1 Введение

Первые научные представления возникли очень давно – по-видимому, на самых ранних этапах истории человечества, отраженной в письменных источниках. Однако физика как наука в своем современном виде берет начало со времен Галилео Галилея (1564–1642). Действительно, Галилей и его последователь Исаак Ньютон (1643–1727) совершили революцию в научном познании. Физика, которая развивалась в течение трех столетий и достигла своей кульминации во второй половине 19 в. созданием электромагнитной теории света, называется теперь *классической физикой.* На рубеже 19 и 20 вв. казалось, что достигнуто полное понимание физического мира. Однако уже в самом начале 20 в. новые эксперименты и новые идеи в физике стали указывать на то, что некоторые аспекты классической физики неприменимы к крошечному миру атома, а также к объектам, движущимся с очень высокой скоростью. Следствием всего этого явилась очередная великая революция в физике, которая привела к рождению того, что мы называем теперь *современной физикой.*

1.1. Наука и творческая деятельность

Главная цель любой науки, в том числе и физики, рассматривается обычно как приведение в систему сложных явлений, регистрируемых нашими органами чувств, т. е. упорядочение того, что мы часто называем «окружающим нас миром». Многие представляют себе научное познание в виде механического процесса накопления фактов и «измышления» теорий. Однако в действительности это не так. Научное познание представляет собой творческую деятельность, которая во многом напоминает другие виды деятельности человека, традиционно считающиеся творческими.

Приведем несколько подтверждающих примеров. Одним из важных неотъемлемых признаков науки является *наблюдение* событий. Но любое наблюдение требует наличия воображения, поскольку ученый не может включить в описание все, что он наблюдает. Поэтому приходится решать, что из наблюдений действительно существенно.

Рассмотрим, например, как два великих мыслителя – Аристотель (384–322 до н. э.) и Галилей (1564–1642) – истолковывали движение по горизонтальной поверхности. Аристотель заметил, что находящееся на земле (или на поверхности стола) тело, получившее начальный толчок, всегда замедляется и останавливается. Отсюда Аристотель предположил, что естественным состоянием тела является покой. Галилей, повторивший в начале 1600 г. опыты Аристотеля по изучению горизонтального движения, обратился, по существу, к идеализированному случаю движения без сопротивления. В самом деле, Галилей мысленно представил себе, что если бы можно было устранить трение, то тело, получившее начальный толчок на горизонтальной поверхности, продолжало бы двигаться безостановочно в течение неопределенно долгого времени. Галилей сделал вывод о том, что для тела состояние движения столь же естественно, как и состояние покоя. Ему удалось увидеть в тех же самых «фактах» нечто новое, и именно поэтому принято считать Галилея основоположником современного представления о движении (более подробно об этом см. в гл. 2). Очевидно, что подобное «видение» могло возникнуть лишь вследствие тщательного обдумывания опыта.

Теории никогда не выводят непосредственно из наблюдений; напротив, их создают для объяснения полученных из опыта фактов в результате осмысления этих фактов разумом человека. Например, к атомистической теории, согласно которой вещество состоит из атомов, ученые пришли вовсе не потому, что кто-то реально наблюдал атомы[1]. Представление об этом было создано творческим разумом человека. Аналогичным образом возникли и такие фундаментальные теории, как специальная теория относительности, электромагнитная теория света и закон всемирного тяготения Ньютона.

Великие научные теории как творческие достижения можно сравнить с великими творениями литературы или искусства. Однако наука все же существенно отличается от других видов творческой деятельности; основное отличие состоит в том, что наука требует *проверки* своих понятий или теорий: ее предсказания должны подтверждаться экспериментом. Действительно, тщательная постановка эксперимента представляет собой важнейшую (если не решающую) часть всей физики.

Однако не следует все же считать, что научную теорию можно «доказать» посредством эксперимента. Прежде всего потому, что мы не располагаем идеальными измерительными инструментами (или приборами), т. е. аб-

---

[1] Заметим, что последние достижения в области электронной микроскопии, отмеченные Нобелевской премией по физике за 1986 г., позволили осуществить прямое визуальное наблюдение атомов.– *Прим. ред.*

солютно точное измерение вообще невозможно. Кроме того, нельзя проверить теорию во всех возможных конкретных условиях. Следовательно, ее нельзя проверить абсолютно точно[1]. Фактически сами теории, вообще говоря, не являются совершенными – теория редко согласуется точно (в пределах ошибки эксперимента) с результатами наблюдений в каждом отдельном случае, в котором ее проверяют. История науки свидетельствует о том, что созданные теории, отслужив свой срок, сдаются в архив, им на смену всегда приходят новые теории. Процесс смены научных теорий, который находится в центре внимания философии современной науки, мы можем обсудить здесь лишь очень кратко.

В некоторых случаях новая теория принимается учеными потому, что ее предсказания согласуются количественно с экспериментом значительно лучше, чем у прежней теории. Однако во многих случаях новую теорию признают только тогда, когда по сравнению с прежней теорией она позволяет объяснить более широкий *класс* явлений. Например, построенная Коперником теория Вселенной с центром на Солнце не описывала движение небесных тел более точно, чем построенная ранее Птолемеем теория Вселенной с центром на Земле. Однако в отличие от теории Птолемея теория Коперника содержала некоторые новые важные следствия; в частности, с ее помощью становилось возможным определение порядка расположения планет Солнечной системы и расстояний до них; были также предсказаны для Венеры фазы, аналогичные лунным. Более простая (во всяком случае, не более сложная) и более содержательная теория, которая объединяет и объясняет большее число явлений, всегда более полезна и привлекательна для ученого. Именно этот аспект, а также количественное согласие с экспериментом играют определяющую роль при принятии той или иной теории.

