб, 1787. Перевод этой книги с немецкого появился вследствие начала формирования государственной системы среднего образования и введения преподавания физики как самостоятельного предмета.

своем развитии. Конечно, новые идеи в науке появляются и благодаря умозрительным рассуждениям, но окончательный ответ на решающие вопросы может быть получен только в эксперименте. Да и сами эти идеи на пустом месте не возникают.

С помощью приборов мы задаем природе вопросы и получаем ответы, которые «обрабатываем» в нашем мозгу, на своих компьютерах. Понять явление — значит уметь его описать, знать условия, при которых оно происходит, предсказать его последствия. Важно лишь правильно сформулировать свои вопросы, и тогда мы получаем шанс, что природа на них ответит. Природа (и вместе с ней наука) не отвечает на вопросы «почему?» или «зачем?». Почему тело под действием силы приобретает ускорение? Почему электрическое поле действует на заряд? Разве кто-нибудь в состоянии ответить на эти вопросы? Мы можем лишь констатировать факты: а) если к телу приложена сила, то его движение будет подчиняться уравнению второго закона Ньютона; б) два заряда создают вокруг себя электрическое поле, которое описывается уравнениями Максвелла.

Иными словами, наука *в принципе* может ответить лишь на вопросы «что?» и «как?». Как устроен наш мир, какие законы им управляют, каков механизм тех или иных процессов, каковы их характерные времена и масштабы, какими уравнениями они описываются.

Физика изучает самые фундаментальные закономерности природы, самые простые ее составные части. Благодаря этой «простоте» физика (так же, как и химия, молекулярная биология и т. п.) имеет дело с воспроизводимыми ситуациями. Это означает, что мы можем повторить наши эксперименты, и если все условия в точности выполнены, то и результаты будут такими же. Подобное вряд ли возможно, например, в геологии, не говоря уже об общественных науках (экономике, истории и т. д.). Важно понимать также, что физический эксперимент никогда не бывает идеальным, любое измерение производится с определенной точностью. И когда мы говорим о том или ином законе природы, мы должны помнить, что этот закон был установлен в каких-то конкретных условиях и имеет, как правило, конкретные пределы применимости.

Строго говоря, природа не знает никаких законов — она просто существует. Законы природы придумывают люди, пытаясь описать наблюдаемые явления и предсказать поведение рассматриваемых систем в тех или иных условиях. Достоин удивления сам факт, что созданная людьми математика способна на такое. Хотя никто не может быть уверен, что используемый математический аппарат — это единственное средство познания окружающего мира. Вполне возможно, что маленькие зеленые человечки, проживающие в другой галактике, додумались до совершенно другой математики, которая столь же хорошо (а может, и еще лучше) способна описать те же природные явления. У нас же есть пример квантовой механики, в которой возможны разные эквивалентные формулировки, приводящие к одинаковым предсказаниям. А про интенсивно исследуемую сейчас теорию суперструн (М-теорию в десятимерном пространстве), претендующую на описание всех без исключения фундаментальных взаимодействий, включая квантовую гравитацию, один из ее создателей сказал, что это математика XXI века, случайно открытая в XX веке. Когда нынешние профессора были студентами, о такой математике они и не слышали.

Физические модели и теории предназначены для приведения в соответствие между собой тех сведений, которые мы получаем, исследуя явления природы. Ни

одна из теорий не может претендовать на звание истинной, она лишь дает наилучшее для данного времени описание той области, в которой она применяется. Мы называем теорию «хорошей», если она:

- исходит из небольшого числа фундаментальных положений;
- имеет достаточно общий характер (т. е. не создана для объяснения всего лишь одного или нескольких фактов);
- позволяет сделать ряд точных и четких предсказаний.

История науки показала, что, как правило, «хорошая» теория допускает возможность усовершенствования. Это не значит, что «хорошая» теория верна безусловно. Теория всегда может быть изменена (или же полностью отвергнута), если станут известны новые факты. Просто при более глубоком проникновении в суть вещей оказывается, что «хорошая» теория является частью более общей теории и имеет свою область применимости. Например, после открытия специальной теории относительности классическую механику Ньютона никто не отменял: в первом порядке по величине отношения  $v/c$  скорости объекта  $v$  к скорости света  $c$  результаты обеих теорий совпадают, но в членах второго порядка  $v^2/c^2$  уже проявляются различия.

Совершенно не исключено, что при усовершенствовании теории какие-то из вопросов «почему?» превратятся в вопросы «как?». **Почему** мы живем в трех пространственных измерениях и одном временном? Сейчас вряд ли кто сможет ответить на этот вопрос. Но, быть может, когда-нибудь мы поймем, **как** свернулись шесть измерений М-теории, оставив нам для проживания «всего лишь» четырехмерное пространство-время.

## 1.2 Единицы измерения

Результаты многочисленных опытных наблюдений обобщают в виде физических законов, которые представляют собой некоторые утверждения относительно связей между теми или иными физическими величинами. Для проверки на опыте этих утверждений необходимо независимыми способами измерить все те величины, которые связаны в данном физическом законе. Измерение любой физической величины проводится по отношению к определенному стандарту или *единице* этой величины. Эти единицы обязательно должны указываться вместе с численным значением результата. Метрическая система мер, созданная в эпоху Великой французской революции, по мысли ее авторов должна была служить «на все времена, для всех народов, для всех стран».

