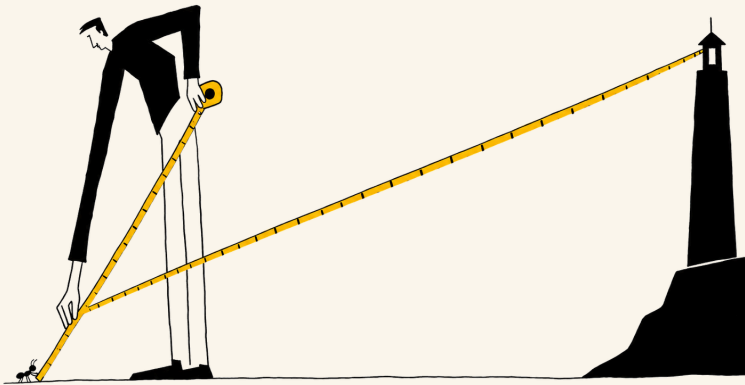


Физика для колледжа



Paul Peter Urone, Roger Hinrichs · 2022

Иллюстрированные аудиолекции

Lecturized

Физика для колледжа

Иллюстрированные аудиолекции

Paul Peter Urone, Roger Hinrichs · 2022

Пересказано в иллюстрированных лекциях Lecturized
lecturized.com

По оригиналу: College Physics 2e, OpenStax (CC BY 4.0 edition, osbooks-college-physics-bundle@f98d7a792138)

Содержание

Те же силы — там и здесь

Немного законов для тесного мира

Физика без диплома физика

Модели, теории и законы

Догадка, проверка, новая догадка

Старая физика, новая физика

Числам нужны единицы

Секунда, метр, килограмм

Степени десяти

От планктона до галактик и обратно к километрам

Доезжаем до дома

Близко к истине, близко друг к другу

Плюс-минус

Погрешность переходит дальше, а цифры говорят

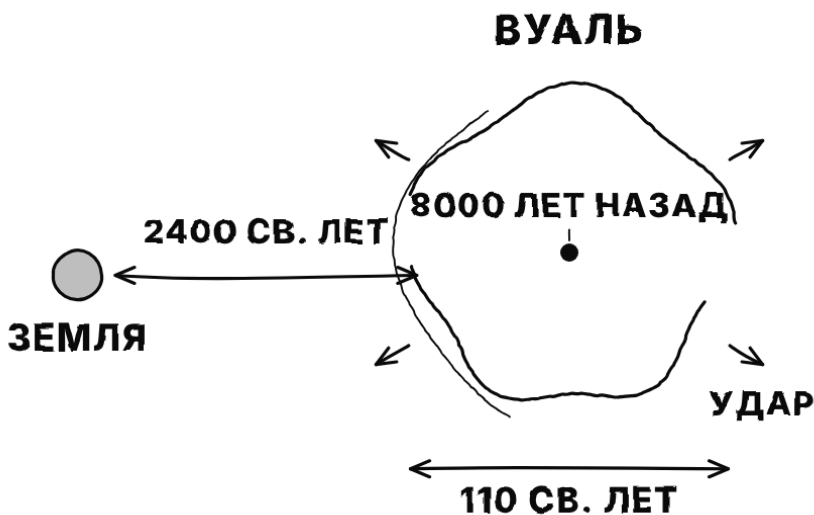
Нули и честные ответы

Три цифры и прикидка триллиона

Какой высоты триллион?

Те же силы — там и здесь

Сегодня, когда стемнеет, выйдите на улицу и минуту посмотрите вверх. Где-то в участке неба над созвездием Лебедя висит слабая рваная вуаль светящегося газа: глазом её не увидеть, а большой телескоп видит. Она называется туманностью Вуаль, и книга открывается её фотографией: тонкие скрученные жгуты и широкие полотнища света, красные, зелёные и синие, растянутые по темноте. Что сплело эти жгуты и почему это должно волновать того, кто не астроном? Ответ книги неожиданный: силы, придавшие форму этому облаку, — те же самые силы, что действуют у вас на кухне.

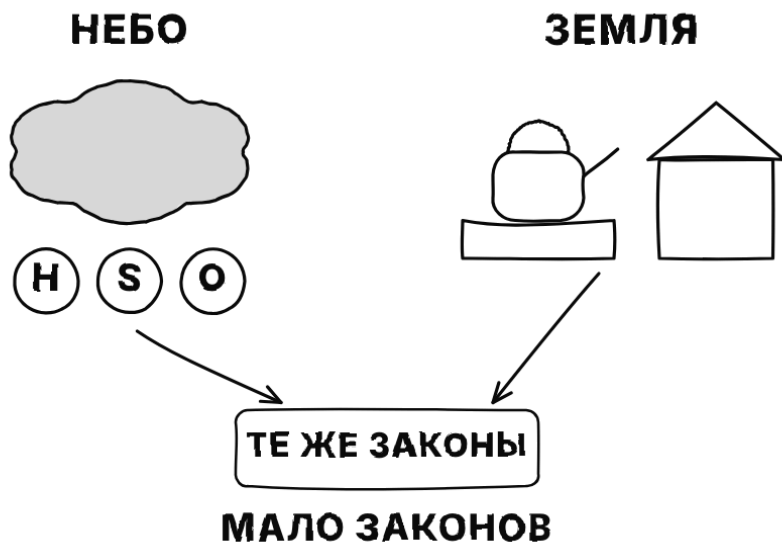


Рваное облако вдали

Вот что показывает снимок. Около восьми тысяч лет назад звезда, примерно в двадцать раз больше нашего Солнца, разлетелась на части во взрыве, который называют сверхновой. Взрыв погнал наружу ударную волну, и эта волна движется до сих пор: врезается в облака пыли и газа и нагревает их, пока они не начинают светиться. Весь светящийся остаток сейчас простирается больше чем на сто десять световых лет от края до края. Световой год звучит как время, но это расстояние: путь, который свет проходит за год, около девяти с половиной триллионов километров. Сама туманность находится от нас примерно в двух тысячах четырёхстах световых годах.

Как учёные узнают хоть что-то о том, что так далеко? Они следят, как оно меняется. Космический телескоп «Хаббл» подробно снял Вуаль в 1997 году, и новые снимки можно положить рядом со старыми. Сравнение показывает, насколько продвинулась ударная волна, как вытянулись волокна, а значит, как такие облака растут и расползаются. Это немного похоже на два снимка одной улицы на телефоне, сделанных с разницей в годы: что сдвинулось, то и рассказывает, что происходило в промежутке.

А теперь неожиданное. Цвета на снимке — не краска, добавленная для красоты. Это свечение водорода, серы, кислорода и похожих элементов — тех же элементов, из которых состоят воздух, которым вы дышите, и вода, которую вы пьёте. Газ там давит, нагревается и перемешивается по тем же правилам, что и газ здесь, на Земле, только в несравнимо большем масштабе. Собираются ли инженеры отправить ракету в космос или просто рассчитать отопление нового дома, они имеют дело с теми же силами, что разрывают Вуаль. Книга говорит прямо: силы там — те же, что и здесь, на Земле. Иначе говоря, нет одной физики для неба и другой для кухни; есть один свод правил, и он действует везде.

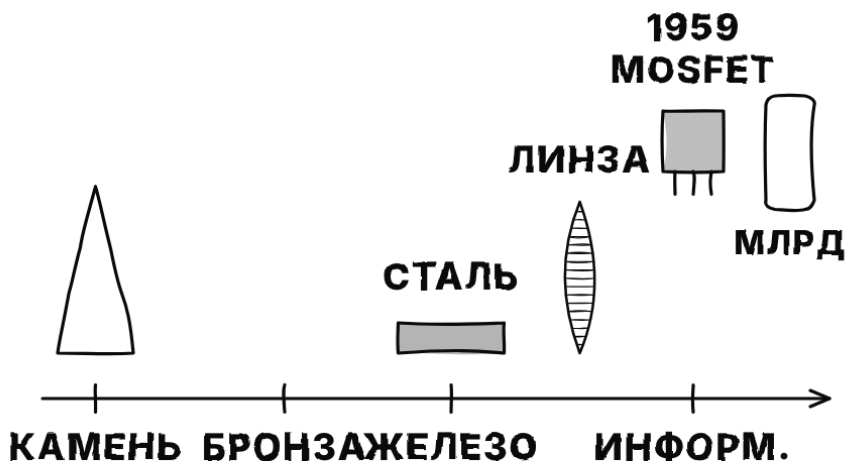


Один свод правил

Эта мысль — сердце всей главы. Подпись под фотографией добавляет удивительное: законов физики на удивление мало. За ослепительным разнообразием мира, от взрывающихся звёзд до кипящих чайников, похоже, скрывается глубинная простота.

Многие встречают физику с лёгким страхом. Им представляются трудные уравнения и формулы, которые зубрят к экзамену и потом забывают, и никакой пользы вне класса. Книга честно это признаёт, а потом утверждает обратное: физика играет в вашей жизни гораздо большую роль, чем кажется, чем бы вы ни зарабатывали на жизнь.

Вспомните долгую историю человеческих орудий. Мы называем целые эпохи по материалам: каменный век, бронзовый век, железный век. Каждую эпоху определяло то, что люди знали о физических свойствах какого-то материала и насколько умело его обрабатывали. Знание того, как раскалывается камень от удара, давало острый наконечник копья. Знание того, что происходит, когда в железо вводят углерод, в печах Южной Индии и Шри-Ланки дало миру самую раннюю высококачественную сталь. Умение шлифовать и полировать кусочки стекла и собирать их вместе дало нам линзы и приборы из них. Всё это, говорит книга, — физика, даже когда никто так её не называл.



Эпохи по материалам

Наш собственный век называют информационным, и он тоже держится на физическом изобретении. В 1959 году в лаборатории в Нью-Джерси двое учёных, уроженец Египта Мохамед Аталла и уроженец Кореи Давон Канг, построили крошечный переключатель — MOSFET, полевой транзистор со структурой «металл — оксид — полупроводник». Большинство людей о нём никогда не слышали, но таких переключателей сделано больше, чем любых других предметов за всю историю человечества. Миллиарды их сидят в телефоне у вас в кармане и, включаясь и выключаясь, запускают каждое приложение, и ещё больше — в микросхеме, которая управляет спидометром вашей машины. Они есть в компьютерах, микроволновках, медицинских приборах и почти в любом вашем электронном устройстве. Это хорошее напоминание: большие изобретения нашего времени родились у людей самого разного происхождения, работавших вместе.

Новости полны технологий, похожих на волшебство: поезда, парящие над рельсами, плащи, огибающие светом самих себя, крошечные роботы, охотящиеся на раковые клетки внутри тела. Каждая из них, обычная или поразительная, опирается на принципы физики. И физикой пользуются не только изобретатели. Инженеры, пилоты, врачи, физиотерапевты, электрики и программисты применяют её в повседневной работе. Пилот должен понимать, как ветер сносит самолёт с курса, а физиотерапевт — какие силы испытывают мышцы, когда тело сгибается и движется. Даже карта в телефоне, которая ведёт вас по городу, тихо занимается физикой: она определяет, где вы, по сигналам, приходящим со спутников высоко над головой.

Наконец, книга рассказывает, что ждёт впереди. Сначала — краткая история того, как люди пришли к внимательному изучению природы, от натурфилософов древнего Ближнего Востока и Средиземноморья до Исаака Ньютона и законов, носящих его имя. Затем — согласованные эталоны, которыми учёные измеряют вещи, чтобы все говорили на одном языке чисел и единиц. И наконец — честный взгляд на пределы измерения: насколько измерение близко к истине, насколько повторные измерения согласуются между собой и почему учёные так стараются ясно сказать, чего они знать не могут.

Запомним

Туманность Вуаль — светящийся остаток звезды, взорвавшейся около восьми тысяч лет назад, и её ударная волна всё ещё расходится. Силы, придающие ей форму, — те же, что действуют на Земле, в ракетах и в отоплении дома. Законов физики немного, и это намекает на глубокую простоту за разнообразием мира. Каждая эпоха человеческой техники, от каменных орудий до транзисторов в вашем телефоне, держалась на знании физических свойств материалов. Впереди — история физики, эталоны измерения и честные пределы того, насколько точно вообще можно что-то измерить.

Вопросы

1. Почему очертания туманности Вуаль всё время меняются, так что снимки 1997 года и сегодняшние различаются?
 - a. Потому что камеры телескопов стали лучше
 - b. Потому что ударная волна от взрыва всё ещё движется в газ и пыль
 - c. Потому что звезда снова и снова взрывается
 - d. Потому что Земля приблизилась к облаку
2. В лекции упоминается световой год. Что это за величина?
 - a. Время: длительность одного года
 - b. Скорость: как быстро движется свет
 - c. Расстояние: путь света за один год
 - d. Возраст: сколько лет звезде
3. Что следует из того, что силы в туманности Вуаль те же, что и на Земле?
 - a. Правила, изученные на Земле, для ракет или отопления дома, описывают и далёкое облако
 - b. Туманность должна быть гораздо ближе, чем кажется
 - c. Физика на Земле — лишь маленькая копия астрономии
 - d. Газы на Земле однажды засветятся, как туманность
4. Почему в лекции целые исторические эпохи названы по материалам — камню, бронзе, железу?
 - a. Потому что других материалов у людей не было
 - b. Потому что каждую эпоху определяло знание того, как ведёт себя материал и как его обрабатывать
 - c. Потому что эти материалы открыли физики

d. Потому что эпохи заканчивались, когда материалы кончались

Ответы

1. **b)** Ударная волна взрыва всё ещё мчится наружу, врезаясь в облака газа и пыли, поэтому сравнение снимков показывает, насколько она продвинулась.
2. **c)** Звучит как время, но это расстояние, около девяти с половиной триллионов километров.
3. **a)** Нет одной физики для неба и другой для кухни; один свод правил действует везде.
4. **b)** Каждую эпоху определяло то, что люди знали о физических свойствах материала и насколько умело его обрабатывали.

Разобранные примеры

Как далеко туманность Вуаль? Туманность Вуаль находится примерно в 2400 световых годах от нас, а один световой год — около 9,5 триллиона километров. Сколько это примерно километров?

Световой год — это расстояние, так что 2400 световых лет — это 2400 равных шагов, каждый длиной 9,5 триллиона километров.

Чтобы сложить равные шаги, умножаем: 2400 на 9,5 триллиона километров.

2400 умножить на 9,5 будет 22 800, значит, расстояние — около 22 800 триллионов километров.

Это около двадцати трёх тысяч триллионов километров — число слишком большое, чтобы его представить, поэтому астрономы предпочитают световые годы.

Ответ: около 22 800 триллионов километров

Задачи

1. Вся туманность Вуаль имеет поперечник около 110 световых лет. Сколько это примерно километров, если один световой год — 9,5 триллиона километров?

Подсказка: Каждый световой год — один равный шаг в 9,5 триллиона километров; посчитайте, сколько таких шагов.

Ответ: Около 1045 триллионов километров, примерно тысяча триллионов: 110 умножить на 9,5 триллиона километров.

2. Объясните своими словами, почему и пилоту, и физиотерапевту нужна физика, хотя их работы совсем не похожи.

Подсказка: Подумайте, с какими силами имеет дело каждый из них.

Ответ: Пилот должен понимать, как силы ветра сносят самолёт с курса, а физиотерапевт — какие силы испытывают мышцы, когда тело сгибается и движется. Оба имеют дело с силами, поэтому одна и та же физика служит обоим профессиям.

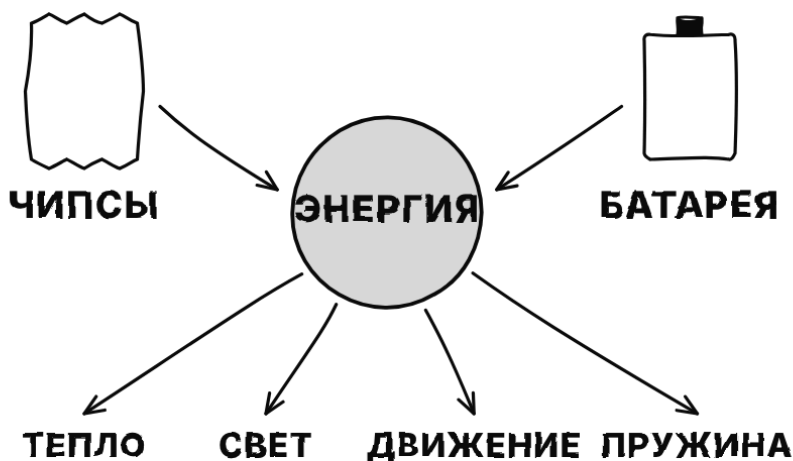
3. Большинство людей никогда не слышали о MOSFET, а лекция называет его основой современной электроники. Как может быть верно и то и другое?

Подсказка: Подумайте, где находится это устройство и сколько их.

Ответ: Это крошечный переключатель, спрятанный в телефонах, компьютерах, микроволновках и медицинских приборах, поэтому его никто не видит, но таких сделано больше, чем любых других предметов в истории, и почти каждое электронное устройство от них зависит.

Немного законов для тесного мира

Вот загадка: что общего у пачки чипсов и автомобильного аккумулятора? Одно вы едите, другое стоит под капотом машины, и кажется, что они из разных миров. Но книга отвечает, что в глубоком смысле это вещи одного рода. Оба хранят энергию, и эту энергию можно превратить в другие формы: чипсы — в тепло и движение вашего тела, аккумулятор — в искру, которая заводит двигатель.