Весьма важным в любой теории является то, насколько точно она позволяет получить количественные данные; с этой точки зрения новая теория часто представляется лишь весьма незначительно отличающейся от старой. Например, специальная теория относительности Эйнштейна почти для всех обыденных ситуаций дает предсказания, которые крайне слабо отличаются от предшествующих теорий Галилея и Ньютона, но она приводит к более точным результатам в предельном случае очень высоких скоростей, близких к скорости света. С этой точки зрения теорию относительности можно было бы рассматривать всего лишь как малозначительное уточне-

---

[1] Некоторые философы науки подчеркивают в связи с этим, что проверка теории может быть использована лишь для ее *фальсификации*, а не для подтверждения и (или) для определения пределов ее применимости.

ние старой теории. Однако количественные предсказания – не единственный важный результат теории. Она может изменить также наше понимание физического мира. Например, под влиянием теории относительности Эйнштейна существенно изменились наши представления о пространстве и времени; более того, мы пришли к пониманию единства понятий массы и энергии (на основе знаменитого соотношения $E = mc^2$). Таким образом, теория относительности резко изменила наши взгляды на природу физического мира.

1.2. Модели, теории и законы

Пытаясь понять и объяснить определенный класс явлений, ученые часто прибегают к использованию **модели**. При этом под моделью понимают некоторый мысленный образ явления, опирающийся на уже известные понятия и позволяющий построить полезную аналогию. Примером здесь может служить волновая модель света. Световые волны нельзя наблюдать подобно тому, как мы видим волны на воде; однако полезно представить себе свет в виде волн, поскольку результаты опытов со светом указывают на его большое сходство с волнами на воде.

Цель построения модели состоит в том, чтобы получить мысленную или наглядную картину явления в тех случаях, когда мы лишены возможности непосредственного восприятия того, что происходит в этом явлении. Во многих случаях модель позволяет получить более глубокое понимание; так, аналогия с уже известными явлениями (например, с волнами на воде в упомянутом выше примере для света) может стимулировать проведение новых опытов и подсказать характер возможных родственных явлений.

Ни одна модель не может быть вполне безупречной, и ученые постоянно стремятся усовершенствовать свои модели или предложить новые, когда прежние модели перестают быть адекватными[1]. Атомная модель вещества претерпела много уточнений в ходе своего развития; так, с целью объяснения химической связи атомы представлялись как крохотные шарики, снабженные «крючками»; иногда использовалась и другая модель атомов в виде небольших бильярдных шариков, непрерывно соударяющихся друг с другом. Сравнительно недавно возникла так называемая планетарная модель атома, согласно которой электроны в атоме обращаются вокруг ядра подобно планетам, обращающимся вокруг Солнца.

Может возникнуть вопрос о том, чем отличается теория от модели, поскольку иногда эти термины используются как синонимы. Как правило, модель отно-

[1] То есть не могут объяснить новых опытов.– *Прим. ред.*

сительно проста и сохраняет структурное сходство с изучаемым явлением, тогда как **теория** значительно шире: она рассматривает явление более детально и с ее помощью пытаются решать ряд задач, подчас с весьма высокой математической точностью. Во многих случаях, после того как модель получила достаточное развитие в различных вариантах и стала более точно соответствовать эксперименту для широкого круга явлений, ее можно называть теорией. Примерами этого являются атомная теория вещества и волновая теория света.

Модели могут быть очень полезны, и они часто приводят к важным теориям; однако не следует смешивать понятие модели (или теории) с реальной системой или самими явлениями.

Законом ученые обычно называют некоторые краткие, но достаточно общие утверждения относительно характера явлений природы (таково, например, утверждение о том, что импульс сохраняется). Иногда подобное утверждение принимает форму определенного соотношения между величинами, описывающими явления; к таким утверждениям относится, например, закон всемирного тяготения Ньютона, согласно которому $F = Gm_1m_2/r^2$.

Для того чтобы иметь право называться законом, утверждение должно выдержать экспериментальную проверку в широком классе наблюдаемых явлений; можно сказать, что закон вносит объединяющее начало для многих наблюдений.

Заметим, что понятие закона в науке отличается от аналогичного понятия в политике или праве: юридические законы являются *предписывающими*, т.е. они диктуют нам, как мы должны себя вести, тогда как естественнонаучные законы являются описательными; они не утверждают, какими *должны* быть явления природы, а лишь описывают то, каков *действительный* характер того или иного явления природы. Так же как и теории, законы не могут быть проверены в бесконечном числе возможных частных случаев. Таким образом, мы не можем быть уверены в том, что любой закон абсолютно справедлив. Слово «закон» используется в тех случаях, когда его применимость проверена в широком классе явлений и у нас имеется четкое представление о том, каковы ограничения и область применимости данного закона. Но даже в этом случае при получении новой информации некоторые законы могут быть видоизменены или даже отброшены.