Из нескольких условно выбираемых основных единиц строятся производные единицы. Если, например, скорость определяется как отношение пройденного расстояния к затраченному времени, то единицей скорости будет отношение единицы длины к единице времени. Но можно было бы взять за основную единицу скорость и тогда выразить единицу расстояния как произведение скорости на время. Именно так и поступают, когда расстояния до звезд измеряют в световых годах (1 св. г. — расстояние, которое свет проходит за год). Можно использовать световые минуты и световые секунды. Так, среднее расстояние от Земли до Солнца равно 146,6 млн км, но с тем же успехом можно утверждать, что оно равно восьми с хвостиком световым минутам.

В Международной системе единиц (СИ — начальные буквы французского наименования *Système International*) в качестве основных выбраны следующие семь единиц:

- единица длины — м (метр) [L]
- единица времени — с (секунда) [T]
- единица массы — кг (килограмм) [M]
- единица электрического тока — А (ампер) [I]
- единица температуры — К (кельвин) [K]
- единица силы света — кд (кандела) [J]
- единица количества вещества — моль (моль) [ $\nu$ ]

В квадратных скобках указано общепринятое обозначение для размерностей: длину можно измерять в метрах, ярдах, мартышках или попугаях, но обозначение L (от англ. *length*) всегда подскажет нам, что мы имеем дело с длиной. Аналогично вводится обозначение размерности времени T (от англ. *time*).

Для простоты ученые стремятся выбрать минимальное число основных величин, которое позволяет дать полное описание физического мира. В выборе основных величин и их производных имеется некоторый произвол.

С двумя из этих единиц мы знакомимся уже с самого детства. Это естественно, так как все события происходят где-то и когда-то. Мы обитаем в пространстве, которое измеряем единицами длины. Мы живем во времени, и человечество научилось его измерять в глубокой древности. **Почему** наш мир существует во времени и в пространстве? Мы договорились таких вопросов не ставить, так как наука все равно на них не ответит. Но **каковы** свойства пространства и времени? — этот вопрос вполне закономерен. Изучая физические явления, мы узнаем свойства пространства и времени, и процесс этого познания еще далеко не завершен.

До недавнего времени международным эталоном метра считалось расстояние между двумя штрихами на стержне из платинового сплава, хранящемся в Международном бюро мер и весов в Париже. В последние годы эталон метра определялся числом длин световой волны конкретной (оранжевой) спектральной линии изотопа криптона  $^{86}_{36}\text{Kr}$ , соответствующей переходу электрона между квантовыми состояниями  $2p_{10}$  и  $5d_3$  (что это такое, мы узнаем в заключительных частях курса). Метр содержит 1 650 763,73 длины волны этой спектральной линии в вакууме. Вследствие возросших требований к точности эталона длины в 1983 г. было принято следующее определение метра: это расстояние, проходимое светом в вакууме за время  $t = 1/299\,792\,458$  секунд. Иными словами, постулировано, что скорость света **в точности** равна  $c = 2,997\,924\,58 \cdot 10^8$  м/с. В сущности это означает, что вместо длины в качестве фундаментальной единицы выбрана скорость, а длина стала производной единицей.

На рисунке 1.1 представлены пространственные расстояния, характерные для окружающего мира. Весь доступный нашим наблюдениям мир заключен в интервале от  $10^{26}$  м (радиус видимой части Вселенной) до  $10^{-18}$  м (расстояния, «прощупываемые» в современных экспериментах с элементарными частицами). Для удобства шкала расстояний  $r$  изображена в логарифмическом масштабе  $\lg(r/1\text{ м})$ . Это значит, что расстоянию 10 м на шкале соответствует число 1, а расстоянию 100 км = 100 000 м — число 5.

Если раньше время определяли по Солнцу, и секунда соответствовала  $1/86400$  средних солнечных суток, то теперь она равна продолжительности 9 192 631 770