Один закон, много форм энергии

Прежде чем понять, почему это важно, посмотрите, как тесен мир. Каждый день вы встречаете бесконечное разнообразие: птиц в полёте, цвета цветов, молнию, притяжение, из-за которого всё падает. За века люди пошли дальше: от мельчайших частиц внутри атомов, кварков, до огромных скоплений галактик, а дальше — к течению времени и вопросу о том, как возникла Вселенная. Обо всём этом мы накопили огромную груду фактов. И вот неожиданность, на которой настаивает книга: при всём этом обилии подробностей то, что мы видим, объясняет на удивление небольшой и единый набор законов. Мы ищем порядок, и природа, как говорит книга, оказывается «на редкость сговорчивой».

Чипсы и аккумулятор показывают, как это работает. Один закон, закон сохранения энергии, гласит, что энергия может менять форму, но никогда не теряется. Это одно предложение связывает калории в еде, аккумуляторы, тепло, свет и даже свёрнутую пружину внутри старых заводных часов. Когда вы его знаете, это уже не пять отдельных тем для зубрёжки, а пять граней одной идеи. Иначе говоря, хороший закон — это ключ, который открывает сразу много дверей, и не нужно носить отдельный ключ для каждой. Именно это, говорит книга, делает физику приятной для изучения: понимание вместо списков.

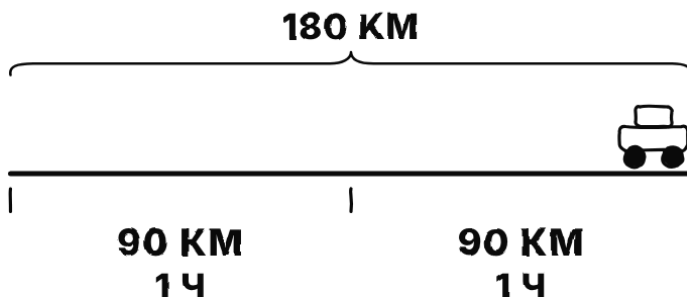
Так что же такое физика? Наука в целом состоит из теорий и законов, которые высказывают общие истины о природе, вместе со всем знанием, что в них заключено. Физика — её часть, описывающая, как энергия, вещество, пространство и время действуют друг на друга, и она всегда спрашивает, какой основной механизм лежит под явлением. Её охват широк: от движения крошечных заряженных частиц до движения людей,

машин и космических кораблей. Почти всё вокруг вас можно довольно точно описать её законами.

Возьмите смартфон у вас в руке. Внутри телефона электричество течёт по лабиринту крошечных цепей, и физика точно описывает, как оно по ним движется. Инженеры используют это знание, чтобы выбрать подходящие материалы и разложить цепи, когда строят телефон.

Теперь откройте на этом телефоне карту. Система навигации, GPS, опирается на одну из простейших связей в физике: связь между скоростью, расстоянием и временем. Словами: пройденное расстояние равно скорости, умноженной на время, в течение которого вы её держите. Откуда это берётся? Если вы каждый час едете с одной и той же скоростью, каждый час добавляет одинаковый отрезок дороги, и отрезки просто складываются, час за часом. Пусть спидометр вашей машины два часа держится на девяноста километрах в час; это девяносто плюс девяносто, то есть сто восемьдесят километров. Та же связь работает и в обратную сторону: сто восемьдесят километров при девяноста километрах в час — это два часа; так карта и оценивает время в пути.

$$d = v t$$



Путь равен скорости, умноженной на время

Конечно, настоящая навигация гораздо сложнее. Ей нужно учитывать форму местности, точные расстояния до спутников, кружащих высоко над Землёй, и даже странный эффект — замедление времени, при котором часы, движущиеся быстро или находящиеся в другом поле тяготения, идут немного по-разному. Большинство этих расчётов опирается на методы Глэдис Уэст, математика и специалиста по вычислительной технике, которая программировала первые компьютеры, способные издалека с большой точностью определять положение мест на Земле. Каждый раз, когда телефон показывает синюю точку там, где вы находитесь, он пользуется её методами, чтобы вычислить ваше положение и то, как оно соотносится со всем вокруг.

Книга завершает это вступление рассказом о том, что получит читатель. Конечно, вы изучите основные темы физики. Но важнее другое: вы научитесь способам рассуждения, которые позволяют применять эти немногие законы далеко за пределами того, что может охватить любая отдельная книга. Эти привычки внимательно думать, утверждает книга, помогают не только на экзаменах, но и в любой профессии, которую вы выберете.

Запомним

Мир полон разных явлений, но их объясняет небольшой и единый набор законов. Закон сохранения энергии говорит, что энергия меняет форму, но не теряется, поэтому еда, аккумуляторы, тепло, свет и пружины подчиняются одному правилу. Физика описывает, как энергия, вещество, пространство и время действуют друг на друга, и ищет основной механизм под явлением. И цепи вашего телефона, и его навигация работают на физике; расстояние равно скорости, умноженной на время, поэтому за два часа при девяноста километрах в час проходится сто восемьдесят километров. Хорошо выучить немного законов и научиться их применять ценнее, чем зубрить длинные списки фактов.

Вопросы

1. Почему пачка чипсов и автомобильный аккумулятор — примеры одного и того же закона?

- a. Оба сделаны на заводах
 - b. Оба хранят энергию, которая может переходить в другие формы, нисколько не теряясь
 - c. Оба расходуются полностью и ничего не оставляют
 - d. Оба содержат электричество
2. Чем полезно знать такой широкий закон, как закон сохранения энергии?
- a. Больше ничего не нужно измерять
 - b. Он заменяет опыты
 - c. Он связывает много с виду отдельных тем, и вы понимаете, а не зубрите списки
 - d. Он объясняет только еду и аккумуляторы
3. Машина едет с постоянной скоростью. Что будет с расстоянием, если она продержит эту скорость вдвое дольше?
- a. Оно удвоится
 - b. Оно не изменится
 - c. Оно уменьшится вдвое
 - d. Оно вырастет в четыре раза
4. Что, по словам лекции, должна учитывать настоящая спутниковая навигация?
- a. Только скорость машины
 - b. Цвет спутников
 - c. Погоду в этот день
 - d. Форму местности, расстояния до спутников и замедление времени

Ответы

1. **b)** Оба хранят энергию, которая переходит в другие формы, а закон сохранения энергии говорит, что энергия меняет форму, но никогда не теряется.
2. **c)** Один закон связывает калории в еде, аккумуляторы, тепло, свет и пружины, и они становятся гранями одной идеи.
3. **a)** Каждый час при той же скорости добавляет одинаковый отрезок дороги, поэтому вдвое большее время даёт вдвое большее расстояние.
4. **d)** Настоящая навигация должна учитывать форму местности, точные расстояния до спутников и даже замедление времени.

Разобранные примеры

Время в пути по расстоянию и скорости Маршрут длиной 180 километров, вы едете с постоянной скоростью 90 километров в час. Сколько времени займёт поездка?

Расстояние равно скорости, умноженной на время, значит, время равно расстоянию, делённому на скорость.

Каждый час покрывает 90 километров, поэтому спрашиваем, сколько отрезков по 90 километров уместится в 180 километрах.

180, делённое на 90, — это 2.

Ответ: 2 часа

Задачи

1. Спидометр три часа показывает 60 километров в час. Какое расстояние вы проедете?

Подсказка: Каждый час добавляет одинаковый отрезок дороги; сложите три таких отрезка.

Ответ: 180 километров: расстояние равно скорости, умноженной на время, 60 на 3.

2. Поездка в 240 километров занимает 3 часа при постоянной скорости. Какова скорость?

Подсказка: Разделите расстояние поровну между часами.

Ответ: 80 километров в час: скорость равна расстоянию, делённому на время, 240 на 3.

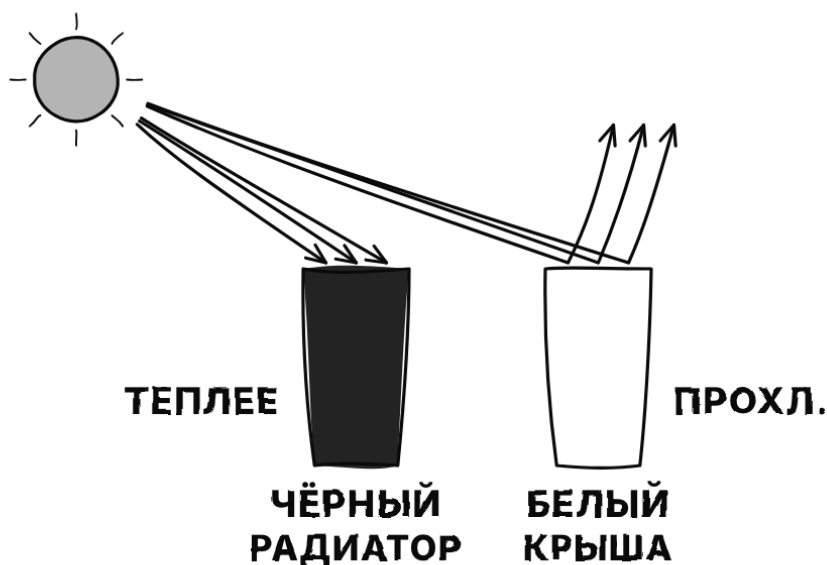
3. Своими словами объясните, что такое физика и чем она отличается от простого собирания фактов.

Подсказка: Подумайте об энергии, веществе, пространстве и времени и о механизмах.

Ответ: Физика описывает, как энергия, вещество, пространство и время действуют друг на друга, и ищет основной механизм под каждым явлением. Вместо того чтобы копить факты, она находит немного законов, которые объясняют многие из них сразу.

Физика без диплома физика

Почему на наклейке микроволновки предупреждают никогда не класть внутрь металлическую ложку? И почему в жарких странах у домов так часто белые крыши? Чтобы задать такие вопросы, не нужно быть учёным, и книга утверждает, что для ответа на них — тоже. Физика, говорит она, полезна в повседневной жизни и в профессиях, которые не имеют никакого отношения к науке.



Чёрное поглощает, белое отражает

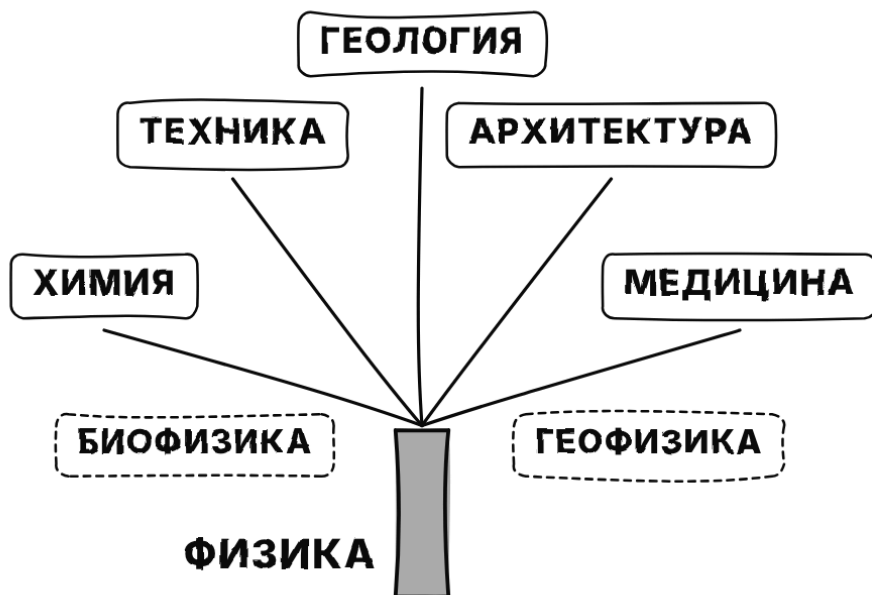
Опыт

В солнечный день налейте из одного крана два одинаковых стакана воды. Оберните один чёрной бумагой, а другой белой и оставьте оба на солнце на час. Потом окуните палец в каждый. Вода в чёрном стакане заметно теплее. Тёмная поверхность поглощает больше падающего на неё солнечного света, а белая больше его отражает.

Этот маленький опыт объясняет сразу два примера из книги. Белая крыша сохраняет дом внутри прохладнее, потому что отражает большую часть солнечного света. Чёрный радиатор автомобильного двигателя помогает двигателю избавляться от тепла, потому что тёмная поверхность хорошо не только поглощает тепло, но и излучает его. Одна и та же физика, работающая в противоположные стороны, служит двум совсем разным целям.

Книга перечисляет и другие такие житейские загадки. Физика объясняет, как микроволновка нагревает еду, почему металлу в ней не место и почему такие печи могут мешать работе кардиостимулятора. Она помогает понять опасности излучения и оценивать их спокойно, а не со страхом. Она объясняет, как система зажигания машины даёт искру и как электрические сигналы бегут по нервам вашего собственного тела. Даже прочитать дозировку на коробке с лекарством и правильно её отмерить — значит опереться на физику точного измерения, к которой эта глава ещё придёт.

Физика лежит и в основе целых других областей. Химия занимается тем, как взаимодействуют атомы и молекулы, поэтому она уходит корнями в физику атомов и молекул. Большинство отраслей техники, по словам книги, — это прикладная физика. В архитектуре физика решает, устоит ли здание, и определяет звук, отопление, освещение и охлаждение внутри него. Отдельные разделы геологии тоже сильно опираются на неё: определение возраста горных пород по их естественной радиоактивности, анализ землетрясений и изучение того, как тепло движется сквозь Землю. Некоторые области — просто гибриды, например биофизика и геофизика.



Физика под другими науками

Сама жизнь полна физики. В самом малом масштабе она помогает описать стенки растительных клеток и тонкие мембраны вокруг клеток животных, где происходят такие базовые вещи, как возбуждение нерва. В масштабе целого человека она объясняет тепло, которое отдаёт наше тело, а также работу и мощность наших мышц. В медицине она даёт нам рентген, томографы, которые называют МРТ, и ультразвуковое измерение кровотока; а некоторые методы лечения используют её напрямую, как лучевая терапия рака — излучение, достаточно сильное, чтобы выбивать электроны из атомов; его называют ионизирующим. Подпись в книге отмечает неожиданное родство: и микроволновка, и аппарат МРТ используют электромагнитные волны, одна — чтобы греть еду, другой — чтобы получить снимок мозга, достаточно точный, чтобы найти опухоль. Физика объясняет даже наши чувства: как инструменты создают музыку, как глаз видит цвет и как лазеры передают информацию.

Значит ли это, что нужно изучить каждое из этих применений? Нет, отвечает книга, и это, пожалуй, её самая полезная мысль. Важнее всего знать основные законы и уметь их применять; с этим применения приходят сами. Изучение физики к тому же оттачивает умение решать задачи, а поскольку физика хранит самые основы науки, ею пользуются все остальные науки, и, изучив физику, вам будет легче и в них. Иначе говоря: хорошо изучите корни — и по ветвям станет легко взбираться.

Запомним

Чтобы пользоваться физикой, не нужно быть учёным: она объясняет микроволновки, белые крыши, автомобильные радиаторы и нервы в вашем теле. Тёмные поверхности хорошо поглощают и излучают тепло, а белые отражают солнечный свет; этот один факт объясняет и радиатор, и прохладную крышу. Химия, техника, архитектура и геология стоят на физике, а такие области, как биофизика и геофизика, соединяют её с другими науками. В живых существах и в медицине, от клеточных мембран до снимков МРТ и лучевой терапии, работает физика. Важнее всего не заучивать применения, а знать основные законы и уметь их применять.

Вопросы

1. Почему в опыте с двумя стаканами вода в стакане, обёрнутом чёрной бумагой, нагревается сильнее?
 - a. Потому что чёрная бумага толще
 - b. Потому что тёмная поверхность поглощает больше падающего на неё солнечного света
 - c. Потому что белая бумага охлаждает воду
 - d. Потому что чёрная бумага сама выделяет тепло
2. Почему автомобильный радиатор чёрный, а крыши в жарких странах белые?

- a. И то и другое — только ради внешнего вида
 - b. Чёрная краска дешевле
 - c. Радиатор должен отдавать тепло, а тёмная поверхность хорошо его излучает; крыша должна отражать солнечный свет, а белая поверхность хорошо его отражает
 - d. Белые крыши поглощают больше тепла, чем чёрные радиаторы
3. Почему говорят, что химия уходит корнями в физику?
- a. Потому что она изучает, как взаимодействуют атомы и молекулы, а это физика атомов и молекул
 - b. Потому что химики пользуются микроволновками
 - c. Потому что химия — раздел техники
 - d. Потому что химию открыли физики
4. Что, по словам книги, важнее всего при изучении физики?
- a. Изучить каждое применение по очереди
 - b. Заучить названия областей вроде биофизики
 - c. Сначала выучить медицинские применения
 - d. Знать основные законы и уметь их применять

Ответы

1. **b)** Тёмная поверхность поглощает больше падающего на неё солнечного света, а белая больше его отражает.
2. **c)** Одна и та же физика работает в противоположные стороны: тёмные поверхности хорошо излучают тепло, белые отражают солнечный свет.

3. а) Химия изучает, как взаимодействуют атомы и молекулы, поэтому она стоит на физике атомов и молекул.

4. d) Не нужно изучать каждое применение; важны основные законы и умение их применять.

Задачи

1. Друг выбирает цвет садового сарая в жарком солнечном месте. Какой цвет вы бы посоветовали, опираясь на идеи лекции, и почему?

Подсказка: Подумайте, что тёмные и белые поверхности делают с солнечным светом.