Как правило, ученые в своей практической деятельности считают, что общепринятые законы и теории верны; однако следует всегда помнить, что новые опыты могут привести к изменению пределов применимости любого закона и любой теории.

1.3. Измерение и его погрешность

Стремясь познать окружающий нас мир, ученые пытаются найти соотношения между физическими величинами.

Например, нас может интересовать, каким образом сила, действующая на тело, изменяет его скорость или ускорение, а также, насколько изменится давление газа, находящегося в замкнутом сосуде (например, внутри автомобильной шины), при повышении или понижении температуры. Обычно ученые стремятся выразить подобные взаимосвязи с помощью количественных соотношений между символами, обозначающими соответствующие величины. Для того чтобы определить (или проверить) вид подобных соотношений, необходимо провести тщательные экспериментальные измерения (хотя, разумеется, не следует преуменьшать и роли творческого воображения).

Интересно заметить, что экспериментальные измерения и поиски количественных соотношений между физическими величинами не всегда представляли собой главную цель физической науки. Такая цель была признана лишь в 18 в. Разумеется, при этом ученые руководствовались свободным выбором, поскольку в то время не было очевидно, что этот путь приведет к каким-либо глубоким и важным результатам.

В настоящее время точные измерения составляют важную часть физики. Однако ни одно измерение не является абсолютно точным, т. е. с каждым измерением неизбежно связана некоторая погрешность. Источники возникновения этой погрешности различны; к наиболее важным (если исключить грубые просчеты) относятся ограниченная точность любого измерительного инструмента, а также невозможность считывания со шкалы измерительного инструмента показаний, меньших определенной части минимальной цены деления. Например, если бы вам пришлось измерять ширину классной доски с помощью рулетки, результат измерения можно было бы считать вполне правильным с точностью до 0,1 см, что составляет цену деления рулетки (впрочем, при некоторых условиях можно было бы считать правильным и вдвое более высокую точность, а именно 0,05 см). Причина этого состоит в том, что наблюдателю затруднительно провести интерполяцию в пределах наименьшего деления шкалы, да и сама рулетка едва ли изготовлена с точностью, сколько-нибудь значительно превышающей указанную выше.

Представляя результат измерения, необходимо, следуя установившейся разумной традиции, указывать и точность этого измерения, т. е. оценку его **погрешности**, или **абсолютной ошибки**. Например, измеренную ширину доски следует записать так: $23{,}2 \pm 0{,}1$ см, где $\pm 0{,}1$ см (произносится как «плюс-минус 0,1 см») представляет собой погрешность измерения; это означает, что истинное значение ширины доски с наибольшей вероятностью лежит между 23,1 и 23,3 см. Точность измерения часто характеризуют величиной *относительной ошибки* (или погрешности), которая является отношением абсолютной ошибки и измеренного значения величины (умноженным на 100, если это отношение необходимо выразить в процентах). В приведенном выше примере, если при измерении мы получили значение 23,2 см, а абсолютная ошибка составляет около 0,1 см, относительная ошибка равна

$$\frac{0,1}{23,2} \cdot 100 = 0,4\%.$$

Во многих случаях погрешность измеренного значения явно не указывается; тогда принято считать, что она составляет примерно одну или две единицы в том разряде числа, в котором записана последняя цифра результата. Хотя такой способ менее точен, чем явное указание погрешности, во многих случаях этого вполне достаточно. Например, если измеренная длина равна 23,2 см, то погрешность предполагается равной примерно 0,1 см (или, возможно, 0,2 см). При этом существенно, чтобы результат измерения вы не записали как 23,20 см, поскольку это означало бы, что абсолютная погрешность составляет 0,01 см и, следовательно, истинное значение измеряемой величины лежит якобы между 23,19 и 23,21 см, тогда как в действительности, как мы видели, оно заключено между 23,1 и 23,3 см.

Число надежно установленных цифр в записи результата измерения называется **числом значащих цифр**. Так, в записи 23,21 см мы имеем четыре значащие цифры, а в записи 0,062 см – две.

В процессе измерений или в ходе вычислений не следует сохранять в окончательном ответе больше знаков, чем имеется значащих цифр[1]. Например, при вычислении площади прямоугольника с длинами сторон 11,3 и 6,8 см их перемножение дает 76,84 см^2; очевидно, однако, что точность этого результата в действительности не равна 0,01 см^2. Если, как это принято при оценке точности, рассмотреть наихудший случай, когда оба измерения одновременно принимают минимальные или максимальные значения (при заданной погрешности каждого измерения), то результат должен находиться между значениями $11,2 \cdot 6,7 = 75,04$ см^2 и $11,4 \cdot 6,9 = 78,66$ см^2. Таким образом, в лучшем случае мы можем принять в качестве ответа значение 77 см^2, т.е. считать, что погрешность равна 1–2 см^2. Две другие цифры в полученном числе 76,84 см^2 следует опустить, так как они не являются значащими. В качестве общего правила можно принять, что *окончательный результат умножения или деления*

[1] В наименее точно измеренной величине.– *Прим. ред.*

должен содержать лишь столько цифр, сколько их содержит число с минимальным количеством значащих цифр (из всех чисел, участвующих в вычислении). В нашем примере минимальное количество значащих цифр (две) имеет число 6,8 см; следовательно, результат 76,84 $см^2$ нужно округлить до 77 $см^2$. Поэтому, когда вы пользуетесь микрокалькулятором, необходимо помнить, что не все цифры, которые он дает, могут быть значащими; «лишние» цифры вообще не следует учитывать (и записывать в результат).