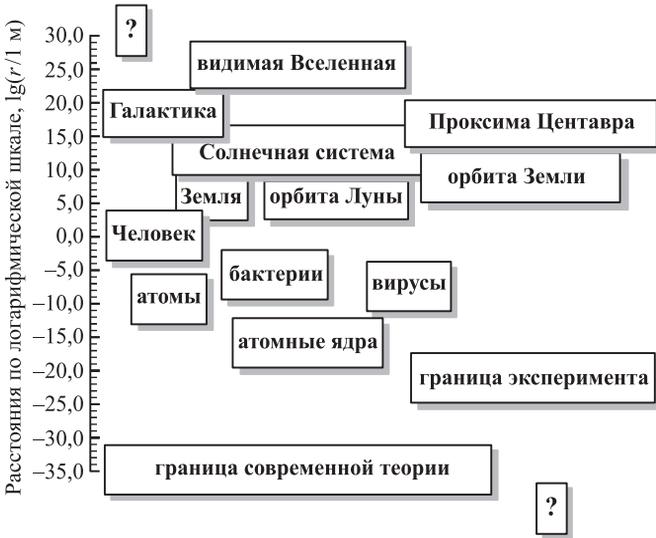


Рис. 1.1. Пространственные расстояния в природе

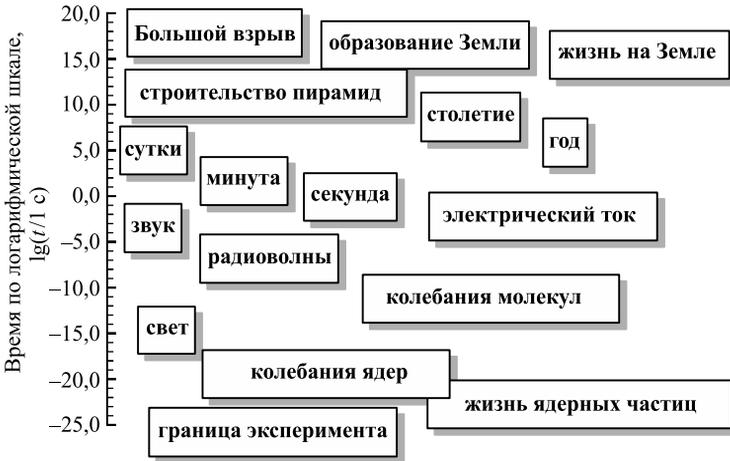


Рис. 1.2. Временные интервалы в природе

периодов колебаний световой волны, излученной при переходе между сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия  $^{133}_{55}\text{Cs}$ . Цезиевый стандарт очень точен: за 6000 лет двое цезиевых часов могут разойтись лишь на одну секунду. Существуют и более точные часы на водородном мазере: разница в секунду набегает здесь за 30 млн лет. Возможно, водородный мазер будет принят когда-нибудь в качестве нового эталона времени.

Некоторые временные интервалы, встречающиеся в природе, иллюстрирует рис. 1.2. Самое большое время, о котором мы можем получить какие-то све-

дения, — это время существования видимой части Вселенной. Она родилась в результате так называемого Большого взрыва примерно 14 млрд лет тому назад ( $4 \cdot 10^{17}$  с). Наименьшие времена ( $\sim 10^{-26}$  с), с которыми мы сталкиваемся, по порядку величины соответствуют времени, за которое свет проходит самые малые расстояния, доступные сейчас для изучения.

### 1.3 Анализ размерностей

Физические величины бывают размерными и безразмерными. Величина называется *размерной*, если ее численное значение зависит от выбора системы единиц. Так, промежуток времени между двумя последовательными восходами Солнца мы можем выразить как 1 сутки, или как 24 часа, или как 1440 минут, или 86 400 секунд. Числа меняются, но мы говорим о том же самом интервале времени. Величина называется *безразмерной*, если ее значение сохраняется неизменным при любом выборе системы единиц. Например, высота Эвереста ( $h = 8,848$  км) и средний радиус Земли ( $R = 6371,0$  км) — размерные величины, но их отношение уже величина безразмерная: независимо от системы единиц  $h/R = 0,0014$ .

Размерные величины можно умножать и делить друг на друга. Так, отношение пройденного расстояния ко времени в пути дает нам новую физическую величину (скорость), размерность которой  $[LT^{-1}]$  (м/с, км/ч и т. п.). При определении размерности величины обычно пользуются размерностями основных, а не производных величин. Складывать и вычитать можно только величины одинаковой размерности (нельзя сложить, например, сантиметры и граммы).

Любой физический закон не должен зависеть от выбранной нами системы единиц. Это естественно, так как закон природы описывает соотношение между величинами, которое существовало до нас, существует независимо от нас и будет существовать после нас. А система единиц — дело произвольного соглашения между людьми. Отсюда вытекает очень важное правило: **обе части любого равенства должны иметь одинаковые размерности**. Написав некое соотношение, мы всегда можем проверить его правильность анализом размерности. Таким путем выявляются многие студенческие ошибки. Более того, подбор размерностей зачастую позволяет угадать результат до проведения детальных вычислений.

Приведем пример. Автомобиль трогается с места и движется при этом равноускоренно с ускорением  $a$ . Какую скорость  $v$  приобретет автомобиль, пройдя путь  $s$ ? Применение анализа размерностей позволяет найти вид искомого соотношения. Скорость является функцией  $a$  и  $s$ . Это значит, что она выражается как произведение некоторых степеней этих величин:  $v = Ca^p s^q$ , где  $C$  — безразмерная постоянная. Надо определить показатели степени  $p$  и  $q$ . Запишем формулу размерности для этого соотношения:

$$\left[ \frac{L}{T} \right] = \left[ \frac{L}{T^2} \right]^p [L]^q \quad \text{или} \quad [LT^{-1}] = [L^{p+q} T^{-2p}].$$

В силу того что все семь основных единиц являются независимыми, для согласования размерностей обеих частей равенства необходимо, чтобы  $p$  и  $q$  удовлетворяли системе уравнений:  $1 = p + q$ ,  $-1 = -2p$ , откуда следует:  $p = 1/2$ ,  $q = 1/2$ . Таким образом, анализ размерностей приводит нас к формуле  $v = C\sqrt{as}$ .

Значение безразмерной постоянной  $C$  не может быть определено таким способом; при точном решении оно оказывается равным  $C = \sqrt{2}$ . Как правило, значения безразмерных постоянных в физике (факторы типа  $\sqrt{2}$ ,  $1/2$ ,  $\pi$  и т. п.) не слишком велики и не слишком малы. Поэтому анализ размерностей позволяет оценить масштабы тех или иных физических величин.

Применение анализа размерностей требует осторожности и определенного искусства. Здесь могут встретиться два подводных камня. Первый из них — определение физических величин, от которых может зависеть результат. Для этого требуется понимание, какие физические законы и явления важны для рассматриваемой системы. Вторым подводным камнем — существование в данной задаче величин, которые могут образовать безразмерное отношение.