Ответ: Белый или очень светлый. Белая поверхность отражает большую часть солнечного света, поэтому сарай нагревается меньше — так же, как белая крыша сохраняет дом прохладнее.

2. Назовите два способа, которыми физика проявляется в медицине по описанию лекции, и скажите, для чего каждый нужен.

Подсказка: Подумайте о том, как заглянуть внутрь тела и как лечить болезнь.

Ответ: Рентген и МРТ позволяют врачам заглянуть внутрь тела, например чтобы найти опухоль, а ультразвук измеряет кровоток. Лучевая терапия напрямую использует ионизирующее излучение для лечения рака.

3. Своими словами объясните, почему знание основных законов ценнее, чем заучивание множества применений.

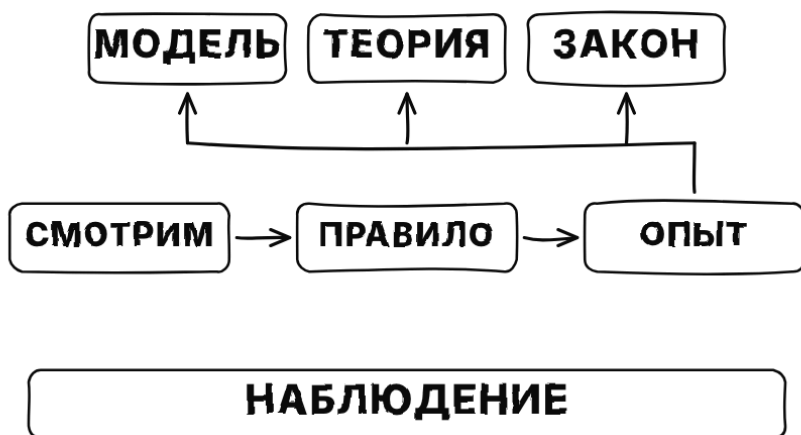
Подсказка: Подумайте о корнях и ветвях.

Ответ: Каждое применение, от микроволновок до медицинских томографов, вытекает из немногих основных законов. Если вы

знаете эти законы и умеете их применять, вы поймёте и применения, которых никогда не изучали, а заученный список охватывает только то, что в нём есть.

Модели, теории и законы

Посмотрите сегодня днём в окно на облака. Одни белые и пышные, другие плоские и серые, третьи высокие и тёмные снизу. Ловили ли вы себя на мысли, что облака определённого вида означают, что скоро пойдёт дождь? Если да, вы уже сделали первый шаг науки: посмотрели, заметили закономерность и высказали догадку о том, что она значит.



От взгляда к законам

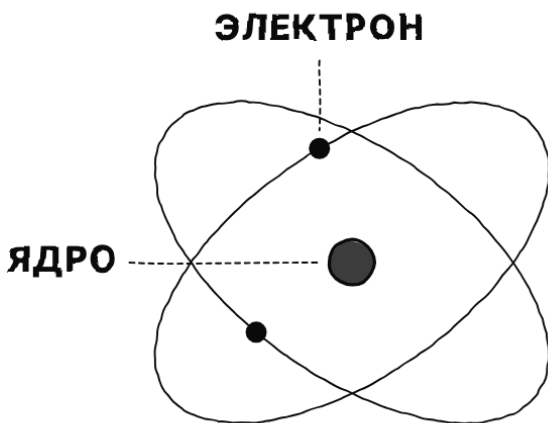
Книга начинается именно с этого обычного любопытства. Все мы оглядываемся вокруг, обобщаем и пытаемся понять увиденное.

Когда мы берёмся за это всерьёз, мы становимся организованнее: тщательно собираем данные, стараемся быть точнее, где можно, ставим контролируемые опыты и записываем мысли о том, как данные могли бы сложиться в одно целое. Из всего этого мы строим высказывания трёх видов — модели, теории и законы, — чтобы подытожить и передать другим то, что показали опыты. А под ними всеми лежит одно правило, которое книга формулирует твёрдо: краеугольный камень — наблюдение, потому что наука должна описывать Вселенную такой, какая она есть, а не такой, какой мы могли бы её себе вообразить.

Сначала: что такое закон природы? Книга называет законы краткими описаниями Вселенной: это человеческие формулировки глубинных правил, которым следует любой природный процесс. Сами правила встроены во Вселенную. Люди их не создавали и не могут изменить; мы можем только открыть и понять их. Это открытие, добавляет книга, — глубоко человеческое приключение, полное тайны, воображения, борьбы, побед и разочарований.

Две короткие истории из иллюстраций книги показывают, насколько оно человеческое. Исаак Ньютон, законами движения которого мы пользуемся до сих пор, так не хотел публиковать свой революционный труд, что друзьям пришлось его уговаривать. Позже он руководил Королевским монетным двором и относился к этой работе так серьёзно, что ввёл насечку на ребре монет, чтобы мошенники больше не могли незаметно срезать с них серебро. Мария Кюри тратила собственные деньги на свои первые исследования и подорвала здоровье облучением; она по-прежнему единственный человек, получивший Нобелевские премии и по физике, и по химии.

Теперь первое из трёх слов: модель. Модель — это изображение того, что слишком трудно или невозможно показать напрямую. Классический пример — планетарная модель атома, в которой крошечные электроны обращаются вокруг центрального ядра, как планеты вокруг Солнца. Никто не может увидеть, как электрон движется по кругу, но этот мысленный образ помогает объяснить то, что мы наблюдаем, например особые цвета света, который испускают горячие газы. Модель подкреплена опытом, но точна лишь в ограниченных случаях. Хорошее сравнение — карта в вашем телефоне: это не сам город, а упрощённое изображение, надёжное, чтобы найти дорогу, но бесполезное, чтобы узнать высоту зданий. Физики пользуются моделями, чтобы разобраться ситуацию, провести расчёт или построить компьютерную симуляцию.



ОБРАЗ, НЕ ФОТО

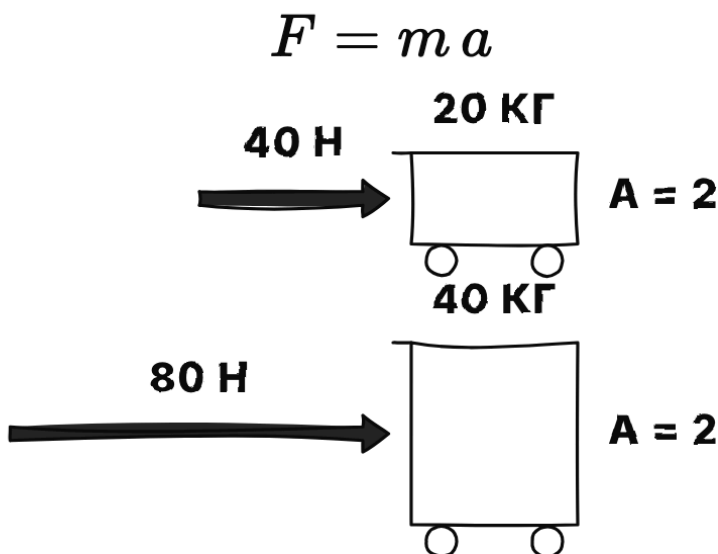
Планетарная модель атома

Дальше — теория. Здесь обиходное слово нас подводит. В обычной речи теория — это догадка или предчувствие, и люди говорят: «это всего лишь теория». Для учёного эти слова звучат нелепо, ведь наука построена на теориях. Научная теория — это проверяемое объяснение закономерностей природы, подкреплённое данными и многократно проверенное разными группами исследователей. Модель описывает лишь некоторые стороны системы, а теория должна описывать все стороны всего, что входит в её область применимости — круг случаев, которые она охватывает. Каждое следствие теории, которое можно проверить, должно быть проверено, и если опыт когда-нибудь покажет, что одно из следствий ложно, теорию либо

отбрасывают, либо изменяют, например сужая её область применимости.

Одним теориям нужна модель, другим нет. Теории тяготения Ньютона мысленный образ не нужен: падающие яблоки и обращающиеся планеты, которые она описывает, видны прямо. С теорией газов иначе: она представляет газ как бесчисленные атомы и молекулы, слишком мелкие, чтобы их увидеть, и мы воображаем их, чтобы осмыслить то, что приборы говорят нам о поведении газов.

Наконец, закон. Закон кратко описывает общую закономерность природы, подкреплён данными и повторными опытами и часто укладывается в одно уравнение. Два примера книги — закон сохранения энергии в любом процессе и второй закон движения Ньютона, связывающий силу, массу и ускорение. Словами второй закон говорит, что сила, необходимая, чтобы разогнать тело, равна его массе, умноженной на ускорение, то есть на быстроту изменения скорости. Это легко прочувствовать: более тяжёлое тело или более быстрое изменение скорости требуют более сильного толчка. Вот расчёт вслух. Тележке из супермаркета массой двадцать килограммов, которая каждую секунду набирает два метра в секунду скорости, нужна сила двадцать на два, то есть сорок единиц силы, называемых ньютонами. Удвойте груз до сорока килограммов при том же разгоне — и сила удвоится до восьмидесяти ньютонов.



Сила равна массе на ускорение

Так чем же законы отличаются от теорий? И то и другое — научные утверждения, выросшие из проверенных гипотез и подкреплённые данными. Но закон краток и очень общ и описывает один вид действия, а теория больше, сложнее и изменчивее и объясняет целое семейство связанных событий. Например, теорию эволюции и теорию относительности нельзя втиснуть в одно короткое утверждение, поэтому их не называют законами. Книга формулирует это изящно: закон — отправная точка, на которой строит научный метод, а теория — конечный результат этого метода. Иначе говоря, закон говорит вам, что происходит; теория рассказывает более широкую историю о том, почему происходит целая группа явлений.

Запомним

Наука стоит на наблюдении: она должна описывать мир таким, какой он есть, а не таким, каким мы его воображаем. Модель — упрощённое изображение того, что нельзя показать напрямую, как планетарный атом, и работает она лишь в ограниченных случаях. Научная теория — не догадка, а хорошо проверенное объяснение целого круга связанных событий, и она должна измениться, если опыт ей противоречит. Закон — краткое общее утверждение о закономерности, часто одно уравнение, как второй закон Ньютона: сила равна массе, умноженной на ускорение. Тележке массой двадцать килограммов, разгоняющейся на два метра в секунду каждую секунду, нужно сорок ньютонов.

Вопросы

1. Почему люди могут только открывать законы природы, но не создавать их?
 - a. Потому что писать законы разрешено только учёным
 - b. Потому что правила встроены во Вселенную и мы не можем их изменить
 - c. Потому что законы принимают голосованием
 - d. Потому что законы слишком сложны, чтобы их придумать

2. Почему карта в телефоне — хорошее сравнение для модели?
- a. Потому что она показывает весь город точно таким, какой он есть
 - b. Потому что она нарисована по фотографиям
 - c. Потому что это упрощённое изображение, надёжное для одних вопросов и бесполезное для других
 - d. Потому что её никогда не нужно обновлять
3. Тележке нужно 40 ньютонов, чтобы разогнаться с определённым ускорением. Какая сила нужна, если её массу удвоить, а ускорение оставить прежним?
- a. 80 ньютонов
 - b. 40 ньютонов
 - c. 20 ньютонов
 - d. 160 ньютонов
4. Почему теорию относительности и теорию эволюции называют теориями, а не законами?
- a. Потому что их не проверяли
 - b. Потому что это догадки
 - c. Потому что они новее законов
 - d. Потому что они объясняют целые семейства событий и не укладываются в одно короткое утверждение

Ответы

1. b) Правила встроены во Вселенную; люди их не создавали и не могут изменить, а могут только открыть и понять.

2. c) Как и модель, карта опирается на реальность, но точна лишь для ограниченных целей, например чтобы найти дорогу.

3. a) Сила равна массе, умноженной на ускорение, поэтому удвоение массы при том же ускорении удваивает силу.

4. d) Закон краток и общ; эти теории объясняют целое семейство связанных событий и не втискиваются в одно утверждение.

Разобранные примеры

Толкаем тележку из супермаркета Тележка массой 20 килограммов каждую секунду набирает 2 метра в секунду скорости. Какая сила ей нужна по второму закону Ньютона?

Второй закон Ньютона говорит, что сила равна массе, умноженной на ускорение.

Масса — 20 килограммов, ускорение — 2 метра в секунду, набираемые каждую секунду.

Умножаем: 20 на 2 — это 40.

Сила измеряется в ньютонах, значит, толчок — 40 ньютонов.

Ответ: 40 ньютонов

Задачи

1. Тележка массой 50 килограммов разгоняется на 3 метра в секунду каждую секунду. Какая сила нужна?

Подсказка: Сила равна массе, умноженной на ускорение.

Ответ: 150 ньютонов: 50 на 3.

2. На ящик массой 15 килограммов действует сила 60 ньютонов. С каким ускорением он разгоняется?

Подсказка: Ускорение равно силе, делённой на массу.

Ответ: 4 метра в секунду каждую секунду: 60, делённое на 15, поскольку сила равна массе, умноженной на ускорение.

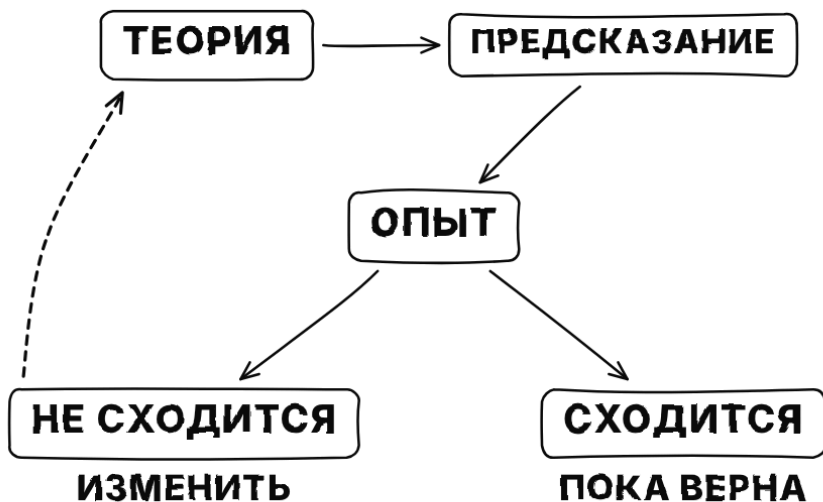
3. Своими словами объясните разницу между моделью и научной теорией.

Подсказка: Сравните, какую часть системы должна описывать каждая из них.

Ответ: Модель — упрощённое изображение того, что нельзя показать напрямую, и она точна лишь в ограниченных случаях. Теория — хорошо проверенное объяснение, которое должно описывать все стороны всего, что входит в её область, и её нужно отбросить или изменить, если опыт ей противоречит.

Догадка, проверка, новая догадка

Холодное утро, вы поворачиваете ключ, а машина не заводится. Что вы делаете дальше? Большинство людей, сами того не замечая, поступают вполне научно: предполагают причину, проверяют её, а если догадка оказалась неверной, предполагают снова. Книга использует именно эту сцену, чтобы показать, как работает наука.



Предсказание — это проверка

Перед машиной — одно маленькое замечание о названиях.
Кроме законов и теорий, есть утверждения с более узкой

областью действия; их обычно называют принципами. Принцип Паскаля, например, выполняется только в жидкостях и газах. Впрочем, книга признаёт, что люди не всегда строго различают законы и принципы.

Модели, теории и законы прежде всего помогают учёным осмыслить уже собранные данные. Но часто, когда одна из них уже есть, она делает нечто более захватывающее: указывает учёным на открытия, которых иначе они бы не сделали. Иногда из неё следует, что существует какой-то объект или явление, которого ещё никто не видел. Когда поиск потом находит его, это замечательный триумф, и книга приписывает такую возможность эффектных предсказаний глубинному порядку Вселенной.

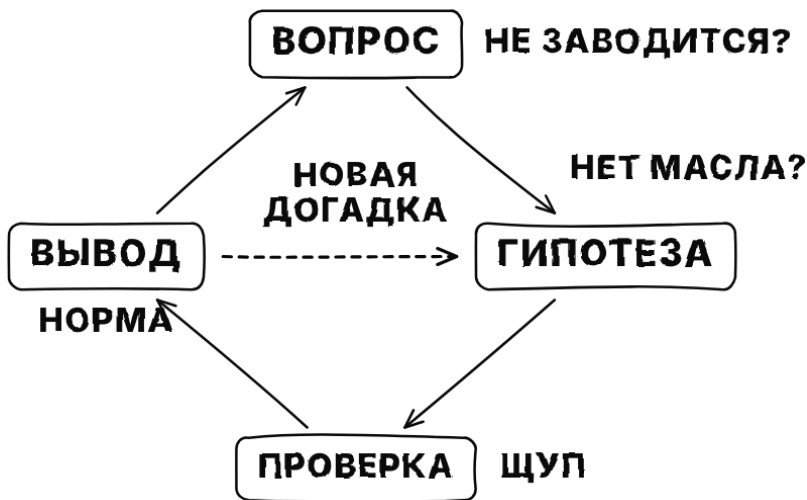
То же правило, что делает предсказания сильными, делает их и опасными. Если опыт не подтверждает предсказание, значит, теория или закон неверны, какими бы изящными или удобными они ни были. И ни один закон нельзя знать с абсолютной уверенностью, потому что никто не может провести все мыслимые опыты во всех возможных условиях. Поэтому физики считают закон или теорию верными, пока не найдётся контрпример. Если хороший, проверяемый опыт противоречит даже прочно установленному закону, этот закон нужно изменить или полностью отбросить. Иначе говоря, закону доверяют лишь до тех пор, пока тщательные опыты продолжают с ним соглашаться.