В физике обычно принято записывать число в виде «степеней десяти», т. е. с помощью показателей степени; например, вместо 36 900 пишут $3{,}69 \cdot 10^4$, а вместо 0,0021 записывают $2{,}1 \cdot 10^{-3}$. Одно из преимуществ такой записи состоит в том, что она позволяет четко и ясно указать число значащих цифр. Например, из записи 36 900 неясно, содержит ли это число три, четыре или пять значащих цифр. Если известно, что точность записи составляет три значащие цифры, то результат следует записать в виде $3{,}69 \cdot 10^4$, а если значащих цифр четыре, то в виде $3{,}690 \cdot 10^4$.

1.4. Единицы измерения, стандарты и система единиц СИ

Измерение любой физической величины проводится по отношению к определенному стандарту или единице этой величины, и эти единицы обязательно должны приводиться вместе с численным значением результата. Например, длины можно измерять в таких единицах, как дюймы, футы или мили в британской системе единиц, а также в сантиметрах, метрах или километрах в метрической системе единиц. Бессмысленно указать лишь, что длина данного объекта равна 18,6; при этом обязательно *нужно* написать и единицы измерения (очевидно, 18,6 м существенно отличаются от 18,6 дюйма или 18,6 мм).

Еще всего лишь около 200 лет назад единицы измерения не были стандартизованы, и это сильно затрудняло научное общение. В разных странах использовались различные единицы; даже длина фута была разной в различных местах.

Первым международным стандартом стало установление стандартного *метра* Французской академией наук в 1791 г.[1] Метр был определен как расстояние между двумя насечками, тонко нанесенными на специальный стержень

---

[1] В стремлении к рациональности эталон метра был выбран как одна стомиллионная доля расстояния от земного экватора до любого из географических полюсов. Современные измерения длины земного меридиана указывают на то, что принятый ранее эталон не совпадает с истинным метром (относительная точность расхождения составляет около 0,02%).

из платино-иридиевого сплава, хранящийся в Международном бюро мер и весов близ Парижа. Достаточно точные копии эталона стандартного метра были разосланы во многие лаборатории мира. В конце 19 в. благодаря работам американского физика А. Майкельсона (подробнее см. в разд. 36.9) удалось определить метр с помощью длины волны света. Последний по времени стандарт был принят в 1960 г.: метр (сокращенно м) определяется теперь как длина, равная 1 650 763,73 длины волны оранжевого цвета, излучаемого газом криптоном-86. Единицы длины в британской системе единиц (дюйм, фут, миля) также выражаются теперь через метры; так, дюйм равен в точности 2,54 сантиметра (см; 1 см = 0,01 м). Другие переводные коэффициенты можно найти в таблице на форзацах этой книги.

Стандартной единицей *времени* является *секунда* (с). В течение многих лет секунда определялась как 1/86400 средних солнечных суток. В настоящее время секунда определяется более точно – через колебания электронов внутри атома цезия. Собственно, секунда определяется как время, которое необходимо для совершения 9192631770 определенного типа колебаний электронов в атоме цезия; разумеется, как и ранее, в одной минуте (мин) содержится ровно 60 с, а в одном часе (ч) – 60 мин.

Определения других стандартных единиц измерений мы будем давать по мере того, как будем встречаться с ними в последующих главах.

В метрической системе более крупные и более мелкие по сравнению со стандартными единицы определяются в виде величин, кратных 10, что существенно облегчает вычисления. Так, один сантиметр – это 1/100 м, один километр (км) – 1000 м и т. п. Приставки санти-, кило- и т. п. перечислены в табл. 1.1 и могут применяться не только к единицам длины, но также к единицам объема, массы или других метрических единиц. Например, сантилитр (сл) – это 1/100 литра, а килограмм (кг) – 1000 граммов (г).

Таблица 1.1. Метрические (в системе СИ) приставки, множители

Приставка	Обозначение	Множитель
Тера	Т	10^{12}
Гига	Г	10^{9}
Мега	М	10^{6}
Кило	к	10^{3}
Гекто	г	10^{2}
Дека	да	10^{1}
Деци	д	10^{-1}
Санти	с	10^{-2}
Милли	м	10^{-3}
Микро	мк	10^{-6}
Нано	н	10^{-9}
Пико	п	10^{-12}
Фемто	ф	10^{-15}

Переводные коэффициенты между различными единицами в британской системе (например, 12 дюймов в 1 футе) весьма неудобны для вычислений. В этом состоит основная причина того, почему практически во всех странах (во всяком случае, при научных вычислениях) принята метрическая система единиц. В настоящее время США медленно переходят на метрическую систему, а Великобритания уже в значительной степени завершила этот переход.