Рассмотрим пример. Используя анализ размерностей, найти силу сопротивления  $F_r$  среды движущемуся телу. В этой задаче важно с самого начала определить, от каких величин может зависеть искомая сила. Что нам подсказывает опыт? Чем больше скорость  $v$  движения тела, тем больше сила сопротивления среды. Значит, сила  $F_r$  должна зависеть от скорости движения. Далее, тела с большим поперечным сечением испытывают большее сопротивление, чем с меньшим. Поэтому в ответ должна войти площадь  $S$  поперечного сечения тела. Наконец, сила  $F_r$  должна зависеть от параметра, характеризующего свойства среды. Здесь и таится первый подводный камень. Какую характеристику среды выбрать?

Представляется естественным в качестве такого параметра взять плотность (воздуха, жидкости)  $\rho$ : чем плотнее среда, тем большее влияние она оказывает на движение тела. Исходя из сказанного, мы ищем силу сопротивления в виде  $F_r = C v^p S^q \rho^r / 2$  (множитель  $1/2$  можно включить в  $C$ , но мы его выделяем по историческим причинам). Сила имеет размерность произведения массы на ускорение, т. е.  $[F] = [L T^{-2} M]$ . Условие совпадения размерностей обеих частей равенства имеет вид:

$$[L T^{-2} M] = [L T^{-1}]^p [L^2]^q [L^{-3} M]^r = [L^{p+2q-3r} T^{-p} M^r],$$

откуда следует система уравнений:

$$\begin{aligned} 1 &= p + 2q - 3r, \\ -2 &= -p, \\ 1 &= r. \end{aligned}$$

Легко убедиться, что ее решениями являются числа  $p = 2$ ,  $q = 1$ ,  $r = 1$ , откуда следует искомая формула:

$$F_r = C S \frac{\rho v^2}{2}. \quad (1.1)$$

Но почему мы выбрали плотность воздуха в качестве параметра, отвечающего за сопротивление среды? Почему бы в качестве такового не взять величину вязкости воздуха  $\eta$ , имеющую размерность  $[M L^{-1} T^{-1}]$ ? Позже мы еще познакомимся поближе с вязкостью, а пока достаточно интуитивного представления, что при той же плотности среда может быть более или менее вязкой (кисель и компот). Тогда искомая сила может быть представлена в виде  $F = C v^p S^q \eta^s$ . Напишем аналогичное условие равенства размерностей:

$$[L T^{-2} M] = [L T^{-1}]^p [L^2]^q [L^{-1} T^{-1} M]^s = [L^{p+2q-s} T^{-p-s} M^s],$$

откуда следует система уравнений:

$$\begin{aligned} 1 &= p + 2q - s, \\ -2 &= -p - s, \\ 1 &= s. \end{aligned}$$

Ее решением являются числа  $p = 1$ ,  $q = 1/2$ ,  $s = 1$ , т. е. искомая формула имеет вид:

$$F_r = C \eta \sqrt{S} v. \quad (1.2)$$

Формулы (1.1) и (1.2) совершенно различны: в одной из них сила зависит от скорости квадратично, в другой — линейно. Так какая же из них верна? Данный пример обнажил первый подводный камень: мы должны решить, какой из двух возможных процессов (лобовое сопротивление или вязкость среды) доминирует в конкретной рассматриваемой задаче.

Попробуем перехитрить уравнения, включив в анализ размерности и плотность среды, и ее вязкость:  $F_r = (C/2) v^p S^q \rho^r \eta^s$ . Соотношения размерностей принимают форму:

$$\begin{aligned} [\text{LT}^{-2}\text{M}] &= [\text{LT}^{-1}]^p [\text{L}^2]^q [\text{L}^{-3}\text{M}]^r [\text{L}^{-1}\text{T}^{-1}\text{M}]^s = \\ &= [\text{L}^{p+2q-3r-s} \text{T}^{-p-s} \text{M}^{r+s}], \end{aligned}$$

откуда получаем уравнения:

$$\begin{aligned} 1 &= p + 2q - 3r - s, \\ -2 &= -p - s, \\ 1 &= r + s. \end{aligned}$$

Сразу замечаем, что нас ожидает второй подводный камень: у нас всего три уравнения для определения четырех параметров. Стало быть, какой-то из них останется неизвестным. Попробуем разобраться, что бы это значило? Два последних уравнения позволяют выразить параметры  $p$  и  $r$  через  $s$ :

$$r = 1 - s, \quad p = 2 - s. \quad (1.3)$$

Подставляя их в первое уравнение, получаем

$$1 = -1 + s + 2q,$$

откуда находим

$$q = 1 - \frac{s}{2}. \quad (1.4)$$

Отсюда получаем силу сопротивления в виде:

$$F_r = \frac{C}{2} v^{2-s} S^{1-s/2} \rho^{1-s} \eta^s = C \frac{\rho S v^2}{2} \left( \frac{\sqrt{S} v \rho}{\eta} \right)^{-s}. \quad (1.5)$$

Произвольная степень комбинации в скобках указывает на то, что эта комбинация безразмерна. Раз так, она может быть включена в безразмерную величину

$C$ , которая в этом случае оказывается не постоянной величиной, а *неизвестной функцией безразмерного параметра*:

$$\begin{aligned} F_r &= C(\mathbf{Re}) S \frac{\rho v^2}{2}, \\ \mathbf{Re} &= \frac{\sqrt{S} v \rho}{\eta}. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Этот безразмерный параметр (число Рейнольдса  $\mathbf{Re}$ ) играет важную роль в определении характера силы сопротивления. Функция  $C(\mathbf{Re})$  называется коэффициентом сопротивления. Детали мы обсудим позднее, но, забегая вперед, сразу скажем: при малых скоростях воспроизводится выражение (1.2), а при больших — формула (1.1). Данный пример демонстрирует, как обращаться с безразмерными комбинациями, если таковые возникают при анализе размерности.