Книга называет всё это приключением, похожим на плавание по неизведанному океану: делаются открытия, складываются

модели, теории и законы, и Вселенная кажется тем прекраснее, чем больше мы понимаем.

Привычки, стоящие за этим приключением, стары. Ибн аль-Хайсам, которого называют также Альхазеном, работал в Каире около тысячи лет назад и сильно продвинул понимание света и зрения. Он учил, что учёный должен быть готов отвергнуть то, во что верят все, быть «врагом» всего прочитанного и доверять только объективным свидетельствам. Он настаивал на повторении опытов и проверке результатов и предупреждал, что наши чувства и ожидания могут сбить нас с пути. Его работа предвосхитила то, что мы сейчас называем научным методом.

Этот метод обычно выглядит так. Он начинается с наблюдения и вопроса. Затем идёт небольшое исследование, а из него — гипотеза, возможный ответ, который можно проверить. Затем опыт проверяет гипотезу. Наконец, результаты анализируют и делают вывод. Книга подчёркивает, что метод не только для учёных; им можно пользоваться во многих ситуациях и подстраивать под них.



Метод на примере машины

Вернёмся к машине, которая не заводится. Вопрос прост: почему? Вы выясняете, по каким причинам машина может не заводится, и выдвигаете гипотезу: может быть, в двигателе нет масла. Чтобы проверить её, вы открываете капот и смотрите уровень масла. Масло на нормальном уровне, значит, вы заключаете, что дело не в масле. Это не неудача, это результат. Вы выдвигаете новую гипотезу и снова проходите все шаги. Точно так же, когда телефон не подключается к интернету: вы подозреваете сеть, проверяете её на другом устройстве, и если там всё в порядке, переходите к следующему подозреваемому. Иначе говоря, каждая проверка либо находит причину, либо вычёркивает одного подозреваемого из списка, и то и другое приближает вас к ответу.

Запомним

Принципы — это утверждения с более узкой областью действия, чем у законов, например принцип Паскаля для жидкостей и газов. Модели, теории и законы не только упорядочивают данные, но и предсказывают ещё не увиденное, и сбывшееся предсказание — триумф науки. Несбывшееся предсказание показывает, что теория или закон неверны, а ни один закон не бывает достоверен окончательно, потому что нельзя провести все опыты. Научный метод ведёт от наблюдения и вопроса через исследование и гипотезу к опыту, анализу и выводу. Когда гипотеза не подтверждается, как с проверкой масла в незаводящейся машине, вы выдвигаете новую и снова проверяете.

Вопросы

1. Почему принцип Паскаля называют принципом, а не законом?
 - a. Потому что его открыл один человек
 - b. Потому что у него более узкая область действия — только жидкости и газы
 - c. Потому что его не проверяли
 - d. Потому что его нельзя записать уравнением

2. Что должно следовать, если тщательный опыт не подтвердил предсказание теории?
 - a. Теория или закон неверны, какими бы изящными они ни были
 - b. Опыт следует проигнорировать
 - c. Предсказание становится принципом
 - d. Теорию сохраняют, если она удобна
3. Вы проверили масло в незаводящейся машине, и оно на нормальном уровне. Что научный метод велит делать дальше?
 - a. Заключить, что с машиной всё в порядке
 - b. Повторять ту же проверку масла, пока она не покажет проблему
 - c. Выдвинуть новую гипотезу и проверить её
 - d. Сдаться, раз проверка не удалась
4. Почему ни один закон нельзя знать с абсолютной уверенностью?
 - a. Потому что законы пишут люди
 - b. Потому что законы меняются каждый век
 - c. Потому что учёные спорят
 - d. Потому что никто не может провести все мыслимые опыты во всех условиях

Ответы

1. b) Утверждения с более узкой областью действия обычно называют принципами; принцип Паскаля выполняется только в жидкостях и газах.

- 2. а)** Если опыт не подтверждает предсказание, теория или закон неверны, какими бы изящными или удобными они ни были.
- 3. с)** Неподтвердившаяся гипотеза — тоже результат: она вычёркивает одного подозреваемого, и вы выдвигаете новую гипотезу и снова проверяете.
- 4. d)** Раз нельзя провести все опыты, законы считаются верными, пока не найдётся контрпример.

Разобранные примеры

Машина, которая не заводится Ваша машина не заводится. Пройдите по шагам научного метода, как это делает книга, проверяя догадку, что в двигателе нет масла.

Наблюдение и вопрос: машина не заводится — почему?

Исследование: выяснить, по каким причинам машина может не заводиться.

Гипотеза: может быть, в двигателе нет масла.

Опыт: открыть капот и проверить уровень масла.

Вывод: масло на нормальном уровне, значит, дело не в нём; выдвинуть новую гипотезу и повторить.

Ответ: Гипотеза о масле отвергнута, и поиск переходит к следующей возможной причине.

Задачи

1. Ваш телефон не подключается к интернету. Опишите, как вы применили бы научный метод, чтобы найти причину, хотя бы с двумя гипотезами.

Подсказка: Начните с вопроса, затем предложите причину, которую можно проверить, проверьте её и решите.

Ответ: Вопрос: почему он не подключается? Гипотеза первая: не работает домашняя сеть; проверить её на другом устройстве. Если другое устройство подключается, гипотезу отвергаем. Гипотеза вторая: на телефоне выключен Wi-Fi; проверить настройку. Каждая проверка либо находит причину, либо убирает одного подозреваемого.

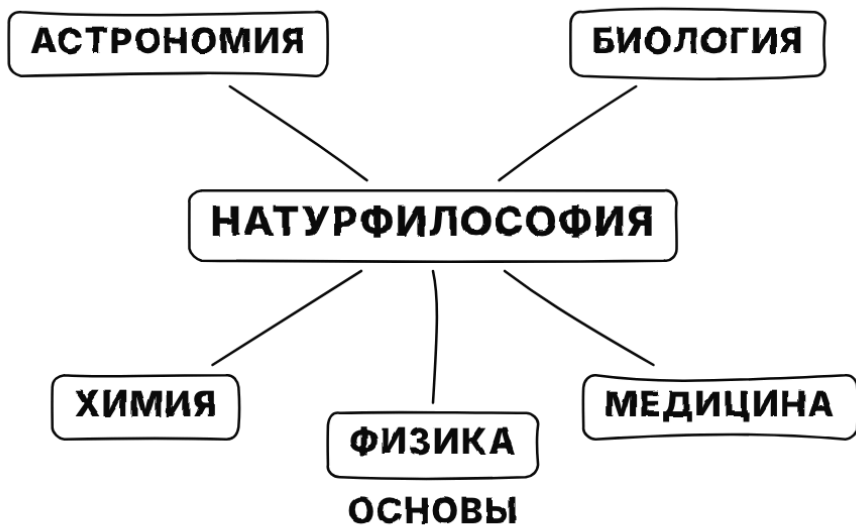
2. Своими словами объясните, что Ибн аль-Хайсам внёс в то, как делается наука.

Подсказка: Подумайте о его отношении к прочитанному и к свидетельствам.

Ответ: Он учил, что учёный должен быть готов отвергнуть общепринятое знание и доверять только объективным свидетельствам, что опыты надо повторять, а результаты проверять, и что наши чувства и ожидания могут нас обмануть. Поэтому он стал предшественником научного метода.

Старая физика, новая физика

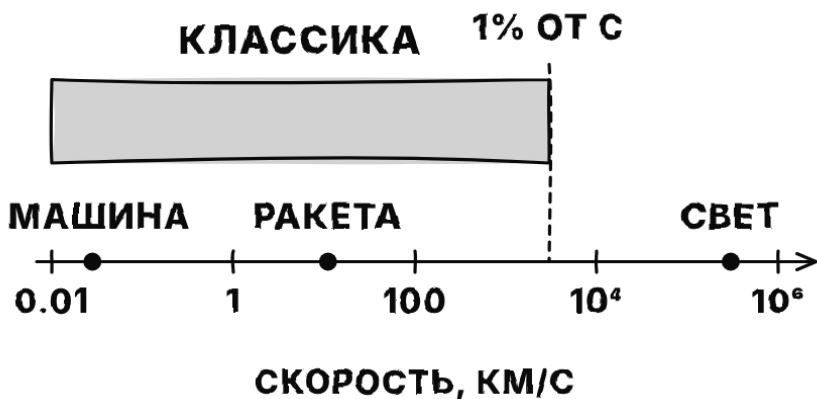
Бросьте мяч через комнату и посмотрите, как он по дуге опускается вам в руку. Всё в нём кажется очевидным: он летит с небольшой скоростью, его хорошо видно, а земное тяготение тянет его вниз привычным образом. Физике, которая описывает этот мяч, несколько веков, и она по-прежнему прекрасно работает. Но это не вся правда о Вселенной, и эта часть о том, где она перестаёт работать и почему мы всё равно изучаем её первой.



Натуральная философия делится

Начнём с истории. Физика не всегда была отдельным предметом и до сих пор связана с другими науками. Её название происходит от греческого слова «природа», и изучение природы долго называли натуральной философией. С древности и до эпохи Возрождения натуральная философия охватывала сразу астрономию, биологию, химию, физику, математику и медицину. Греческий философ Аристотель больше двух тысяч лет назад писал о физике, животных, душе, политике и поэзии — всё как об одном знании. По мере роста знаний за последние несколько веков натуральная философия распалась на всё более узкие области, а физика сохранила самые основы. Иллюстрации книги называют нескольких великих умов на этом пути: Ибн аль-Хайсама и Галилео Галилея, столь важных для научной практики, что позднее один учёный поместил их обоих на обложку своего главного труда, и Нильса Бора, одного из основателей квантовой механики.

Физику, развивавшуюся от эпохи Возрождения до конца девятнадцатого века, называют классической физикой. В начале двадцатого века революционные открытия превратили её в современную физику.



Где верна классическая физика

Классическая физика — не точное описание Вселенной, но превосходное приближение, когда выполняются три условия. Тела должны двигаться медленнее примерно одного процента скорости света. Они должны быть достаточно крупными, чтобы их можно было разглядеть в микроскоп. И тяготение должно быть только слабым, как тяготение Земли.

Насколько быстр один процент скорости света? Свет проходит около трёхсот тысяч километров в секунду, а одна сотая от этого — три тысячи километров в секунду. Ваша машина на трассе, при скорости около ста километров в час, проезжает меньше трёх сотых километра в секунду — примерно в сто тысяч раз меньше

этого предела. Так что брошенный мяч, машина и даже ракета вполне умещаются в классической физике.

Именно поэтому классическая физика кажется здравым смыслом. Мы живём среди малых скоростей, видимых вещей и слабого тяготения, поэтому классическая физика интуитивно кажется верной, а многое в современной физике — странным. Вот здесь модели становятся особенно ценными. Они позволяют представить то, чего мы никогда не испытываем: что происходит при огромных скоростях или какими могут быть вещи, слишком мелкие, чтобы их увидеть. Мы можем понять свойства атома, потому что можем его себе представить, хотя никто никогда не видел атом глазом. Помогают и новые приборы: сканирующий туннельный микроскоп теперь показывает отдельные атомы на листе золота.

Современная физика принесла одни из самых эффектных достижений науки. Многие законы классической физики были изменены или отброшены, а вместе с этим пришли перевороты в технике, в обществе и в нашей картине Вселенной. Как и научная фантастика, современная физика полна странных объектов за пределами повседневного опыта, но в отличие от фантастики они реальны.

Так почему же большая часть книги всё ещё учит классической физике? По двум причинам. Она чрезвычайно точно описывает Вселенную в широком круге повседневных ситуаций. И без неё вообще нельзя понять современную физику. Иначе говоря, классическая физика — это и повседневный инструмент, и первый этаж, на котором построена более новая физика.

Сама современная физика стоит на двух революционных теориях: теории относительности для очень быстрого и квантовой механике для очень малого. Теория относительности нужна, когда что-то движется быстрее примерно одного процента скорости света или испытывает сильное тяготение, например вблизи Солнца. Квантовая механика нужна для вещей, слишком мелких, чтобы увидеть их в микроскоп. Вместе они образуют релятивистскую квантовую механику, которая описывает малые объекты, движущиеся очень быстро или испытывающие сильное тяготение. Это лучшая из наших теорий, применимая везде, но математически она так сложна, что ею пользуются только при необходимости; когда более простые теории достаточно точны, используют их. Книга добавляет обнадеживающее замечание: очень многое в современной физике можно сделать с помощью обычной алгебры и тригонометрии.



Какая физика для какого мира

Обратите внимание на слова: теорию относительности и квантовую механику называют теориями, а не законами. Книга завершает раздел маленькой загадкой именно об этом. Друг говорит вам, что узнал новый закон природы. Ещё не услышав его, вы кое-что уже знаете: это будет краткое описание Вселенной, формулировка правила, которому следуют природные процессы. Если бы друг узнал теорию, вы бы знали, что это масштабное, широко применимое объяснение. Иначе говоря, закон краток и говорит, что происходит; теория широка и объясняет целый круг явлений.

Запомним

Физика выросла из натуральной философии, которая когда-то включала все науки, и при разделении областей сохранила самые основы. Классическая физика хорошо работает при скоростях ниже примерно одного процента скорости света, для вещей, видимых в микроскоп, и при слабом тяготении. Один процент скорости света — около трёх тысяч километров в секунду, намного больше всего, что встречается в повседневной жизни. Современная физика стоит на теории относительности для очень быстрого и квантовой механике для очень малого; вместе они образуют релятивистскую квантовую механику. Классическую физику по-прежнему изучают первой, потому что она очень точна для повседневной жизни и нужна, чтобы понять современную физику.

Вопросы

1. Космический аппарат движется со скоростью в одну десятую скорости света. Какая теория нужна, чтобы описать его движение?
 - a. Классическая физика
 - b. Теория относительности
 - c. Квантовая механика
 - d. Натуральная философия

2. Почему классическая физика кажется здравым смыслом?
 - a. Потому что мы живём среди малых скоростей, видимых вещей и слабого тяготения, где она работает
 - b. Потому что это самая старая физика
 - c. Потому что это точное описание природы
 - d. Потому что от современной физики отказались
3. Почему релятивистскую квантовую механику не применяют к каждой задаче, хотя это лучшая общая теория?
 - a. Потому что она опровергнута
 - b. Потому что она применима только к Солнцу
 - c. Потому что она математически так сложна, что, когда хватает точности, используют более простые теории
 - d. Потому что она описывает только медленные объекты
4. Друг говорит, что узнал новую теорию, а не закон. Чего можно ожидать?
 - a. Краткой формулировки одного правила
 - b. Непроверенной догадки
 - c. Списки измерений
 - d. Масштабного, широко применимого объяснения

Ответы

1. **b)** Теория относительности нужна, когда что-то движется быстрее примерно одного процента скорости света.
2. **a)** Мы живём там, где выполняются три условия классической физики, поэтому она интуитивно кажется верной.

3. **с)** Ею пользуются только при необходимости; когда более простые теории достаточно точны, используют их.
4. **д)** Теория — масштабное, широко применимое объяснение, а закон — краткая формулировка правила.

Разобранные примеры

Один процент скорости света Свет проходит около 300 000 километров в секунду. Ниже какой скорости классическая физика хорошо работает и как с ней соотносится машина, едущая 100 километров в час?

Классической физике нужны скорости ниже примерно одного процента, то есть одной сотой, скорости света.

Одна сотая от 300 000 километров в секунду — это 3000 километров в секунду.

Машина при 100 километрах в час проезжает 100 километров за 3600 секунд, около 0,028 километра в секунду.

3000, делённое примерно на 0,028, — это около 100 000, так что машина примерно в сто тысяч раз ниже предела.

Ответ: Около 3000 километров в секунду; машина примерно в 100 000 раз медленнее

Задачи

1. Ракета покидает Землю со скоростью около 11 километров в секунду. Ниже ли это классического предела примерно в 3000 километров в секунду? Примерно во сколько раз?

Подсказка: Разделите 3000 на 11.

Ответ: Да, примерно в 270 раз: 3000, делённое на 11, — около 273, так что классическая физика хорошо её описывает.

2. Для каждого случая скажите, что нужно — классическая физика, теория относительности или квантовая механика: электрон внутри атома; планета, обращающаяся вокруг Солнца с обычной скоростью; свет, проходящий совсем близко от Солнца.

Подсказка: Проверьте три условия: скорость, размер и силу тяготения.

Ответ: Электрону нужна квантовая механика: он слишком мал, чтобы увидеть его в микроскоп. Планету хорошо описывает классическая физика. У света вблизи Солнца есть и скорость света, и сильное тяготение, поэтому нужна теория относительности.

3. Назовите две причины, по которым книга учит в основном классической физике.

Подсказка: Одна связана с повседневной жизнью, другая — с современной физикой.

Ответ: Классическая физика чрезвычайно точно описывает Вселенную в широком круге повседневных ситуаций, и она нужна, чтобы понять современную физику.

Числам нужны единицы

Друг пишет вам: «Аптека в трёх отсюда». В трёх чём: минутах, кварталах, километрах? Само по себе число ничего не говорит. Книга говорит то же самое рисунком с замечательной подписью: «Расстояния в неизвестных единицах бесполезны до бешенства».



В трёх чём?