Имея дело с физическими законами и выражающими их равенствами, очень важно использовать согласованный набор, или систему единиц. Приведем простой пример: допустим, вы хотите узнать, как далеко вы можете уехать на своем автомобиле за 40 мин при его скорости 90 км/ч. В следующей главе будет показано, что расстояние x можно выразить в виде $x = vt$, или произведения скорости

v на время t. Но если просто умножить 90 км/ч на 40 мин, то получится нелепый ответ. Если скорость v задана в километрах в час, то время t тоже должно быть выражено в часах. В нашем случае $t = 2/3$ ч; следовательно, $x = (90$ км/ч$)$ $(2/3$ ч$) = 60$ км. (Заметим, как в этом выражении сократились единицы времени (ч); знак равенства здесь относится не только к числовым значениям, но и к единицам измерения.) При работе с более сложными соотношениями необходимость использования согласованного набора единиц измерения становится еще более существенной.

В течение многих лет использовались различные системы единиц. В настоящее время основной системой единиц стала **Международная система единиц**, которая сокращенно называется СИ (система интернациональная). В системе СИ стандартными единицами длины, времени и массы являются соответственно метр, секунда и килограмм – система единиц механических величин, называемая МКС (метр, килограмм, секунда).

Другая метрическая система единиц – система СГС, в которой стандартными единицами длины, массы и времени являются соответственно сантиметр, грамм и секунда, на что указывает сокращенное название системы.

В Британской системе единиц стандартными единицами являются фут для длины, фунт силы для силы и секунда для времени.

В настоящее время в научных исследованиях и преподавании наиболее широко применяется система СИ. Поэтому в данной книге мы будем использовать преимущественно систему СИ, хотя иногда при введении различных величин будут указываться как их единицы измерения в системе СГС, так и переводные коэффициенты для перевода этих величин в систему СИ.

1.5. Основные и производные величины

Все физические величины могут быть разделены на два класса: **основные** и **производные величины**. Соответствующие им единицы измерения также называются *основными* и *производными единицами*. Для простоты ученые стремятся выбрать минимальное число основных величин, которое позволяет дать полное описание физического мира. Оказалось, что число таких величин равно семи; для системы СИ они приведены в табл. 1.2. Любые другие величины могут быть определены через эти семь основных величин[1]. В выборе основных величин и производных

[1] Единственными исключениями являются угол (единица измерения радиан; см. гл. 9) и телесный угол (стерадиан), для которых не было достигнуто соглашение о том, являются эти величины основными или производными.

Таблица 1.2. Основные величины системы СИ и единицы их измерения

Величина	Единица	Сокращенное обозначение
Длина	метр	м
Время	секунда	с
Масса	килограмм	кг
Сила тока	ампер	А
Температура	кельвин	К
Количество вещества	моль	моль
Сила света	кандела	кд

имеется некоторый произвол. Так, в Британской системе единиц сила рассматривается как основная величина, а масса – как производная, тогда как в системе СИ – наоборот.

Большинство величин определяется через основные величины; например, скорость определяется как отношение перемещения тела ко времени, за которое это перемещение произошло (см. гл. 2). Основные величины по определению не могут быть выражены через другие величины, именно поэтому они называются основными. Необходимо, однако, указать правило (или набор правил) измерения этих основных величин; такое определение называется *операционным* и может быть дано как для основных, так и для производных величин.

1.6. Размерности и анализ размерностей

Когда мы говорим о *размерности* величины, мы имеем в виду основные единицы или основные величины, с помощью которых можно построить данную величину. Размерность площади, например, всегда равна квадрату длины (сокращенно $[L^2]$; квадратные скобки здесь и далее обозначают размерность); единицами измерения площади могут быть квадратный метр, квадратный фут и т. п. Скорость же может измеряться в единицах км/ч, м/с и миль/ч, но размерность ее всегда равна размерности длины $[L]$, деленной на размерность времени $[T]$, т. е. мы имеем $[L/T]$. Формулы, описывающие величину, в разных случаях могут быть различны, но размерность сохраняется той же самой. Например, площадь треугольника с основанием b и высотой h равна $A = (1/2)\,bh$, а площадь круга радиусом r равна $A = \pi r^2$. Эти формулы отличаются друг от друга, но размерности в обоих случаях совпадают и равны $[L^2]$.

При определении размерности величины обычно пользуются размерностями основных, а не производных величин. Например, сила, как мы увидим ниже, имеет размерность массы $[M]$, умноженной на ускорение $[L/T^2]$, т.е. ее размерность равна $[ML/T^2]$.

Правило подбора размерностей может помочь при выводе различных соотношений; такая процедура называется **анализом размерностей**[1]. Один из полезных методов – это применение анализа размерностей для проверки *правильности* того или иного соотношения. В этом случае используются два простых правила. Во-первых, складывать или вычитать можно величины только одинаковой размерности (нельзя складывать сантиметры и граммы); во-вторых, величины, стоящие в обеих частях любого равенства, должны иметь одинаковые размерности.

Пусть, например, получено выражение $v = v_0 + (1/2)at^2$, где v – скорость тела по прошествии времени t, v_0 – начальная скорость тела, a – испытываемое им ускорение. Для проверки правильности этой формулы произведем анализ размерностей. Запишем равенство для размерности, учитывая, что скорость имеет размерность $[L/T]$, а ускорение, как мы увидим в гл. 2,– размерность $[L/T^2]$:

$$\left[\frac{L}{T}\right] \stackrel{?}{=} \left[\frac{L}{T}\right] + \left[\frac{L}{T^2}\right][T^2] \stackrel{?}{=} \left[\frac{L}{T}\right] + [L].$$

В этой формуле с размерностью не все в порядке; в правой части равенства стоит сумма величин, размерности которых не совпадают. Отсюда можно сделать вывод о том, что при выводе исходного выражения была допущена ошибка.