В заключение приведем **экзотический пример** — использование так называемой векторной размерности. Решим задачу о дальности  $l_0$  полета тела, брошенного под углом к горизонту со скоростью  $v_0$ . На полет тела оказывает влияние притяжение Земли, т. е. в ответ, помимо начальной скорости, должно войти ускорение свободного падения  $g$ . Проведем сначала обычный анализ размерностей: ищем искомую дальность полета в виде  $l_0 = C v^p g^q$ , откуда получаем уравнения

$$[\mathbf{L}] = [\mathbf{L}\mathbf{T}^{-1}]^p [\mathbf{L}\mathbf{T}^{-2}]^q = [\mathbf{L}^{p+q}\mathbf{T}^{-p-2q}].$$

Вытекающая отсюда система уравнений

$$\begin{aligned} 1 &= p + q, \\ 0 &= -p - 2q \end{aligned}$$

имеет очевидное решение  $p = 2, q = -1$ , т. е. дальность полета дается формулой

$$l_0 = C \frac{v_0^2}{g}. \quad (1.7)$$

Зависимость от угла вылета тела мы потеряли, так как она вошла в безразмерную константу  $C$ . Но в данной задаче можно принять во внимание, что мы вправе использовать разные единицы для дальности полета тела и высоты его подъема. Например, рисуя параболу, соответствующую полету снаряда, мы используем разные масштабы по осям  $x$  и  $y$ , чтобы график поместился на странице, так как обычно дальность полета снаряда намного превосходит высоту его подъема. В соответствии со сказанным, при анализе размерностей мы используем «горизонтальные»  $L_{\rightarrow}$  и «вертикальные»  $L_{\uparrow}$  единицы длины. Это значит, что размерности вертикальной и горизонтальной составляющих начальной скорости различны, и мы должны искать выражение для дальности полета в виде  $l_0 = C v_{0\uparrow}^{p_1} v_{0\rightarrow}^{p_2} g^q$ . Дальность полета выражается в «горизонтальных» метрах, а ускорение свободного падения — в «вертикальных» метрах на секунду в квадрате, так что уравнения размерности имеют вид:

$$[\mathbf{L}_{\rightarrow}] = [\mathbf{L}_{\uparrow}\mathbf{T}^{-1}]^{p_1} [\mathbf{L}_{\rightarrow}\mathbf{T}^{-1}]^{p_2} [\mathbf{L}_{\uparrow}\mathbf{T}^{-2}]^q = [\mathbf{L}_{\uparrow}^{p_1+q}\mathbf{L}_{\rightarrow}^{p_2}\mathbf{T}^{-p_1-p_2-2q}].$$

Отсюда следует система уравнений:

$$\begin{aligned} 1 &= p_2, \\ 0 &= p_1 + q, \\ 0 &= -p_1 - p_2 - 2q. \end{aligned}$$

# Оглавление

От издательства . . . . .	3
<b>Часть I Физические основы механики</b>	<b>5</b>
<b>Глава 1 Измерения физических величин</b>	<b>7</b>
1.1 О разнице вопросов «как?» и «почему?» . . . . .	7
1.2 Единицы измерения . . . . .	9
1.3 Анализ размерностей . . . . .	12
1.4 Система отсчета . . . . .	16
1.5 Алгебра векторов . . . . .	17
Контрольные вопросы . . . . .	21
<b>Глава 2 Кинематика материальной точки</b>	<b>23</b>
2.1 Абстракция в механике . . . . .	23
2.2 Перемещение . . . . .	24
2.3 Скорость . . . . .	26
2.4 Вычисление пройденного пути и перемещения . . . . .	28
2.5 Ускорение . . . . .	30
2.6 Ускорение при криволинейном движении . . . . .	31
2.7 Движение тела, брошенного под углом к горизонту . . . . .	34
2.8 Вращение абсолютно твердого тела . . . . .	40
Угловая скорость, угловое ускорение . . . . .	41
Связь угловых и линейных скоростей и ускорений . . . . .	43
Связь между векторами $\vec{v}$ и $\vec{\omega}$ . . . . .	44
Контрольные вопросы . . . . .	45
<b>Глава 3 Динамика материальной точки</b>	<b>47</b>
3.1 Принцип инерции Галилея и первый закон Ньютона . . . . .	47
3.2 Второй и третий законы Ньютона . . . . .	48
3.3 Механические силы . . . . .	54
Сила тяжести и вес . . . . .	54
Сила упругости . . . . .	55
Сила трения . . . . .	57
Сила сопротивления среды . . . . .	58