Физика охватывает ошеломляющий диапазон. Она имеет дело и с невероятно короткой жизнью атомного ядра, и с возрастом Земли, с частицами меньше ядра и с расстоянием до края известной Вселенной, с толчком прыгающей блохи и с

притяжением между Землёй и Солнцем. Книга открывает раздел изображением Земли и Луны и замечает, что это расстояние, каким бы огромным оно ни казалось, — крошечная доля расстояний до других небесных тел. Описание таких вещей числами, а принципов, стоящих за ними, — уравнениями позволяет понять природу гораздо глубже, чем одними словами. Но чтобы управляться с такими диапазонами, нужны согласованные единицы.

Как вообще определяется величина вроде длины или скорости? Одним из двух способов. Одни величины определяют, говоря, как их измерить: таковы расстояние и время. Другие определяют, говоря, как их вычислить из других измерений. Пример книги — средняя скорость: это пройденное расстояние, делённое на затраченное время. Если бортовой компьютер машины показывает сто двадцать километров за полтора часа, ваша средняя скорость — сто двадцать, делённое на полтора, то есть восемьдесят километров в час.

$$v = \frac{d}{t}$$

СКОРОСТЬ = ПУТЬ ÷ ВРЕМЯ

$$\frac{120 \text{ km}}{1.5 \text{ h}} = 80 \text{ km/h}$$



Средняя скорость, вычисленная

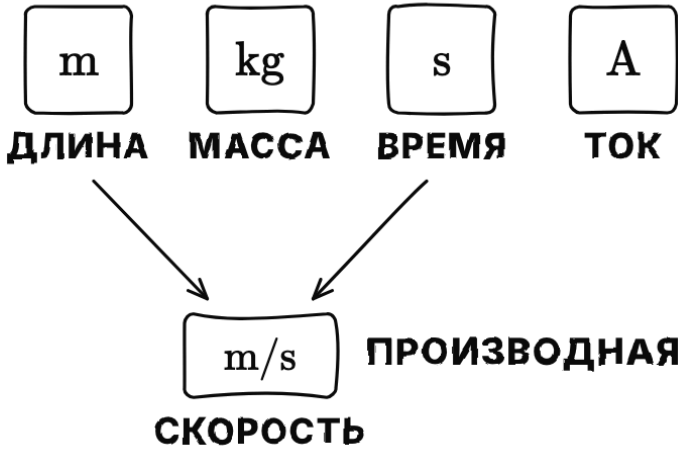
Любое измерение даётся в единицах — согласованных стандартных количествах. Длину забега, например, указывают в метрах для спринтеров и в километрах для бегунов на длинные дистанции. Без таких стандартов учёные не могли бы осмысленно сообщать о своих результатах и сравнивать их.

В ходу две большие системы единиц. Одна — Международная система, известная по французским инициалам как СИ, её также называют метрической системой. Другая — английская система единиц, её также называют обычной или имперской; исторически её использовали в землях, когда-то управлявшихся Британской империей, и она всё ещё распространена в Соединённых Штатах. Почти все остальные страны пользуются

метрической системой, и это стандарт, принятый учёными и математиками. Именно поэтому грамм на ваших кухонных весах и миллиграмм на этикетке лекарства означают одно и то же в любой точке мира.

А теперь неожиданное. Одни величины основательнее других. Самые основные можно определить только процедурой их измерения, и их единицы называют основными единицами. Эта книга считает основными четыре величины: длину, измеряемую в метрах; массу — в килограммах; время — в секундах; и силу электрического тока — в амперах, до которой дело дойдёт гораздо позже. Любую другую величину, например силу или электрический заряд, можно составить из этих четырёх умножением и делением, и её единицу называют производной. Скорость, например, — это длина, делённая на время, поэтому её единица, метр в секунду, производная. Иначе говоря, четырёх строительных блоков хватает, чтобы сложить почти все измерения в физике, и это ещё один признак глубинной простоты природы.

ОСНОВНЫЕ



Четыре строительных блока

Книга добавляет одно практическое замечание. В нескольких местах она использует внесистемные единицы, потому что они очень распространены, например миллиметры ртутного столба для давления крови. Всякий раз, когда она это делает, она переводит их в метрические единицы.

Запомним

Число без единицы бесполезно; согласованные единицы позволяют учёным сообщать и сравнивать измерения. Величину определяют либо тем, как её измеряют, как расстояние и время, либо тем, как её вычисляют, как среднюю скорость — расстояние, делённое на время. Метрическая система, или СИ, — стандарт для учёных и большей части мира; английские единицы сохранились в основном в Соединённых Штатах. Четыре основные величины в этой книге — длина, масса, время и сила тока, измеряемые в метрах, килограммах, секундах и амперах. Все остальные величины, например скорость и сила, — комбинации этих, и их единицы называют производными.

Вопросы

1. Как определяется средняя скорость, в отличие от расстояния и времени?
 - a. Процедурой измерения, как линейкой или часами
 - b. Вычислением: пройденное расстояние, делённое на затраченное время
 - c. Как одна из четырёх основных величин
 - d. Одной своей единицей
2. В каком списке четыре основные величины, которыми пользуется эта книга?

- a. Длина, масса, время и сила тока
 - b. Длина, скорость, сила и время
 - c. Масса, вес, объём и температура
 - d. Метр, килограмм, секунда и ньютон
3. Почему единицу скорости, метр в секунду, называют производной?
- a. Потому что скорость измеряют спидометром
 - b. Потому что её используют только в науке
 - c. Потому что она составлена из основных единиц: длина, делённая на время
 - d. Потому что её придумали позже
4. Почему учёным необходимы согласованные единицы?
- a. Потому что они делают числа меньше
 - b. Потому что они заменяют опыты
 - c. Потому что каждой стране нужны свои
 - d. Потому что без них нельзя осмысленно сообщать о результатах и сравнивать их

Ответы

1. **b)** Расстояние и время определяются тем, как их измерить; средняя скорость — тем, как её из них вычислить.
2. **a)** Книга считает основными длину, массу, время и силу электрического тока.
3. **c)** Скорость — это длина, делённая на время, поэтому её единица составлена из основных.

4. d) Без стандартных единиц учёные не могли бы осмысленно сообщать о своих результатах и сравнивать их.

Разобранные примеры

Средняя скорость по бортовому компьютеру Машина проезжает 120 километров за полтора часа. Какова её средняя скорость?

Средняя скорость — это пройденное расстояние, делённое на затраченное время.

Расстояние — 120 километров, время — 1,5 часа.

120, делённое на 1,5, — это 80.

Ответ: 80 километров в час

Задачи

1. Бегун пробегает 400 метров за 80 секунд. Какова его средняя скорость и основная или производная у неё единица?

Подсказка: Разделите расстояние на время, затем спросите, из чего составлена единица.

Ответ: 5 метров в секунду: 400 на 80. Единица производная, потому что это длина, делённая на время.

2. Разделите на основные и производные величины, как это делает книга: время, скорость, масса, сила, сила тока.

Подсказка: Книга называет ровно четыре основные величины.

Ответ: Основные: время, масса и сила тока (четвёртая — длина).
Производные: скорость и сила, которые составлены из основных.

Секунда, метр, килограмм

Представьте, что вы покупаете килограмм яблок в двух магазинах и обнаруживаете, что килограмм в одном магазине чуть тяжелее, чем в другом. Или две линейки, которые расходятся в том, какой длины метр. Всё, что мы измеряем, тихо развалилось бы. Вот почему книга уделяет время тому, как закрепляются сами основные единицы и как менялись их определения.



$$24 \times 60 \times 60 = 86\,400$$



ЗАМЕДЛЯЕТСЯ



ЦЕЗИЙ



$$9\,192\,631\,770$$

$$= 1\text{ s}$$

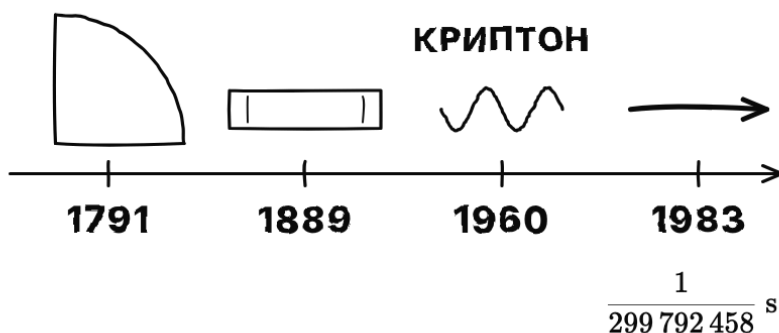
От суток к цезию

Начнѐм со времени. Много лет секунда определялась как одна восемьдесят шесть тысяч четырёхсотая часть средних суток. Это число берѐтся прямо из часов: двадцать четыре часа, умноженные на шестьдесят минут и ещё на шестьдесят секунд, дают восемьдесят шесть тысяч четыреста секунд в сутках. Но вращение Земли очень постепенно замедляется, поэтому сутки медленно удлиняются, и привязанная к ним секунда тоже медленно менялась бы. Поэтому учёные обратились к тому, что не меняется. Атомы цезия можно заставить колебаться чрезвычайно ровно, и их колебания можно сосчитать. С 1967 года одна секунда — это время, за которое совершается чуть больше девяти миллиардов ста девяноста двух миллионов таких колебаний. Построенные на этом атомные часы идут с точностью лучше миллионной доли секунды в год. Время в вашем телефоне регулярно сверяется по сигналам, которые восходят к таким атомным часам.

Дальше — длина. В 1791 году метр определили как одну десятимиллионную часть расстояния от экватора до Северного полюса. В 1889 году им стало расстояние между двумя тонкими штрихами на бруске из платины и иридия, хранящемся под Парижем. К 1960 году его удалось закрепить точнее с помощью света — как определённое число длин волн оранжевого света, испускаемого атомами криптона. С 1983 года метр — это расстояние, которое свет проходит в пустоте за одну двести девяносто девять миллионов семьсот девяносто две тысячи четыреста пятьдесят восьмую долю секунды. Такой выбор по определению делает скорость света ровно таким числом метров в секунду. Подпись в книге добавляет рассуждение: пройденное расстояние равно скорости, умноженной на время. Свет проходит

почти триста тысяч километров за секунду, поэтому за эту крошечную долю секунды он проходит ровно один метр. Так что более точное измерение уже не может изменить это число; оно лишь позволяет лабораториям точнее воспроизводить метр.

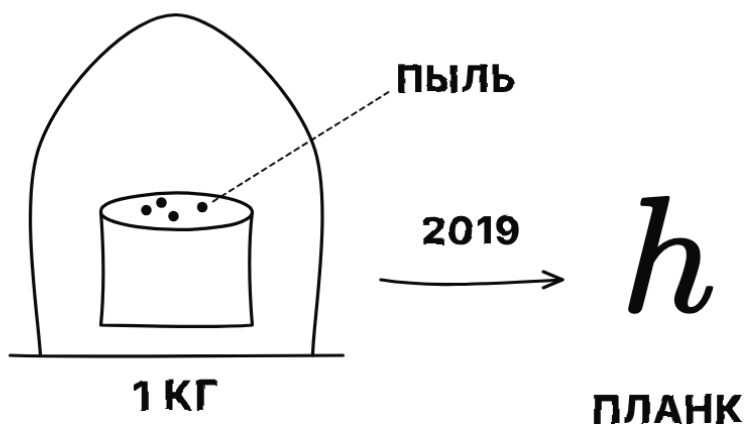
МЕТР



Четыре определения метра

Затем масса. Долгое время килограмм был просто массой одного определённого цилиндра из платины и иридия, хранившегося вместе со старым эталоном метра под Парижем, с точными копиями в других местах, в том числе в Национальном институте стандартов и технологий в Мэриленде. Любую другую массу в мире в конечном счёте можно было свести к сравнению с этим цилиндром. Но хотя металл не поддавался коррозии, крошечные частицы из воздуха прилипали к его поверхности и медленно

меняли его массу. Поэтому в мае 2019 года учёные приняли более устойчивое определение, привязав килограмм к секунде, метру и постоянной квантовой физики — постоянной Планка, которая связывает энергию частицы света с её частотой. Килограмм на ваших кухонных весах теперь через длинную цепочку сравнений опирается на эту неизменную постоянную, а не на кусок металла.



Килограмм покидает цилиндр

Зачем такая тщательность? Затем, что любое измерение в итоге выражается в основных единицах, и ни одно измерение не может быть точнее этих единиц. Иначе говоря, линейка хороша ровно настолько, насколько хорош метр, который она копирует, а часы — насколько хороша секунда, которую они отсчитывают.

Четвёртая основная единица, ампер для силы тока, появится

гораздо позже, вместе с электричеством и магнетизмом. Для механики, жидкостей, теплоты и волн, которые книга рассматривает первыми, нужны только длина, масса и время.

Запомним

Секунда когда-то была долей суток, но сутки медленно удлиняются; с 1967 года это фиксированное число колебаний цезия. Метр прошёл путь от доли Земли через гравированный брусок до расстояния, которое свет проходит за крошечную точную долю секунды. Это определение делает скорость света ровно двумястами девяноста девятью миллионами семьюстами девяноста двумя тысячами четырьмястами пятьюдесятью восемью метрами в секунду. Килограмм, когда-то металлический цилиндр, медленно собиравший грязь, с 2019 года привязан к секунде, метру и постоянной Планка. Любое измерение опирается на эти единицы, поэтому не может быть точнее их.

Вопросы

1. Почему в 2019 году заменили старый металлический килограмм?
 - а. Его украли
 - б. Крошечные частицы из воздуха прилипали к нему и медленно меняли его массу
 - с. Он разрушился от коррозии

- d. Он был слишком большим, чтобы его копировать
2. Раз скорость света закреплена определением, что изменило бы её более точное измерение?
- a. Длину метра
 - b. Число 299 792 458
 - c. Только то, насколько точно лаборатории могут воспроизвести метр
 - d. Массу килограмма
3. Почему определения основных единиц важны для любого измерения?
- a. Потому что они написаны по-французски
 - b. Потому что ими пользуются только в лабораториях
 - c. Потому что любое измерение выражается в них и не может быть точнее их
 - d. Потому что они меняются каждый год
4. Каких основных величин достаточно для механики, жидкостей, теплоты и волн?
- a. Длины, массы, времени и силы тока
 - b. Только времени
 - c. Длины и силы тока
 - d. Длины, массы и времени

Ответы

1. b) Хотя он не поддавался коррозии, частицы из воздуха оседали на его поверхности и медленно меняли его массу.

- 2. с)** Число точно по определению, и метр определяется через него; более точное измерение лишь улучшает то, насколько точно можно воспроизвести метр.
- 3. с)** Линейка хороша ровно настолько, насколько хорош копируемый ею метр, а часы — насколько хороша отсчитываемая ими секунда.
- 4. d)** Сила тока появится позже; для первых тем нужны только длина, масса и время.

Разобранные примеры

Как далеко свет уходит за мгновение Свет проходит почти 300 000 километров за секунду. Примерно какое расстояние он проходит за тысячную долю секунды?

Пройденное расстояние равно скорости, умноженной на время.

За одну секунду свет проходит около 300 000 километров.

За тысячную долю секунды он проходит тысячную часть этого.

300 000, делённое на 1000, — это 300.

Ответ: около 300 километров

Задачи

1. В 1791 году метр был одной десятиmillionной расстояния от экватора до Северного полюса. Сколько километров это расстояние по такому определению?

Подсказка: Десять миллионов метров; в километре тысяча метров.

Ответ: 10 000 километров: десять миллионов метров, делённые на тысячу.

2. Сколько секунд в сутках и почему старое определение секунды постепенно стало ненадёжным?

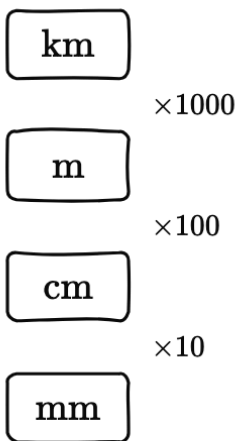
Подсказка: Перемножьте часы, минуты и секунды, затем подумайте о вращении Земли.

Ответ: 86 400 секунд: 24 на 60 на 60. Поскольку вращение Земли постепенно замедляется, сутки удлиняются, и секунда, определённая как доля суток, медленно менялась бы.

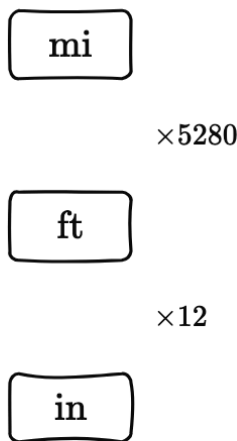
Степени десяти

Посмотрите на коробку с лекарством: доза может быть двести пятьдесят миллиграммов. Посмотрите на карту в телефоне: до следующего города двенадцать километров. Милли, кило: эти маленькие части в начале слова, называемые приставками, незаметно делают огромную работу. Каждая говорит «умножь на определённую степень десяти», и в этом весь секрет метрической системы.

МЕТРИЧЕСКИЕ



ОБЫЧНЫЕ



Шаги по десять против странных шагов

Метрическая система, частью которой являются международные единицы, удобна для науки и техники, потому что её единицы связаны множителями десять. Перевод одной единицы в другую означает лишь сдвиг на степени десяти. В метре сто сантиметров, а в километре тысяча метров. Сравните с обычными единицами, которые до сих пор используют в Соединённых Штатах: двенадцать дюймов в футе, пять тысяч двести восемьдесят футов в миле. Из-за этих странных чисел каждый перевод превращается в маленькую морочку.