Совпадение размерности в обеих частях еще не доказывает правильности выражения в целом. Например, может быть неверным безразмерный числовой множитель вида 1/2 или 2π. Поэтому проверка размерности может указать только на ошибочность выражения, но не может служить доказательством его правильности.

Анализ размерностей можно также использовать как быструю проверку правильности соотношения, в котором вы не уверены. Предположим, вы не можете вспомнить выражение для периода T (времени, необходимого для совершения полного колебания) простого математического маятника длиной l: то ли эта формула выглядит как $T = 2\pi\sqrt{l/g}$, то ли $T = 2\pi\sqrt{g/l}$, где g – ускорение свободного падения, размерность которого, как и у любого ускорения, равна $[L/T^2]$. (Правильная формула для периода колебаний маятника будет получена в гл. 14; здесь нас

[1] Методы, описываемые в нескольких следующих разделах, приобретут больший смысл после того, как вы изучите последующие главы этой книги. Прочтение этого раздела дает общую точку зрения на рассматриваемую проблему; при необходимости к нему можно вернуться позже.

будет только интересовать, входят ли в нее величины l и g в виде отношения l/g или g/l.) Анализ размерностей показывает, что верна первая формула:

$$[T] = \sqrt{\frac{[L]}{[L/T^2]}} = \sqrt{[T^2]} = [T],$$

в то время как вторая ошибочна, поскольку

$$[T] \neq \sqrt{\frac{[L/T^2]}{[L]}} = \sqrt{\frac{1}{[T^2]}} = \frac{1}{[T]}.$$

Обратите внимание на то, что постоянный множитель 2π является безразмерным и не входит в окончательный результат.

Наконец, важное применение анализа размерностей (которое, впрочем, требует большой осторожности) – это нахождение *вида* искомого соотношения. Такая необходимость может возникнуть, если требуется определить лишь то, как одна величина зависит от других. Рассмотрим конкретный пример получения формулы для периода T колебаний математического маятника. Сначала определим, от каких величин может зависеть T. Период может зависеть от длины нити l, массы на конце маятника m, угла отклонения маятника θ и ускорения свободного падения g. Он может также зависеть от сопротивления воздуха (мы будем использовать здесь вязкость воздуха), силы гравитационного притяжения Луны и т. д. Однако повседневный опыт указывает на то, что сила притяжения к Земле значительно превышает все остальные силы, которыми поэтому мы пренебрежем. Предположим, что период T является функцией величин l, m, θ и g, причем каждая из этих величин возведена в некоторую степень:

$$T = Cl^w m^x \theta^y g^z;$$

здесь C – безразмерная постоянная; w, x, y и z – показатели степени, которые нужно определить. Запишем формулу размерности для этого соотношения:

$$[T] = [L]^w [M]^x [L/T^2]^z,$$

поскольку θ – безразмерная величина (угол определяется как отношение некоторых длин; см. разд. 9.1), которая вообще не входит в формулу размерности. После некоторых упрощений мы получаем

$$[T] = [L]^{w+z} [M]^x [T]^{-2z}.$$

В силу того что семь основных величин (табл. 1.2) являются независимыми, для согласования размерностей в обеих частях равенства необходимо положить

$$1 = -2z, \quad 0 = w + z, \quad 0 = x.$$

Решая эти уравнения, получаем $z = -1/2$, $w = 1/2$, $x = 0$.

Таким образом, искомое соотношение имеет вид

$$T = C\sqrt{l/g}\,f(\theta), \tag{1.1}$$

где $f(\theta)$ – некоторая функция угла θ, которую нельзя определить с помощью рассматриваемого нами метода. Этот метод не позволяет определить безразмерную постоянную C. Для того чтобы найти значение C (оно оказывается равным 2π) и вид функции f ($f \approx 1$ для малых θ), необходимо проделать такой анализ, как в гл. 14, основанный на законах Ньютона. Покажем теперь, чт́о нам *удалось* получить только с помощью анализа размерностей, т. е. согласования размерностей в левой и правой частях соотношения. Мы определили вид выражения, которое связывает период математического маятника с основными параметрами этой задачи, а именно с величинами l и g [см. выражение (14.13)].

Как нам это удалось? И сколь полезным является этот метод? По существу, с помощью физической интуиции мы определили, какие физические величины (параметры) в этой задаче существенны, а какие нет. Это не всегда легко сделать, и нередко приходится прилагать много усилий. Что же касается полезности, то конечный результат в нашем примере можно получить на основе законов Ньютона, как это сделано в гл. 14. Но во многих физических ситуациях бывает так, что с помощью законов нельзя получить сразу результаты. В этих случаях анализ размерностей может оказаться мощным средством.

В заключение заметим, что любое выражение, полученное из анализа размерностей (или другим подходящим способом) должно быть проверено экспериментально. Например, при выводе выражения (1.1) мы можем сравнить периоды колебаний двух маятников разной длины l_1 и l_2, у которых угол отклонения один и тот же. Используя формулу (1.1), можно написать

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{C\sqrt{l_1/g}\,f(\theta)}{C\sqrt{l_2/g}\,f(\theta)} = \sqrt{\frac{l_1}{l_2}}.$$

Так как C и $f(\theta)$ одинаковы для обоих маятников, они сократились; то, что отношение периодов колебаний маятников равно квадратному корню из отношений их длин, может быть проверено экспериментально. Сравнение с экспериментом проверит, хотя бы частично, наши вычисления; C и $f(\theta)$ могут быть определены с помощью дальнейших экспериментов.