3.4	Движение тела, брошенного под углом к горизонту в среде с сопротивлением . . . . .	61
3.5	Закон сохранения импульса . . . . .	63
3.6	Центр масс . . . . .	65
3.7	Инерциальные системы отсчета и принцип относительности Галилея . . . . .	67
3.8	Уравнение Мещерского . . . . .	69
	Контрольные вопросы . . . . .	73
<b>Глава 4</b>	<b>Работа и энергия</b>	<b>75</b>
4.1	Работа силы . . . . .	75
4.2	Кинетическая энергия . . . . .	78
4.3	Мощность . . . . .	79
4.4	Потенциальная энергия . . . . .	81
	Векторный анализ: скалярное поле . . . . .	83
	Потенциальное поле сил . . . . .	85
	Консервативные силы . . . . .	86
	Постоянное однородное поле сил тяжести . . . . .	88
	Поле центральных сил . . . . .	89
4.5	Закон сохранения энергии . . . . .	90
4.6	Условия равновесия механической системы . . . . .	93
4.7	Примеры применения законов сохранения . . . . .	95
	Абсолютно неупругое столкновение двух шаров . . . . .	96
	Абсолютно упругое столкновение двух шаров . . . . .	97
	Абсолютно упругое отражение шара от движущейся стенки . . . . .	98
	Контрольные вопросы . . . . .	101
<b>Глава 5</b>	<b>Динамика твердого тела</b>	<b>103</b>
5.1	Закон сохранения момента импульса . . . . .	103
5.2	Динамика вращения вокруг неподвижной оси . . . . .	106
	Уравнение движения . . . . .	107
	Момент инерции . . . . .	109
	Теорема Штейнера . . . . .	111
5.3	Работа внешних сил при вращении твердого тела . . . . .	114
5.4	Плоское движение твердого тела . . . . .	115
5.5	О принципе работы колеса . . . . .	122
	Передвижение груза с помощью катка . . . . .	122
	Качественное рассмотрение работы колеса . . . . .	124
	Количественная теория колеса . . . . .	125
5.6	Гироскопы . . . . .	127
	Факты о гироскопах . . . . .	127
	Элементарная теория гироскопа . . . . .	128
	Гироскопический эффект и гироскопические силы . . . . .	131
	Контрольные вопросы . . . . .	135

<b>Глава 6</b>	<b>Закон всемирного тяготения</b>	<b>137</b>
6.1	Законы Кеплера . . . . .	137
6.2	Гравитационные силы . . . . .	139
6.3	Характерные астрономические масштабы . . . . .	139
6.4	Принцип эквивалентности масс . . . . .	142
6.5	Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия . . . . .	143
6.6	Космические скорости . . . . .	144
	«Темные звезды» Джона Мичелла . . . . .	146
6.7	Гравитационный маневр . . . . .	146
	Контрольные вопросы . . . . .	150
<b>Глава 7</b>	<b>Неинерциальные системы отсчета</b>	<b>151</b>
7.1	Силы инерции . . . . .	151
7.2	Силы инерции при ускоренном поступательном движении системы отсчета . . . . .	152
7.3	Центробежная сила инерции . . . . .	153
7.4	Сила Кориолиса . . . . .	155
	Контрольные вопросы . . . . .	158
<b>Глава 8</b>	<b>Элементы механики жидкостей и газов</b>	<b>159</b>
8.1	Закон Паскаля . . . . .	159
8.2	Закон Архимеда . . . . .	163
8.3	Уравнение непрерывности . . . . .	165
8.4	Уравнение Бернулли . . . . .	167
8.5	Движение тел в среде с сопротивлением . . . . .	170
	Уравнения движения . . . . .	170
	Число Рейнольдса . . . . .	171
	Коэффициент сопротивления . . . . .	173
	Контрольные вопросы . . . . .	175
<b>Глава 9</b>	<b>Элементы специальной теории относительности</b>	<b>177</b>
9.1	Анализ преобразований Галилея . . . . .	177
9.2	Опыт Майкельсона—Морли . . . . .	179
9.3	Преобразования Лоренца . . . . .	181
9.4	Постулаты Эйнштейна. Некоторые эффекты специальной теории относительности . . . . .	183
	Инвариантность интервала . . . . .	184
	Замедление времени . . . . .	185
	Сокращение длины . . . . .	186
	Одновременность и последовательность событий . . . . .	186
9.5	Пространство-время Минковского . . . . .	188
9.6	Сложение скоростей по Лоренцу . . . . .	191
9.7	Опыт Физо . . . . .	194
9.8	Явление аберрации . . . . .	195
9.9	Форма объектов, движущихся с релятивистскими скоростями . . . . .	197
9.10	Релятивистское выражение для импульса . . . . .	199

9.11	Релятивистское выражение для кинетической энергии . . . . .	202
9.12	Полная энергия тела . . . . .	203
9.13	Частицы с нулевой массой . . . . .	205
9.14	Релятивистская формула Циолковского . . . . .	206
9.15	Ускорители на встречных пучках . . . . .	209
	Контрольные вопросы . . . . .	212

## **Часть II Основы термодинамики и статистической физики 213**

### **Глава 10 Идеальный газ 215**

10.1	Состояние системы и эмпирическая температура . . . . .	215
	Общие положения молекулярно-кинетической теории . . . . .	215
	Состояние системы и нулевое начало термодинамики . . . . .	216
	Температура . . . . .	218
10.2	Уравнение Клапейрона—Менделеева . . . . .	220
10.3	Кинетическая теория идеальных газов . . . . .	224
10.4	Закон равнораспределения энергии . . . . .	227
10.5	Смеси газов . . . . .	229
	Контрольные вопросы . . . . .	231