Опыт

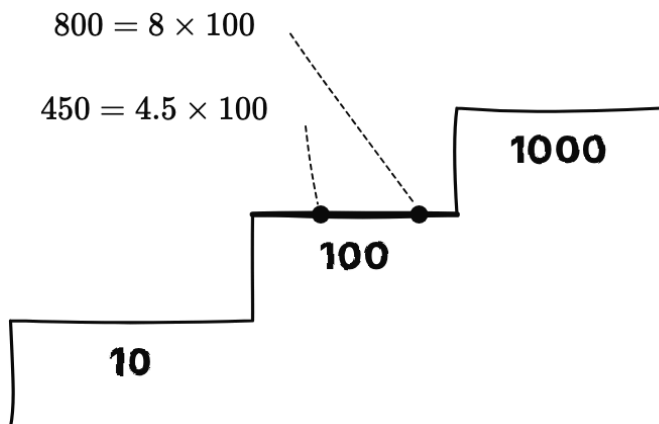
Возьмите линейку с делениями в сантиметрах и миллиметрах. Сосчитайте маленькие миллиметровые промежутки между двумя сантиметровыми отметками: их десять. Теперь представьте метровую линейку: сто сантиметров, или тысяча миллиметров. Каждый шаг — множитель десять, поэтому перевод сводится к сдвигу запятой.

Второе преимущество в том, что одна единица растягивается на огромные диапазоны простой сменой приставки. Метры подходят для стройки, километры — для авиаперелётов, а крошечный нанометр — для конструирования линз и оптических приборов. В метрической системе не нужно придумывать новую единицу для каждого дела.

Таблица в книге перечисляет приставки от очень больших до очень малых, у каждой — пример. Кило означает тысячу, и километр — это примерно шесть десятых мили. Мега означает

миллион; гига — миллиард, и гигагерц — типичная частота микроволн. Если идти вниз, санти означает сотую долю, и сантиметр — это примерно толщина кончика пальца. Милли означает тысячную долю, и миллиметр — это высота блохи в холке. Микро — миллионная доля, нано — миллиардная, а фемтометр, одна миллионная миллиардной доли метра, — примерно размер протона. На краях стоят экса — единица с восемнадцатью нулями, где экзаметр — это примерно путь, который свет проходит за столетие, — и атто, её крошечное зеркальное отражение, где аттосекунда — примерно время, за которое свет пересекает атом. Двести пятьдесят миллиграммов на коробке с лекарством — это четверть грамма, а двенадцать километров на карте — двенадцать тысяч метров.

Степени десяти дают и способ оценить масштаб числа, который называют порядком величины. Любое число можно записать как некоторое число, умноженное на степень десяти, и эта степень говорит о его порядке величины. Восемьсот — это восемь, умноженное на десять и ещё на десять, то есть восемь на сто. Четыреста пятьдесят — это четыре с половиной на сто. Оба стоят на ступени «сотен» лестницы, значит, у них один и тот же порядок величины. Иначе говоря, порядок величины — это грубая прикидка: он говорит, на какой вы ступени, а не где именно на ней.



Одна ступень — один порядок

Вот поразительное сравнение из книги. Атом имеет в поперечнике около одной десятиллиардной метра: единица, делённая на десять десять раз подряд. Солнце в поперечнике около миллиарда метров: единица с девятью нулями. Сколько шагов по десять их разделяет? Десять шагов ведут от атома к одному метру, и ещё девять — до Солнца, итого девятнадцать шагов. Солнце примерно в десять миллионов миллионов миллионов раз шире атома — число, которое можно охватить, только считая шаги.



Девятнадцать шагов от атома до Солнца

Книга завершает раздел замечанием о том, куда движется измерение. Поскольку вещество построено из атомов, физикам больше всего хотелось бы основать единицы на крошечных, неизменных вещах в природе. Для времени это уже сделано: секунда опирается на колебания атома цезия. Длина когда-то была привязана к длине волны света определённого атома, но с тех пор перешла к ещё более точной скорости света. Если массу атомов или тщательно изготовленного шара из атомов кремния удастся измерить точнее, чем эталон килограмма, масса тоже может однажды опереться на малый масштаб. А когда-нибудь единицу электрического заряда, возможно, основуют на зарядах электронов и протонов, хотя пока ток и заряд привязаны к большим токам и силам между проводами.

Запомним

Каждая метрическая приставка означает степень десяти: кило — тысяча, милли — тысячная, микро — миллионная и так далее. Это делает метрические переводы простыми, в отличие от двенадцати дюймов в футе или пяти тысяч двухсот восьмидесяти футов в миле. Порядок величины числа — это степень десяти, задающая его масштаб; у восьмисот и четырёхсот пятидесяти он один — сотни. Атом и Солнце различаются по размеру примерно на девятнадцать степеней десяти. Физики надеются основать все единицы на крошечных неизменных вещах; секунда уже опирается на атом цезия.

Вопросы

1. Почему в метрической системе переводить единицы проще, чем в обычных единицах США?
 - a. Потому что метрические единицы меньше
 - b. Потому что каждый метрический шаг — степень десяти
 - c. Потому что метрические единицы новее
 - d. Потому что обычные единицы нельзя переводить
2. Почему у восьмисот и четырёхсот пятидесяти один и тот же порядок величины?
 - a. Потому что оба — это что-то на сто, на одной ступени лестницы десятков

- b. Потому что оба чётные
 - c. Потому что оба меньше тысячи и оканчиваются нулём
 - d. Потому что их разница мала
3. Атом имеет поперечник около одной десятимиллиардной метра, а Солнце — около миллиарда метров. Сколько степеней десяти их разделяет?
- a. Девять
 - b. Десять
 - c. Деятнадцать
 - d. Девяносто
4. Какая основная единица уже опирается на крошечную неизменную вещь в природе?
- a. Килограмм — на кремниевый шар
 - b. Ампер — на электроны
 - c. Метр — на металлический брусок
 - d. Секунда — на атом цезия

Ответы

1. **b)** Метрические единицы связаны множителями десять, а обычные идут шагами вроде двенадцати и пяти тысяч двухсот восьмидесяти.
2. **a)** Восемьсот — это восемь на сто, а четыреста пятьдесят — четыре с половиной на сто; оба стоят на ступени сотен.
3. **c)** Десять шагов ведут от атома к одному метру и ещё девять — до Солнца, итого девятнадцать.
4. **d)** Для времени это уже сделано: секунда опирается на колебания атома цезия.

Разобранные примеры

От атома до Солнца шагами по десять Атом имеет поперечник около одной десятиллиардной метра (десять в минус десятой метра), а Солнце — около миллиарда метров (десять в девятой). На сколько порядков величины они различаются?

Каждый порядок величины — один шаг в десять раз.

От атома до одного метра — десять шагов по десять.

От одного метра до миллиарда метров — ещё девять.

Десять плюс девять — девятнадцать.

Ответ: девятнадцать порядков величины

Задачи

1. Сколько граммов в дозе двести пятьдесят миллиграммов?

Подсказка: Милли означает тысячную долю, поэтому разделите на тысячу.

Ответ: Четверть грамма, 0,25 грамма: двести пятьдесят, делённые на тысячу.

2. До города двенадцать километров. Сколько это метров и сколько сантиметров?

Подсказка: Кило означает тысячу; в метре сто сантиметров.

Ответ: Двенадцать тысяч метров и один миллион двести тысяч сантиметров: двенадцать на тысячу, затем на сто.

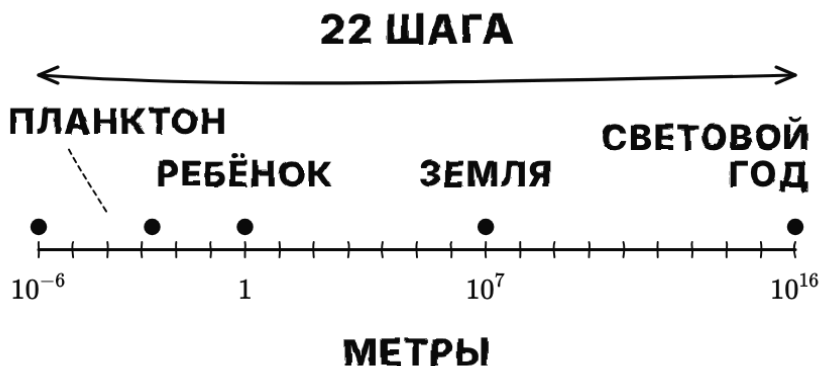
3. Одного ли порядка тридцать и семьдесят? А тридцать и триста?

Подсказка: Запишите каждое как число, умноженное на степень десяти.

Ответ: Тридцать и семьдесят оба стоят на ступени десятков, так что да. Триста — на ступени сотен, на один порядок выше тридцати.

От планктона до галактик и обратно к километрам

Представьте две фотографии рядом. На одной крошечные существа, фитопланктон, дрейфуют среди кристаллов льда в антарктическом море; самые крупные — около двух миллиметров длиной, самые мелкие — всего несколько тысячных миллиметра. На другой сталкиваются два скопления галактик, так далеко, что их свет шёл к нам два целых четыре десятых миллиарда лет. Физика занимается и тем, и другим, и всем, что между ними, и книга использует эти снимки, чтобы вы почувствовали, насколько широк этот диапазон.



Десятки степеней десяти

Чтобы дать о нём представление, в книге есть таблица известных длин, масс и времён, каждое записано степенью десяти. С малой стороны: самая мелкая деталь, которую мы сейчас можем наблюдать, — около миллиардной доли миллиардной доли метра, масса электрона имеет тридцать нулей после запятой до первой значащей цифры, а свет пересекает протон примерно за сотысячную долю миллиардной доли миллиардной доли секунды. В середине — привычные вещи: масса человека в округлении таблицы — около ста килограммов, машины — около тысячи, удар сердца длится около секунды, а рост четырёхлетнего ребёнка — около метра. С большой стороны: Земля имеет поперечник около десяти миллионов метров, свет за год проходит около десяти тысяч миллионов миллионов метров,

а край известной Вселенной находится примерно в ста миллионах миллионов миллионов миллионов метров — единица с двадцатью шестью нулями. Иначе говоря, числа в физике растягиваются на десятки степеней десяти, и один взгляд на таблицу даёт ощущение того, какой круг тем ждёт впереди.

При таком диапазоне нам постоянно приходится переходить от одной единицы к другой. Вы можете готовить по европейской кулинарной книге, где молоко отмеряют литрами, а ваш мерный кувшин размечен чашками. Или пешеходный маршрут может давать расстояния в футах, а вы хотите знать, сколько миль пройдёте. Книга показывает простой и надёжный способ сделать любой такой перевод.

есть: m

нужно: km

$$80 \cancel{\text{ m}} \times \frac{1 \text{ km}}{1000 \cancel{\text{ m}}} = 0.080 \text{ km}$$

Единицы сокращаются, как числа

Возьмём простой пример: перевести восемьдесят метров в километры. Сначала запишите единицу, которая у вас есть, — метры, и единицу, которую хотите получить, — километры. Затем найдите переводной множитель: отношение, которое говорит, сколько одних единиц равно другой. Знакомые примеры — двенадцать дюймов в футах, сто сантиметров в метре, шестьдесят секунд в минуте; здесь — тысяча метров в километре. Затем умножьте то, что у вас есть, на это отношение, записанное так, чтобы ненужная единица сократилась. Восемьдесят метров умножить на один километр на тысячу метров: метры сверху и метры снизу сокращаются, как сокращаются одинаковые числа в дроби, и остаются километры. Восемьдесят, делённое на тысячу, — восемь сотых, значит, восемьдесят метров — это ноль целых ноль восемьдесят тысячных километра.

Опыт

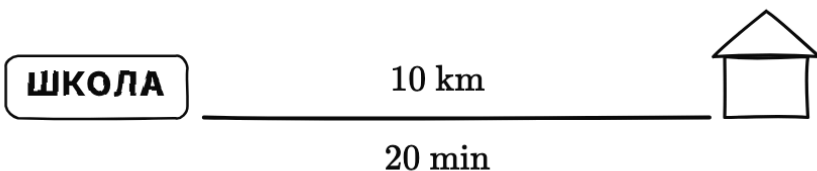
Напишите на листке бумаги «восемьдесят метров». Рядом напишите дробь «один километр на тысячу метров».

Зачеркните слово «метров» над чертой и под ней. Остаются только «километры», а арифметика, восемьдесят на тысячу, говорит, сколько их.

Почему это работает? Потому что отношение одного километра к тысяче метров на самом деле просто единица: числитель и знаменатель — одна и та же длина. Умножение на единицу никогда не меняет величину; оно меняет лишь то, как величина записана. И проверка встроена: если единицы сокращаются не так, как нужно, значит, отношение составлено неверно. Тот же метод работает для любых единиц, и книга отсылает к

приложению с длинным списком переводных множителей. Именно это за кадром делает за вас приложение-конвертер в телефоне.

Затем книга начинает разбор примера. Вы проезжаете десять километров от школы до дома за двадцать минут. Какой была ваша средняя скорость — сначала в километрах в час, а потом в метрах в секунду? План такой: вычислить скорость в данных единицах, а затем перевести её, выбрав переводной множитель, который сократит ненужную единицу и оставит нужную. Средняя скорость, напоминает книга, — это пройденное расстояние, делённое на затраченное время. Десять километров, делённые на двадцать минут, дают полкилометра в минуту. Это вполне правильная скорость, но в неудобной единице, и следующий шаг — перевести минуты в часы.



$$v = \frac{d}{t}$$

$$\frac{10 \text{ km}}{20 \text{ min}} = 0.5 \text{ km/min} \rightarrow \text{ДАЛЕЕ: ЧАСЫ}$$

Десять километров за двадцать минут

Запомним

Физика охватывает десятки степеней десяти — от мельчайшей наблюдаемой детали до края известной Вселенной, как показывает таблица книги. Переводной множитель — это отношение равных количеств в разных единицах, например тысяча метров в километре. Умножьте на множитель так, чтобы ненужная единица сократилась: восемьдесят метров на один километр на тысячу метров дают ноль целых ноль восемьдесят тысячных километра. Множитель на самом деле равен единице, поэтому величина не меняется; меняется лишь её единица. Проехать десять километров за двадцать минут — значит ехать со средней скоростью полкилометра в минуту.

Вопросы

1. Почему умножение на переводной множитель не меняет переводимую величину?
 - a. Потому что множитель всегда очень мал
 - b. Потому что числитель и знаменатель множителя — равные количества, и он равен единице
 - c. Потому что единицы не учитываются
 - d. Потому что переводные множители меняют только число, а не единицу
2. Как понять, что переводной множитель составлен неверно?

- a. Единицы сокращаются не так, как нужно
 - b. Ответ получился целым числом
 - c. Ответ меньше исходного числа
 - d. В множителе есть тысяча
3. Какую среднюю скорость в данных единицах даёт поездка на десять километров за двадцать минут?
- a. Два километра в минуту
 - b. Двадцать километров в час
 - c. Полкилометра в минуту
 - d. Тридцать километров в минуту
4. Что показывает таблица длин, масс и времён из книги?
- a. Что большинство величин около единицы
 - b. Что физика занимается только большими вещами
 - c. Что массы всегда больше длин
 - d. Что физические величины растягиваются на десятки степеней десяти

Ответы

1. **b)** Один километр и тысяча метров — одна и та же длина, поэтому отношение равно единице; умножение на единицу меняет только запись величины.
2. **a)** Проверка встроена: если единицы сокращаются не так, как задумано, отношение составлено неверно.
3. **c)** Средняя скорость — это расстояние, делённое на время: десять на двадцать — полкилометра в минуту.

4. d) От мельчайшей наблюдаемой детали до края Вселенной числа охватывают десятки степеней десяти.

Разобранные примеры

Восемьдесят метров в километрах Переведите восемьдесят метров в километры с помощью переводного множителя.

У нас метры, а нужны километры.

Переводной множитель — один километр на тысячу метров.

Умножаем восемьдесят метров на один километр на тысячу метров; метры сокращаются, остаются километры.

Восемьдесят, делённое на тысячу, — восемь сотых.

Ответ: 0,080 километра

Задачи

1. Переведите два с половиной километра в метры.

Подсказка: Возьмите тысячу метров на километр, чтобы километры сократились.

Ответ: Две тысячи пятьсот метров: два с половиной на тысячу.

2. Сколько секунд в трёх с половиной минутах?

Подсказка: Возьмите шестьдесят секунд на минуту.

Ответ: Двести десять секунд: три с половиной на шестьдесят.

3. Отрезок длиной тридцать шесть дюймов. Сколько это футов?

Подсказка: Возьмите один фут на двенадцать дюймов, чтобы дюймы сократились.

Ответ: Три фута: тридцать шесть, делённые на двенадцать.

Доезжаем до дома

Мы остановились на неудобном ответе: десять километров за двадцать минут — это полкилометра в минуту. Ни один спидометр не показывает километры в минуту. Так как же перевести это в километры в час, а потом в метры в секунду и не запутаться?

$$0.5 \frac{\text{km}}{\text{min}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}}$$

$$0.5 \frac{\text{km}}{\cancel{\text{min}}} \times \frac{60 \cancel{\text{min}}}{1 \text{ h}} = 30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Минуты сокращаются, остаются часы

Приём тот же, что и раньше: умножить на переводной множитель, который сократит ненужную единицу. Минуты не нужны, а в часе шестьдесят минут. Значит, умножаем

полкилометра в минуту на шестьдесят минут в час. Минуты сокращаются, остаются километры в час, а половина на шестьдесят — это тридцать. Средняя скорость — тридцать километров в час.