1.7. Порядок величины; быстрая оценка

Иногда нас интересует только приближенное значение физической величины. Это бывает в случае, когда точные расчеты требуют затраты неоправданно большого времени или знания отсутствующих дополнительных данных. В других случаях требуется сделать грубую оценку порядка величины для проверки расчетов, выполненных на калькуляторе, чтобы убедиться в том, что при введении чисел не было сделано грубой ошибки. Кроме того, при расчетах на калькуляторе или на логарифмической линейке может быть потерян порядок величины (правильная степень числа 10), а грубая оценка помогает исправить это.

В общем случае грубая оценка проводится как округление всех чисел до одной значащей цифры, умноженной на 10 в некоторой степени, причем после проведения вычислений сохраняется также одна значащая цифра. Такая оценка называется оценкой по *порядку величины*, и можно считать, что она дает точность до множителя 10 (но обычно даже лучше). Часто выражение «порядок величины» используется для указания только степени числа 10.

В качестве примера найдем количество воды в некотором почти круглом озере диаметром около 1 км и средней глубиной 10 м. Чтобы найти объем, умножим среднюю глубину озера на площадь его поверхности (полагая, что озеро имеет форму цилиндра). Предположим, что озеро имеет радиус r, т.е. его площадь равна πr^2 или приближенно $3\cdot(5\cdot 10^2\ \text{м})^2 \approx 8\cdot 10^5\ \text{м}^2$, где мы положили $r = 500$ м, а π округлили до 3 (знак $\approx$ означает «приближенно равен»). Таким образом, объем озера приближенно равен $(8\cdot 10^5\ \text{м}^2)(10\ \text{м}) = 8\cdot 10^6\ \text{м}^3$, что по порядку величины составляет $10^7\ \text{м}^3$. Благодаря всем оценкам, которые делались при этом вычислении, лучше пользоваться оценкой по порядку величины (10^7), чем числом $8\cdot 10^6$.

Заключение[1]

Физике, как и другим наукам, присуще творческое начало; она не является простым набором фактов. Для того чтобы объяснить наблюдаемые явления, создаются важные теории. Эти теории «проверяют», сравнивая предсказываемые ими результаты с данными экспериментов, и только после этого они могут быть приняты или отвергнуты. Следует заметить, что в общем случае теория не может быть «доказана» в буквальном смысле этого слова.

Для понимания конкретного явления или определенной совокупности явлений ученые могут предложить *модель* – своего рода представление или аналогию, кото-

[1] Цель заключений, которые мы помещаем в конце каждой главы этой книги, дать краткий обзор основных идей, изложенных в главе. Разумеется, они не могут обеспечить полного представления о материале, которое можно получить лишь в процессе тщательного прочтения главы.

рая способна объяснить явление и, таким образом, облегчить его понимание. *Теория*, развитая на основе модели, во многих случаях оказывается более глубокой и более сложной по сравнению с простой моделью. Научный *закон* представляет собой четкое утверждение, нередко выраженное в виде формулы, которая дает количественное описание конкретной совокупности явлений для целого ряда случаев.

Решающую роль в физике играют измерения, но они никогда не могут быть абсолютно точными. Поэтому для любого числа, которое получается из измерения, должна быть указана *погрешность* этого измерения либо непосредственно с использованием знаков $\pm$, либо путем записи этого числа с сохранением только правильного количества *значащих цифр*.

Все величины выражаются через стандартную величину, или *единицу измерения*, причем в любом случае должны быть указаны соответствующие единицы измерения. В настоящее время обычно используется *Международная система единиц* (СИ), в которой стандартными единицами длины, массы и времени являются метр, килограмм и секунда. Существует семь независимых *основных величин*; все остальные величины называются *производными*, поскольку как они сами, так и их единицы измерения могут быть выражены через основные; например, скорость – это отношение расстояния ко времени.

Размерность какой-либо величины является комбинацией размерностей основных величин, из которых составлена данная величина (скорость, например, имеет размерность [длина/время], или $[L/T]$). Рассматривая лишь размерности различных величин, входящих в данное соотношение (этот метод называется *анализом размерностей*), можно проверить правильность того или иного соотношения, а в некоторых случаях найти и общий вид искомого соотношения.

Вопросы

1. Некоторые утверждают, что наука – это своего рода религия, со своими жрецами и таинствами, доступными лишь небольшому числу избранных – искушенных ученых. Согласны ли вы с этим мнением? Попробуйте порассуждать на эту тему.
2. Обсудите вопрос о том, в чем заключаются ограниченные возможности науки и в чем ее сила?
3. Обсудите различие между наукой и техникой.
4. Говорят, что во многих бедах общества виновна наука. Ученые могут возразить, что их работа имеет чисто интеллектуальный характер, а проблемы создает техника (которая представляет собой практическое применение научных результатов). Обсудите это.
5. С точки зрения так называемых операционалистов в науке имеют значение лишь те величины, которые могут быть описаны рядом операций (или процедур) для их определения. Какие достоинства и недостатки вы находите в этом утверждении?
6. Желательно, чтобы основные эталоны (в частности, длины и времени) были доступны (удобны для сравнения), постоянны (не изменялись), не разрушались и были воспроизводимы. Обсудите, почему это необходимо и может ли какой-то из этих критериев быть несовместимым с остальными.
7. В чем достоинства и недостатки использования ступни человека в качестве эталона?