### **Глава 11 Энергия и работа в термодинамике 233**

11.1	Первое начало термодинамики . . . . .	233
11.2	Работа идеального газа в различных процессах . . . . .	235
11.3	Теплоемкость системы . . . . .	237
11.4	Адиабатный процесс . . . . .	241
11.5	Уравнение Ван-дер-Ваальса для реальных газов . . . . .	243
	Контрольные вопросы . . . . .	253

### **Глава 12 Второе начало термодинамики и энтропия 255**

12.1	Циклы и КПД тепловых машин . . . . .	255
12.2	Цикл Карно . . . . .	257
12.3	Двигатель внутреннего сгорания . . . . .	261
12.4	Внутреннеобратимая тепловая машина . . . . .	263
12.5	Второе начало термодинамики . . . . .	265
12.6	Абсолютная термодинамическая температура . . . . .	268
12.7	Энтропия . . . . .	270
	Изменение энтропии в процессах с идеальным газом . . . . .	271
	Энтропия и цикл Карно . . . . .	273
	Возрастание энтропии . . . . .	275
12.8	Статистический смысл энтропии . . . . .	278
	Вывод формулы Больцмана Планком . . . . .	281
12.9	Термодинамические потенциалы . . . . .	283
	Энтальпия . . . . .	284
	Свободная энергия . . . . .	285
	Свободная энергия Гиббса . . . . .	286
	Эффект Джоуля—Томсона . . . . .	287

	Уравнение Клапейрона—Клаузиуса . . . . .	289
	Контрольные вопросы . . . . .	290
<b>Глава 13</b>	<b>Распределение молекул по скоростям и координатам</b>	<b>291</b>
13.1	О закономерностях в мире хаоса . . . . .	291
	Функция распределения . . . . .	292
	Элементы теории вероятностей . . . . .	293
	Распределение Пуассона . . . . .	296
13.2	Распределение молекул по скоростям . . . . .	300
	Функция распределения молекул по скоростям . . . . .	301
	Распределение Максвелла . . . . .	302
13.3	Характерные скорости молекул . . . . .	305
	Наиболее вероятная скорость . . . . .	305
	Распределение молекул по величинам безразмерной скорости . . . . .	306
	Средняя арифметическая скорость . . . . .	307
	Среднеквадратичная скорость . . . . .	308
	Эксперимент по проверке распределения Максвелла . . . . .	309
13.4	Распределение молекул по координатам . . . . .	310
	Барометрическая формула . . . . .	310
	Политропная модель атмосферы . . . . .	313
	Распределение Больцмана . . . . .	314
13.5	Распределение Максвелла—Больцмана . . . . .	316
	Распределение по энергиям для многоатомных молекул . . . . .	316
	Скорость химических реакций . . . . .	317
13.6	Адиабатный процесс в молекулярно-кинетической теории . . . . .	318
	Контрольные вопросы . . . . .	320
<b>Глава 14</b>	<b>Явления переноса</b>	<b>321</b>
14.1	Столкновения молекул . . . . .	321
	Свидание в лесу, ежик в тумане и атомная бомба . . . . .	326
14.2	Законы процессов переноса . . . . .	329
14.3	Кинетическая теория переноса . . . . .	334
	Диффузия . . . . .	334
	Теплопроводность . . . . .	336
	Вязкость . . . . .	337
14.4	Броуновское движение . . . . .	338
	Задача о блуждающем матросе . . . . .	338
	Броуновское движение и диффузия . . . . .	340
	Численные оценки для броуновского движения . . . . .	343
	Контрольные вопросы . . . . .	344
<b>Часть III</b>	<b>Основы классической теории электромагнетизма</b>	<b>345</b>
<b>Глава 15</b>	<b>Электрическое поле в вакууме</b>	<b>347</b>
15.1	Электрические свойства тел . . . . .	347
15.2	Закон Кулона . . . . .	349

15.3	Электрическое поле. Напряженность . . . . .	351
15.4	Принцип суперпозиции полей . . . . .	353
15.5	Силовые линии электрического поля . . . . .	354
15.6	Заряд в электрическом поле . . . . .	354
15.7	Поток вектора напряженности . . . . .	355
15.8	Теорема Остроградского—Гаусса . . . . .	357
15.9	Плотность заряда . . . . .	359
15.10	Применение теоремы Остроградского—Гаусса . . . . .	360
	Поле равномерно заряженной сферы . . . . .	360
	Поле бесконечно длинного заряженного цилиндра . . . . .	361
	Поле бесконечной заряженной плоскости . . . . .	362
	Поле плоского конденсатора . . . . .	362
15.11	Работа сил поля при перемещении заряда . . . . .	363
15.12	Потенциал электростатического поля . . . . .	364
15.13	Связь потенциала с напряженностью поля . . . . .	366
15.14	Примеры расчета потенциала . . . . .	367
	Потенциал равномерно заряженной сферы . . . . .	367
	Потенциал длинного заряженного цилиндра . . . . .	368
	Потенциалы заряженной плоскости и плоского конденсатора . . . . .	368
	Потенциал поля заряженного диска . . . . .	369
	Поле и потенциал шара, равномерно заряженного по объему . . . . .	370
15.15	Закон Кулона и размерность пространства . . . . .	372
	Контрольные вопросы . . . . .	373
<b>Глава 16</b>	<b>Проводники в электрическом поле</b> . . . . .	<b>375</b>
16.1	Свободные заряды в проводниках . . . . .	375
16.2	Электрическое поле заряженного проводника . . . . .	376
16.3	Проводники во внешнем электрическом поле . . . . .	379
16.4	Емкость уединенной проводящей сферы . . . . .	382
16.5	Конденсаторы . . . . .	383
16.6	Соединения конденсаторов . . . . .	385
16.7	Энергия системы зарядов . . . . .	388
16.8	Энергия заряженного проводника . . . . .	391
16.9	Энергия заряженного конденсатора . . . . .	392
16.10	Энергия электрического поля . . . . .	393
	Контрольные вопросы . . . . .	395
<b>Глава 17</b>	<b>Электрическое поле в диэлектриках</b> . . . . .	<b>397</b>
17.1	Диэлектрическая проницаемость . . . . .	397
17.2	Электрический диполь . . . . .	399
17.3	Поляризация диэлектриков . . . . .	403
	Электронная поляризация . . . . .	403
	Ориентационная (дипольная) поляризация . . . . .	405
	Поляризация жидких диэлектриков . . . . .	408
17.4	Вектор электрического смещения . . . . .	411
17.5	Электростатика однородных изотропных диэлектриков . . . . .	412