Затем книга показывает, как проверить такой ответ, в четыре шага. Во-первых, убедитесь, что единицы действительно сократились. Если бы вы перевернули множитель и умножили на один час на шестьдесят минут, ничего бы не сократилось; вы получили бы километры, умноженные на часы и делённые на минуты в квадрате, а это явно не скорость в километрах в час. Во-вторых, проверьте, что итоговая единица та, о которой просили: километры в час — так и есть. В-третьих, проверьте цифры: у расстояния, десяти целых ноля десятых, и у времени, двадцати целых ноля десятых, по три значащие цифры, значит, и в ответе, тридцати целых ноля десятых, их тоже должно быть три. Шестьдесят здесь ничего не ограничивает, потому что час по определению равен ровно шестидесяти минутам, так что этот множитель абсолютно точен. В-четвёртых, спросите себя, разумен ли ответ. Двадцать минут — треть часа; за целый час вы проехали бы втрое дальше, трижды десять километров, то есть тридцать. Ответ имеет смысл. Такую скорость спидометр вашей машины мог бы показывать на медленной дороге через город.

Теперь вторая просьба: метры в секунду. Начните с тридцати километров в час и возьмите два переводных множителя: один переводит часы в секунды, другой — километры в метры. В часе три тысячи шестьсот секунд, а в километре тысяча метров. Умножьте тридцать на тысячу и разделите на три тысячи шестьсот — получится около восьми целых тридцати трёх сотых метра в секунду. Если бы вы начали с полкилометра в минуту,

понадобились бы другие множители, шестьдесят секунд в минуте и тысяча метров в километре, но вы пришли бы к тому же самому ответу. Иначе говоря, путь может быть разным, но правильные переводы всегда приводят в одно место.

$$30 \frac{\cancel{\text{km}}}{\cancel{\text{h}}} \times \frac{1000 \text{ m}}{1 \cancel{\text{km}}} \times \frac{1 \cancel{\text{h}}}{3600 \text{ s}}$$

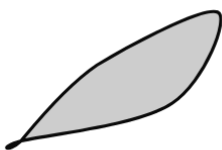
$$\approx 8.33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Километры в час в метры в секунду

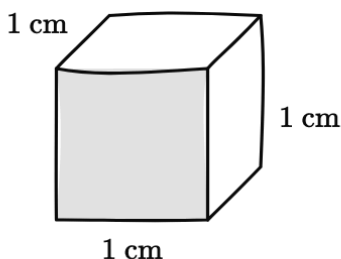
Почему ответы даны с тремя цифрами, а не со всеми, что показывает калькулятор? Книга ставит этот вопрос здесь и обещает ответить на него в следующем разделе — о точности, прецизионности и значащих цифрах.

Дальше — замечание о любопытных единицах. Кроме привычных, есть малоизвестные единицы, например фиркин, которым когда-то мерили пиво; один фиркин — около тридцати

четырёх литров. Книга предлагает поискать старые меры веса и длины, например ячменное зерно, и выяснить, как каждая соотносится с метрическими единицами.



$$\frac{1}{50} \text{ s} = 20 \text{ ms}$$



$$1 \text{ cm}^3 = 1 \text{ mL}$$

Миллилитр — маленький кубик

Раздел завершают два коротких вопроса. Некоторые колибри взмахивают крыльями больше пятидесяти раз в секунду. Чтобы засечь один взмах, учёный взял бы основную единицу времени, секунду, но подходящего малого размера: миллисекунду, тысячную долю секунды. Пятьдесят взмахов за секунду означают, что каждый взмах длится пятидесятую долю секунды, то есть двадцать миллисекунд. Второй вопрос: один кубический сантиметр равен одному миллилитру. О чём это говорит? О том, что единица объёма, литр, построена из единицы длины;

миллилитр — это просто маленький кубик со стороной в один сантиметр. Мерный стаканчик к бутылке сиропа от кашля, размеченный в миллилитрах, на самом деле отмеряет маленькие кубики сантиметров.

Запомним

Полкилометра в минуту, умноженные на шестьдесят минут в час, — это тридцать километров в час; минуты сокращаются. Проверяйте каждый перевод: единицы сокращаются, итоговая единица верна, цифры соответствуют данным, а ответ разумен. Тридцать километров в час — это около восьми целых тридцати трёх сотых метра в секунду, если взять три тысячи шестьсот секунд в часе и тысячу метров в километре. Взмах крыльев колибри, пятидесятую долю секунды, лучше всего засекать в миллисекундах: их двадцать. Один кубический сантиметр равен одному миллилитру, потому что объём — единица, производная от длины.

Вопросы

1. Почему множитель «шестьдесят минут в часе» не ограничивает число значащих цифр в ответе?
 - а. Потому что шестьдесят — круглое число
 - б. Потому что час по определению равен ровно шестидесяти минутам, и множитель абсолютно точен

- c. Потому что минуты сокращаются
 - d. Потому что ответ дан в часах
2. Как в лекции проверяют, что тридцать километров в час — разумный ответ?
- a. Двадцать минут — треть часа, значит, за час вы проехали бы трижды десять километров
 - b. Сравнивая со скоростью света
 - c. Считая цифры
 - d. Переводя в метры в секунду
3. Что будет с ответом в метрах в секунду, если начать с полкилометра в минуту, а не с тридцати километров в час?
- a. Он получится в шестьдесят раз больше
 - b. Он получится в других единицах
 - c. Он будет тем же, около восьми целых тридцати трёх сотых метра в секунду
 - d. Его нельзя будет найти
4. Почему учёный засекал бы один взмах крыльев колибри в миллисекундах?
- a. Потому что миллисекунда — основная единица времени
 - b. Потому что взмах длится несколько секунд
 - c. Потому что миллисекунды точнее секунд
 - d. Потому что каждый взмах длится лишь пятидесятую долю секунды, двадцать тысячных

Ответы

1. б) Час по определению равен ровно шестидесяти минутам, поэтому в множителе нет погрешности измерения.

2. а) За целый час вы проехали бы втрое дальше, чем за двадцать минут: тридцать километров.

3. с) Понадобятся другие множители, но правильные переводы всегда приводят к одному ответу.

4. d) При пятидесяти взмахах в секунду каждый длится двадцать миллисекунд — удобный размер для такого быстрого события.

Разобранные примеры

Дорога домой в километрах в час и в метрах в секунду Вы проезжаете десять километров за двадцать минут. Какова ваша средняя скорость в километрах в час и в метрах в секунду?

Расстояние, делённое на время: десять километров за двадцать минут — это полкилометра в минуту.

Умножаем на шестьдесят минут в часе; минуты сокращаются, получается тридцать километров в час.

Для метров в секунду умножаем тридцать на тысячу метров в километре и делим на три тысячи шестьсот секунд в часе.

Тридцать тысяч, делённые на три тысячи шестьсот, — около восьми целых тридцати трёх сотых.

Ответ: тридцать километров в час, около восьми целых тридцати трёх сотых метра в секунду

Задачи

1. Вы проезжаете на велосипеде шесть километров за пятнадцать минут. Какова ваша средняя скорость в километрах в час?

Подсказка: Сначала найдите километры в минуту, затем умножьте на шестьдесят минут в часе.

Ответ: Двадцать четыре километра в час: шесть на пятнадцать — ноль целых четыре десятых километра в минуту, на шестьдесят — двадцать четыре.

2. Переведите семьдесят два километра в час в метры в секунду.

Подсказка: Умножьте на тысячу метров в километре и разделите на три тысячи шестьсот секунд в часе.

Ответ: Двадцать метров в секунду: семьдесят две тысячи, делённые на три тысячи шестьсот.

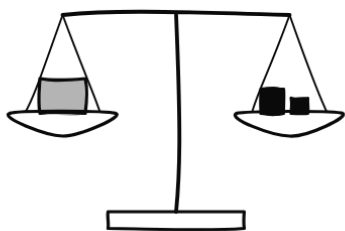
3. Сколько миллилитров в кубе со стороной пять сантиметров?

Подсказка: Один кубический сантиметр — один миллилитр; найдите объём в кубических сантиметрах.

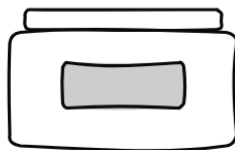
Ответ: Сто двадцать пять миллилитров: пять на пять на пять кубических сантиметров.

Близко к истине, близко друг к другу

Встаньте на напольные весы три раза подряд. Показывают ли они каждый раз одно и то же число? И даже если да, это ли ваш настоящий вес? Это два разных вопроса, и эта часть — о разнице между ними.



0.1 g



0.001 g

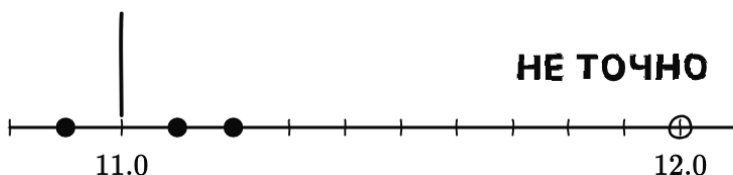
Весы с чашами против электронных

Книга начинается с двух картинок. Первая — старые рычажные весы с двумя чашами: неизвестный предмет кладут на одну чашу, а металлические гири известной массы, например в один грамм, десять граммов и сто граммов, — на другую, пока коромысло

между чашами не встанет ровно и массы не сравниваются. Вторая — электронные весы, которые заменили многие такие весы с чашами. Механические весы могут показывать лишь с точностью до десятой доли грамма, а многие электронные — до тысячной доли грамма. Ваши кухонные весы, наверное, показывают с точностью до грамма: для муки годится, но для дозы лекарства слишком грубо.

Наука стоит на наблюдении и опыте, то есть на измерениях, а любое измерение можно оценить двумя способами. Первый — точность: насколько измерение близко к правильному значению. Пример книги — лист стандартной офисной бумаги, который продаётся как лист длиной одиннадцать целых ноль десятых дюйма. Вы измеряете его три раза и получаете одиннадцать целых одну десятую, одиннадцать целых две десятых и десять целых девять десятых дюйма. Все три близки к одиннадцати целым ноль десятым, так что измерения довольно точны. Показание в двенадцать дюймов точным бы не было.

ИСТИНА 11,0



НЕ ТОЧНО

РАЗБРОС 0,3

ДЮЙМЫ

Три показания для 11 дюймов

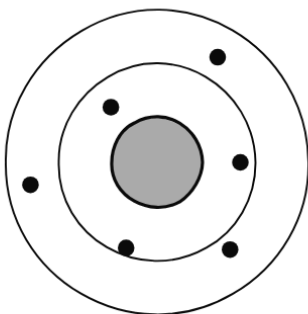
Второй — прецизионность, или кучность: насколько согласуются друг с другом повторные измерения, сделанные одним и тем же способом. Один простой способ её оценить — размах, разница между самым маленьким и самым большим показанием. Для бумаги наименьшее было десять целых девять десятых дюйма, а наибольшее — одиннадцать целых две десятых, значит, показания различаются не больше чем на три десятых дюйма. Они довольно прецизионны, потому что не сильно разбегаются. Если бы вы намерили десять целых девять десятых, одиннадцать целых одну десятую и одиннадцать целых девять десятых, размах был бы целым дюймом, и кучность измерений была бы невысокой. Иначе говоря, точность спрашивает «насколько

близко к цели?», а прецизионность — «насколько близко друг к другу?».

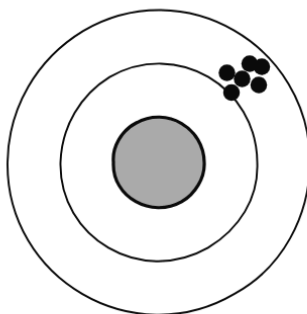
Опыт

Измерьте ширину стола рулеткой пять раз, записывая каждое показание с точностью до миллиметра. Вычтите наименьшее показание из наибольшего: этот размах показывает вашу прецизионность. Затем сравните ваше среднее с шириной, указанной в инструкции к столу, если она у вас есть: близость покажет вашу точность.

Эти два качества не обязательно идут вместе. Книга берёт навигационную систему, которая пытается найти ресторан. Представьте ресторан как яблочко в центре мишени, а каждую попытку определить его место — как чёрную точку. На первой картинке точки сильно разбросаны, но равномерно лежат вокруг центра. Это низкая прецизионность, но высокая точность: ни одной отдельной засечке верить нельзя, но в среднем они указывают на правильное место. На второй картинке точки плотно сбились в кучку, но кучка лежит далеко в стороне от яблочка. Это высокая прецизионность, но низкая точность: система исправно повторяет сама себя, но исправно ошибается. Когда синяя точка на карте телефона прыгает по улице, у неё низкая прецизионность; когда она спокойно стоит не на том квартале — низкая точность.



**ТОЧНО,
НЕ КУЧНО**



**КУЧНО,
НЕ ТОЧНО**

Точно или кучно

Измерения бумаги, напротив, были и точными, и прецизионными: близкими к одиннадцати дюймам и близкими друг к другу. К этому и стремится любое хорошее измерение.

Запомним

Точность — это то, насколько измерение близко к правильному значению; прецизионность — насколько согласуются повторные измерения. Показания бумаги в одиннадцать целых одну десятую, одиннадцать целых две десятых и десять целых девять десятых дюйма точны, потому что близки к одиннадцати, и прецизионны, потому что их размах всего три десятых дюйма. Размах между наименьшим и наибольшим показанием — простая мера прецизионности. Засечки навигации, разбросанные вокруг цели, точны, но не прецизионны; засечки, сбившиеся в стороне от неё, прецизионны, но не точны. Электронные весы, показывающие до тысячной доли грамма, прецизионнее весов, показывающих до десятой.

Вопросы

1. Напольные весы каждый раз показывают один и тот же неправильный вес. Как их описать?
 - a. Точные, но не прецизионные
 - b. Прецизионные, но не точные
 - c. И точные, и прецизионные
 - d. Ни то ни другое, раз они повторяются
2. Бумага, продающаяся как лист длиной одиннадцать дюймов, при измерении даёт одиннадцать целых одну

десятую, одиннадцать целых две десятых и десять целых девять десятых. Почему эти измерения точны?

- a. Потому что все три близки к правильным одиннадцати дюймам
 - b. Потому что все они разные
 - c. Потому что их три
 - d. Потому что их измеряли линейкой
3. Засечки навигации сильно разбросаны, но равномерно лежат вокруг ресторана. О чём это говорит?
- a. Высокая прецизионность и высокая точность
 - b. Высокая прецизионность, но низкая точность
 - c. Низкая прецизионность, но высокая точность
 - d. Ни прецизионности, ни точности

Ответы

1. **b)** Показания, согласующиеся друг с другом, прецизионны; удалённость от истинного значения делает их неточными.
2. **a)** Точность — это близость к правильному значению, а все три показания близки к одиннадцати целым ноль десятых дюйма.
3. **c)** Разбросанные точки означают низкую прецизионность; то, что их центр совпадает с целью, означает высокую точность.

Разобранные примеры

Оцениваем прецизионность по размаху Три измерения листа бумаги дали одиннадцать целых одну десятую, одиннадцать целых две десятых и десять целых девять десятых дюйма. Каков их размах и прецизионны ли они?

Размах — это наибольшее показание минус наименьшее.

Наибольшее — одиннадцать целых две десятых дюйма, наименьшее — десять целых девять десятых.

Одиннадцать целых две десятых минус десять целых девять десятых — три десятых дюйма.

Показания разбегаются не больше чем на три десятых дюйма, так что они довольно прецизионны.

Ответ: три десятых дюйма; довольно прецизионны

Задачи

1. Измерения того же листа дали десять целых девять десятых, одиннадцать целых одну десятую и одиннадцать целых девять десятых дюйма. Каков размах и как он соотносится с первым набором?

Подсказка: Вычтите наименьшее из наибольшего.

Ответ: Один дюйм: одиннадцать целых девять десятых минус десять целых девять десятых. Это больше чем втрое превышает первый размах, так что эти показания гораздо менее прецизионны.

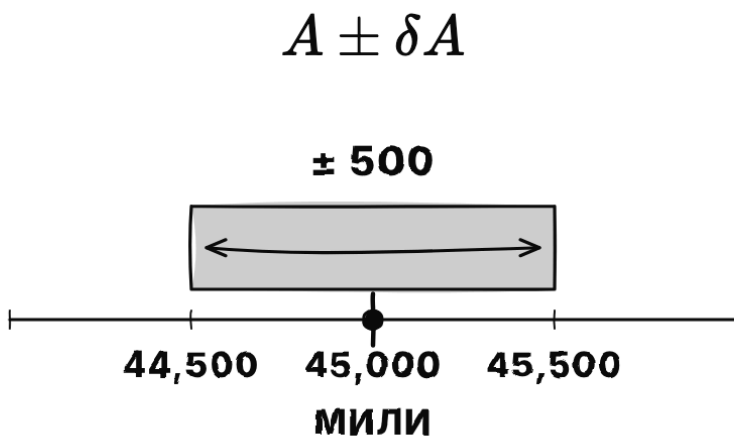
2. Кухонные весы пять раз взвешивают пакет сахара, продающийся как один килограмм: тысяча четыре, тысяча пять, тысяча четыре, тысяча пять, тысяча четыре грамма. Показания точны, прецизионны или и то и другое?

Подсказка: Проверьте размах, а затем насколько показания далеки от тысячи граммов.

Ответ: И то и другое: размах всего один грамм, значит, они прецизионны, а каждое показание отличается от тысячи не больше чем на пять граммов, значит, они близки к ожидаемому значению.

Плюс-минус

Кто-то спрашивает, сколько проехала ваша машина. Вы смотрите на одометр и говорите: «Около сорока пяти тысяч миль, плюс-минус пятьсот». Сами того не заметив, вы только что дали измерение вместе с его погрешностью.