Обсудите это с точки зрения требований, описанных в вопросе 6. Рассмотрите оба возможных случая: в качестве эталона выбирается а) ступня конкретного человека; б) ступня любого человека.

8. При езде по шоссе в горах можно встретить указатели высоты, на которых написано, скажем, «1220 м (4000 футов)». Критики метрической системы обвиняют ее в сложности, указывая на неудобные числа (1220 м). Как бы вы изменили указатели, чтобы они помогали переходу на метрическую систему?

9. Основные единицы системы СИ, приведенные в табл. 1.2, включают в себя одну величину, в названии которой содержится приставка (килограмм). Не будет ли удобным поменять ее на единицу, в названии которой приставка отсутствует? Как это может быть сделано? Как вы считаете, почему реально используется единица массы килограмм, а не грамм?

10. Предложите метод измерения а) толщины листа бумаги; б) расстояния от Земли до Солнца.

11. Можете ли вы предложить полный набор основных величин, аналогичный приведенному в табл. 1.2, который бы не содержал длины?

Задачи

[Задачи в конце каждой главы помечены римскими цифрами I, II и III в соответствии со степенью трудности, причем задачи, отмеченные цифрой I, являются наиболее простыми. Задачи помещаются по разделам, причем мы полагаем, что читатель проработал не только этот раздел, но и предыдущие, поскольку часто нельзя решить задачу, не изучив ранее изложенного материала.]

Раздел 1.3

1. (I) Чему приближенно равна относительная ошибка (в процентах) измерения, если была измерена величина 9,7 м?

2. (I) Чему равна относительная ошибка (в процентах) при измерении, результат которого записан в виде $3{,}86 \pm 0{,}17$ с?

3. (II) Чему равна площадь круга радиусом $6{,}7 \cdot 10^4$ см и какова точность ее измерения?

4. (II) Чему равна погрешность измерения объема сферы радиусом $r = 2{,}48 \pm 0{,}03$ м?

Раздел 1.4

5. (I) Назовите следующие величины, используя приставки из табл. 1.1: а) 10^6 вольт, б) 10^{-6} метров, в) $4 \cdot 10^7$ суток, г) $2 \cdot 10^3$ граммов, д) $2 \cdot 10^{-9}$ секунды.

6. (I) Определите свой рост в метрах.

7. (I) Определите переводный коэффициент между километрами и ангстремами.

8. (I) Луна удалена от Земли на 240 000 миль. Чему равно это расстояние в метрах? Выразите его, используя а) степени десяти; б) метрические приставки.

9. (I) Диаметр типичного атома равен примерно 1,0 Å. Чему равно это расстояние в метрах?

10. (I) а) Сколько секунд содержит год? б) Сколько в году наносекунд?

11. (II) *Световой год* (св. год) – это расстояние, которое свет, распространяющийся со скоростью $3{,}00 \cdot 10^8$ м/с, преодолевает за год. а) Чему равна протяженность 1,0 светового года в метрах? б) Астрономическая единица длины (а. е.) – это среднее расстояние между Землей и Солнцем, равное $1{,}50 \cdot 10^8$ км. Сколько астрономических единиц содержится в 1,0 св. годе? в) Чему равна скорость света в единицах а. е./ч?

12. (II) Поместите перед глазами отточенный карандаш так, чтобы кончик его грифеля заслонял от вас Луну; проведите соответствующие измерения для того, чтобы оценить диаметр Луны, если известно, что расстояние до нее от Земли составляет $3{,}8 \cdot 10^5$ км.

Раздел 1.6

13. (I) Укажите единицы измерения коэффициентов A и B из задачи 14 в системе СИ.

14. (I) Зависимость скорости v тела от времени t дается выражением $v = At^3 - Bt$. Каковы размерности коэффициентов A и B?

15. (III) Тело массой m колеблется на конце пружины с амплитудой x (следовательно, $2x$ – это полное расстояние в метрах, проходимое телом за один полный период колебаний). Используя анализ размерностей, определите возможный вид зависимости периода от величин m, x и коэффициента жесткости пружины k (последний определяется как отношение F/x, где F – сила, необходимая для растяжения пружины на длину x).

16. (II) Три студента получили различные выражения для зависимости пройденного расстояния x от времени t: а) $x = vt^2 + 2at$; б) $x = v_0 t + (1/2)at^2$; в) $x = v_0 t + 2at^2$. Здесь v – скорость, a – ускорение (в единицах м/с^2), а нижний индекс 0 указывает на значение величины в момент времени $t = 0$. Какие из этих трех выражений могли бы оказаться правильными с точки зрения анализа размерностей?

17. (III) Частица, имеющая массу m, обращается по окружности радиусом r со скоростью v; при этом у частицы имеется центростремительное ускорение a_c (м/с^2). С помощью анализа размерностей найдите выражение для a_c.