17.6	Условия на границе раздела двух диэлектриков . . . . .	415
	Контрольные вопросы . . . . .	417
<b>Глава 18</b>	<b>Постоянный электрический ток</b>	<b>419</b>
18.1	Сила тока и плотность тока в проводнике . . . . .	419
18.2	Закон сохранения заряда . . . . .	422
18.3	Сторонние силы . . . . .	423
18.4	Электродвижущая сила . . . . .	424
18.5	Закон Ома для однородного участка цепи . . . . .	424
18.6	Последовательное и параллельное соединение проводников . . . . .	427
18.7	Закон Ома для замкнутой цепи . . . . .	428
18.8	Зарядка и разрядка конденсатора . . . . .	429
18.9	Правила Кирхгофа . . . . .	431
18.10	Закон Джоуля—Ленца . . . . .	435
18.11	Классическая теория металлов . . . . .	436
	Закон Ома . . . . .	437
	Закон Джоуля—Ленца . . . . .	438
	Закон Видемана—Франца . . . . .	439
	Контрольные вопросы . . . . .	440
<b>Глава 19</b>	<b>Частицы в магнитном поле</b>	<b>441</b>
19.1	Магнитная индукция . . . . .	441
19.2	Сила Лоренца . . . . .	444
19.3	Движение заряда в однородном магнитном поле . . . . .	445
19.4	Некоторые применения магнитного поля . . . . .	447
	Циклотрон . . . . .	447
	Определение заряда и массы электрона . . . . .	449
	Масс-спектрометры . . . . .	451
19.5	Эффект Холла . . . . .	452
19.6	Закон Ампера . . . . .	453
19.7	Контур с током в магнитном поле . . . . .	455
	Контрольные вопросы . . . . .	457
<b>Глава 20</b>	<b>Магнитное поле в вакууме</b>	<b>459</b>
20.1	Магнитное поле движущегося заряда . . . . .	459
20.2	Закон Био—Савара—Лапласа . . . . .	460
20.3	Магнитное поле прямолинейного проводника с током . . . . .	461
20.4	Магнитное поле на оси кругового тока . . . . .	463
20.5	Магнитное поле соленоида . . . . .	465
20.6	Взаимодействие двух проводников с током . . . . .	467
20.7	Поток вектора магнитной индукции . . . . .	469
20.8	Вихревой характер магнитного поля. Закон полного тока . . . . .	470
20.9	Преобразования Лоренца для электромагнитного поля . . . . .	472
	Контрольные вопросы . . . . .	474

<b>Глава 21</b>	<b>Магнитное поле в веществе</b>	<b>477</b>
21.1	Магнетики . . . . .	477
21.2	Вектор намагничивания . . . . .	478
21.3	Напряженность магнитного поля . . . . .	480
21.4	Циркуляция вектора напряженности магнитного поля в ве- ществе . . . . .	480
21.5	Неоднородные магнетики . . . . .	481
21.6	Происхождение молекулярных токов . . . . .	483
21.7	Диамагнетики . . . . .	484
21.8	Парамагнетики . . . . .	488
21.9	Ферромагнетизм . . . . .	490
	Модель Вейсса . . . . .	491
	Обменная энергия . . . . .	496
	Домены и гистерезис . . . . .	498
	Контрольные вопросы . . . . .	502
<b>Глава 22</b>	<b>Электромагнитная индукция</b>	<b>503</b>
22.1	Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле	503
22.2	Электродвижущая сила индукции . . . . .	506
	Закон Фарадея . . . . .	506
	Потокосцепление . . . . .	510
	Заряд, протекающий в контуре при изменении магнитного по- тока . . . . .	511
	Правило Ленца . . . . .	512
22.3	Явление самоиндукции . . . . .	514
	Индуктивность . . . . .	514
	Индуктивность соленоида . . . . .	515
	Токи замыкания и размыкания . . . . .	516
22.4	Энергия магнитного поля . . . . .	518
22.5	Электромагнитная пушка — рельсотрон . . . . .	519
	Контрольные вопросы . . . . .	522
<b>Глава 23</b>	<b>Уравнения Максвелла</b>	<b>525</b>
23.1	Вихревое электрическое поле . . . . .	525
23.2	Ток смещения . . . . .	527
23.3	Векторные поля . . . . .	529
23.4	Уравнения Максвелла в дифференциальной форме . . . . .	532
	Контрольные вопросы . . . . .	534