Плюс-минус пятьсот

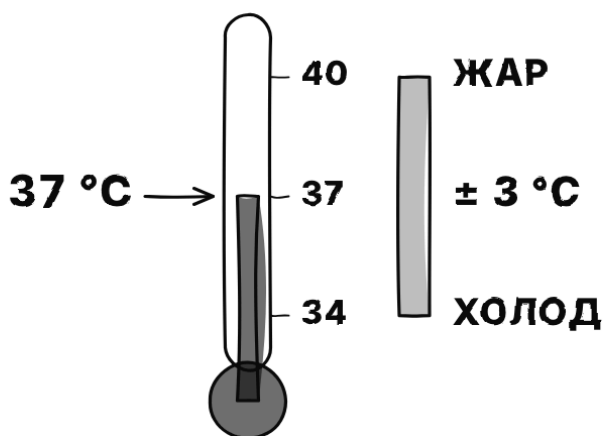
Точность и прецизионность, говорит книга, обе проявляются в одном числе, которое называют погрешностью. Погрешность — это мера того, насколько измеренные значения могут отклоняться от эталонного или ожидаемого значения. Если

измерения не очень точны или не очень прецизионны, погрешность велика. Проще говоря, погрешность — это оговорка, приложенная к измерению. «Сорок пять тысяч миль, плюс-минус пятьсот» значит, что настоящее число может быть и всего сорок четыре тысячи пятьсот, и целых сорок пять тысяч пятьсот, или где-то между ними. У любого измерения есть какая-то погрешность; для листа бумаги из прошлого примера можно сказать: одиннадцать дюймов, плюс-минус две десятых дюйма. Учёные часто записывают погрешность греческой буквой дельта перед величиной — читается «дельта А» — и записывают результат как значение плюс-минус эта дельта.

Откуда берётся погрешность? Книга называет четыре источника. У измерительного инструмента есть пределы: самое мелкое деление линейки может быть десятой долей дюйма. У того, кто измеряет, ограниченное умение: возможно, у него плохое зрение. Сам предмет может быть неровным: одна сторона листа может быть чуть длиннее другой. И есть другие факторы, которые зависят от ситуации. Честная погрешность получается, если внимательно продумать их все и то, насколько каждый может повлиять.

Почему это важно? Пример книги — ребёнок с температурой. Вы измеряете ребёнку температуру, и градусник показывает тридцать семь градусов Цельсия, нормальную температуру тела. Но допустим, погрешность градусника — три градуса. Тогда настоящая температура может быть где угодно от тридцати четырёх градусов, опасно низкой, до сорока градусов, опасно высокой. Такой градусник был бы бесполезен. Вот почему для дозы лекарства или измерения температуры нужен прибор,

погрешность которого мала по сравнению с теми различиями, что имеют значение.



Бесполезный градусник

Есть изящный способ сравнивать погрешности совсем разных измерений — относительная погрешность в процентах. Словами: разделите погрешность на измеренное значение, затем умножьте на сто процентов. Она говорит, насколько велика погрешность по сравнению с тем, что измеряют.

$$\% \text{ погр.} = \frac{\delta A}{A} \times 100\%$$

4.8

5.3

4.9

5.4

среднее = 5,1 фунта

$$\frac{0.4}{5.1} \times 100\% \approx 8\%$$

**ПОЛПАКЕТА:
ОКОЛО 16%**

Относительная погрешность яблок

Книга разбирает пример с яблоками. Магазин продаёт пакеты по пять фунтов. Четыре недели вы покупаете по пакету в неделю и взвешиваете его: четыре целых восемь десятых, пять целых три десятых, четыре целых девять десятых и пять целых четыре десятых фунта. Из других измерений вы уже знаете, что погрешность среднего веса — четыре десятых фунта. Сначала среднее: сложите четыре веса — получится двадцать целых четыре десятых, — и разделите на четыре, что даёт пять целых одну десятую фунта. Это согласуется с пятью фунтами на этикетке в пределах погрешности в четыре десятых. Теперь относительная погрешность: четыре десятых, делённые на пять целых одну десятую, — около восьми сотых, а умножив на сто процентов, получаем около восьми процентов. Итак, пакет весит

пять фунтов, плюс-минус восемь процентов. На ваших кухонных весах восемь процентов от пятифунтового пакета — это примерно вес одного небольшого яблока.

Книга добавляет вопрос для размышления: что, если бы пакет был вдвое легче, а погрешность осталась четыре десятых фунта? Та же погрешность, делённая на вдвое меньшее значение, делает относительную погрешность примерно вдвое больше. Иначе говоря, одна и та же небольшая ошибка значит больше, когда измеряемое мало. И практическое предупреждение: всегда не забывайте умножать дробь на сто процентов, иначе у вас получится десятичная дробь, а не проценты.

Запомним

Погрешность говорит, насколько измерение может отклоняться от истинного или ожидаемого значения; её записывают как плюс-минус некоторое количество. Она возникает из-за пределов инструмента, умения человека, неровностей предмета и других факторов. Градусник с погрешностью в три градуса был бы бесполезен для проверки температуры. Относительная погрешность — это погрешность, делённая на измеренное значение, умноженная на сто процентов. Четыре пакета со средним весом пять целых одна десятая фунта при погрешности четыре десятых фунта дают около восьми процентов.

Вопросы

1. Почему градусник с погрешностью в три градуса бесполезен для проверки температуры?
 - a. Потому что он показывает в градусах Цельсия
 - b. Потому что нормальное показание может означать что угодно — от опасно низкой до опасно высокой температуры
 - c. Потому что три градуса — это слишком точно
 - d. Потому что температура тела никогда не меняется
2. Что говорит относительная погрешность такого, чего не говорит просто погрешность?
 - a. Насколько велика погрешность по сравнению с измеряемым
 - b. Точное истинное значение
 - c. Каким прибором пользовались
 - d. Сколько раз повторяли измерение
3. Что будет с относительной погрешностью, если пакет станет вдвое легче, а погрешность останется той же?
 - a. Она уменьшится вдвое
 - b. Она не изменится
 - c. Она примерно удвоится
 - d. Она станет нулевой
4. Что из этого — один из четырёх источников погрешности, названных в книге?
 - a. Цвет предмета
 - b. Цена прибора
 - c. Время суток

d. Неровности измеряемого предмета

Ответы

1. **b)** Показание тридцать семь градусов может означать что угодно от тридцати четырёх до сорока, так что оно ничего полезного не говорит.
2. **a)** Деление погрешности на измеренное значение показывает её размер относительно измерения.
3. **c)** Та же погрешность, делённая на вдвое меньшее значение, даёт примерно вдвое большую долю.
4. **d)** Четыре источника — пределы инструмента, умение человека, неровности предмета и другие факторы, зависящие от ситуации.

Разобранные примеры

Пакет яблок Четыре пятифунтовых пакета яблок весят четыре целых восемь десятых, пять целых три десятых, четыре целых девять десятых и пять целых четыре десятых фунта, а погрешность среднего — четыре десятых фунта. Каковы средний вес и относительная погрешность?

Сложите веса: четыре целых восемь десятых плюс пять целых три десятых плюс четыре целых девять десятых плюс пять целых четыре десятых — двадцать целых четыре десятых фунта.

Разделите на четыре: среднее — пять целых одна десятая фунта.

Разделите погрешность на среднее: четыре десятых на пять целых одну десятую — около восьми сотых.

Умножьте на сто процентов: около восьми процентов.

Ответ: пять целых одна десятая фунта, около восьми процентов

Задачи

1. Пробег машины указан как сорок пять тысяч миль, плюс-минус пятьсот. Каким может быть наименьший и наибольший истинный пробег и какова относительная погрешность?

Подсказка: Вычтите и прибавьте погрешность; затем разделите её на значение и умножьте на сто процентов.

Ответ: От сорока четырёх тысяч пятисот до сорока пяти тысяч пятисот миль. Пятьсот, делённые на сорок пять тысяч, — около одной сотой, то есть около одного процента.

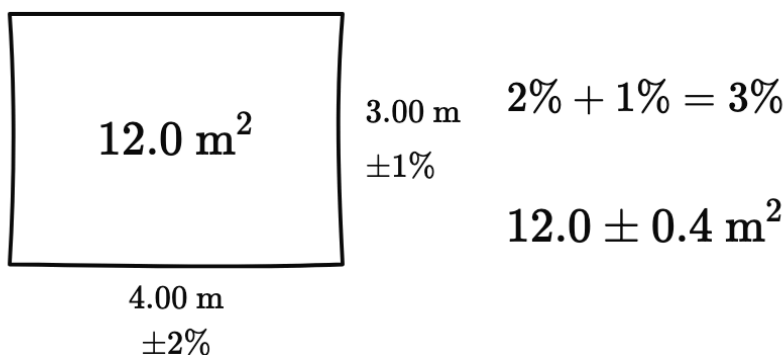
2. Длина измерена как двадцать сантиметров, плюс-минус полсантиметра. Какова её относительная погрешность?

Подсказка: Разделите полсантиметра на двадцать сантиметров, затем умножьте на сто процентов.

Ответ: Два с половиной процента: половина, делённая на двадцать, — одна сороковая, а это два с половиной процента.

Погрешность переходит дальше, а цифры говорят

Вы измеряете пол, чтобы купить ковровин: четыре метра в длину и три в ширину. Ни одно из измерений не идеально. Так насколько можно быть уверенным в площади, которую вы по ним вычислите?



Погрешности складываются

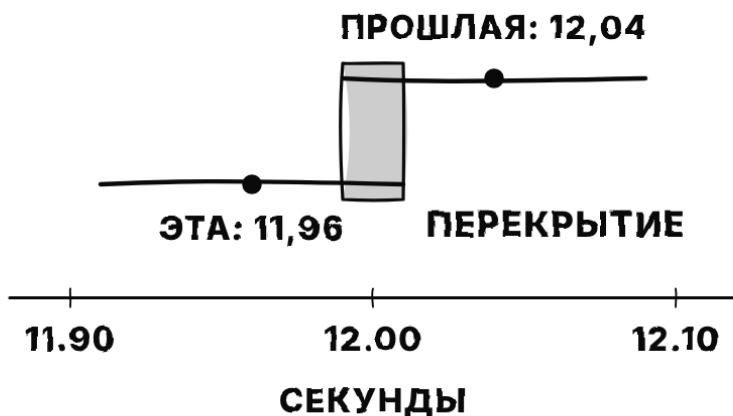
Всё, что вычислено из измеренных величин, наследует их погрешность. Площадь пола, вычисленная по длине и ширине, неопределённая, потому что неопределёнными длина и ширина.

Книга даёт простое правило для умножения и деления — при условии, что погрешность каждого измерения мала, несколько процентов или меньше. Словами: относительная погрешность результата равна сумме относительных погрешностей измерений, из которых он получен.

Вот пол. Длина — четыре целых ноль сотых метра с погрешностью два процента, ширина — три целых ноль сотых метра с погрешностью один процент. Площадь — четыре на три, двенадцать целых ноль десятых квадратного метра. Её относительная погрешность — два процента плюс один процент, то есть три процента. Три процента от двенадцати квадратных метров — это три сотых от двенадцати, тридцать шесть сотых квадратного метра. Поскольку площадь дана с точностью до десятой квадратного метра, это округляется до четырёх десятых. Почему складывать? Потому что каждая ошибка растягивает или сжимает результат на свою долю, а в худшем случае обе тянут в одну сторону. Когда вы покупаете ковролин, эти четыре десятых квадратного метра — повод заказать чуть больше.

Затем книга задаёт острый вопрос. Тренер по лёгкой атлетике покупает новый секундомер, в инструкции к которому сказано, что его погрешность — пять сотых секунды. Лучший спринтер команды на прошлой неделе пробежал сто метров за двенадцать целых четыре сотых секунды, а на этой — за одиннадцать целых девяносто шесть сотых. Был ли забег этой недели быстрее? Времена различаются на восемь сотых секунды. Но каждое показание может ошибаться на пять сотых, так что время прошлой недели на деле могло быть всего одиннадцать целых девяносто девять сотых, а время этой недели — целых двенадцать целых одна сотая. Интервалы перекрываются. Ответ книги: нет,

секундомер слишком неточен, чтобы различить эти два времени. Иначе говоря, разница что-то значит, только если она больше погрешности.

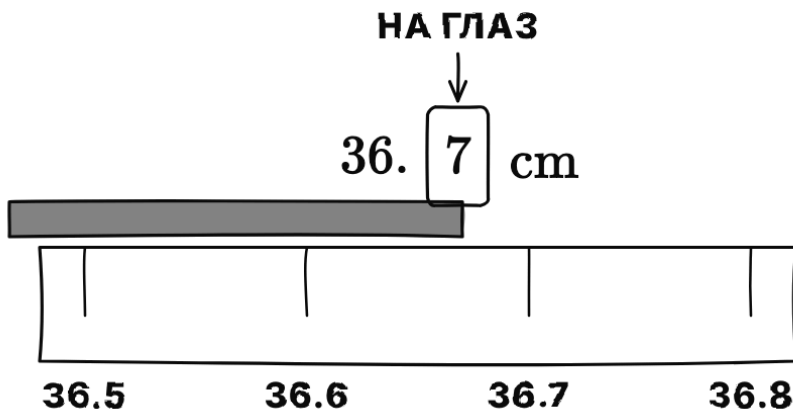


Два времени, которые не различить

Это приводит к прецизионности самого инструмента. Прецизионный инструмент измеряет очень мелкими шагами. Обычная линейка показывает с точностью до миллиметра, а штангенциркуль — раздвижной измеритель с тонкими губками — с точностью до сотой доли миллиметра. Штангенциркуль — более прецизионный инструмент, потому что улавливает гораздо меньшие различия в длине. Чем прецизионнее инструмент, тем прецизионнее и точнее могут быть измерения.

линейка: 1 мм

штангенциркуль: 0,01 мм



3 ЗНАЧАЩИЕ ЦИФРЫ

Последняя цифра — догадка

Опыт

Положите палочку вдоль линейки и внимательно посмотрите на её конец. Скорее всего, он окажется между двумя миллиметровыми отметками, скажем между тридцатью шестью целыми шестью десятыми и тридцатью шестью целыми семью десятыми сантиметра. Вам приходится судить, какая ближе, и вы, может быть, запишете тридцать шесть целых семь десятых. Эта последняя цифра — ваша лучшая оценка, а не уверенность.

Вот в чём суть значащих цифр. Записывать можно ровно столько цифр, сколько на самом деле измерил ваш инструмент. По линейке можно записать тридцать шесть целых семь десятых сантиметра, но не тридцать шесть целых семьдесят одну сотую, потому что линейка не может измерить сотые доли сантиметра. Последняя записанная цифра — всегда первая, в которой есть сомнение. Чтобы сосчитать значащие цифры, начните с первой измеренной цифры слева и считайте до последней записанной цифры справа. В числе тридцать шесть целых семь десятых три значащие цифры. Так что число значащих цифр говорит, насколько прецизионным был измерительный инструмент.

Запомним

Всё, что вычислено из измерений, несёт их погрешность. При умножении и делении небольшие относительные погрешности складываются: два процента и один процент дают три процента. Пол четыре на три метра имеет площадь двенадцать квадратных метров с погрешностью около четырёх десятых. Секундомер с погрешностью пять сотых секунды не может отличить двенадцать целых четыре сотых от одиннадцати целых девяноста шести сотых. Записывайте только цифры, которые измерил ваш инструмент; последняя из них — первая недостоверная, а число цифр показывает прецизионность инструмента.

Вопросы

1. Когда вы перемножаете два измерения с небольшими погрешностями, как найти относительную погрешность результата?
 - a. Перемножить их относительные погрешности
 - b. Сложить их относительные погрешности
 - c. Взять только бóльшую
 - d. Не учитывать их, раз умножение убирает погрешность
2. Почему тренер не может сказать, что двенадцать целых четыре сотых секунды и одиннадцать целых девяносто шесть сотых — разные времена?
 - a. Потому что каждое показание может ошибаться на пять сотых, и возможные интервалы перекрываются
 - b. Потому что спринтер бежал разные дистанции
 - c. Потому что секундомеры показывают только целые секунды
 - d. Потому что восемь сотых — большая разница
3. Почему показание линейки нельзя записать как тридцать шесть целых семьдесят одна сотая сантиметра?
 - a. Потому что линейки неточны
 - b. Потому что два знака после запятой запрещены
 - c. Потому что линейка не может измерить сотые доли сантиметра
 - d. Потому что палочка слишком коротка
4. Что означает последняя записанная цифра измерения?
 - a. Цифру, известную наверняка
 - b. Цифру, переписанную с этикетки

- c. Ошибку округления, которую надо игнорировать
- d. Первую цифру, в которой есть сомнение

Ответы

- 1. **b)** Относительная погрешность произведения или частного равна сумме относительных погрешностей исходных величин.
- 2. **a)** Время прошлой недели могло быть всего одиннадцать целых девяносто девять сотых, а время этой — целых двенадцать целых одна сотая.
- 3. **c)** Записывать можно столько цифр, сколько измерил инструмент, а линейка показывает до миллиметра.
- 4. **d)** Последняя записанная цифра — всегда первая недостоверная: ваша лучшая оценка.

Разобранные примеры

Погрешность площади пола Пол длиной четыре целых ноль сотых метра с погрешностью два процента и шириной три целых ноль сотых метра с погрешностью один процент. Найдите его площадь и погрешность в квадратных метрах.

Площадь — длина, умноженная на ширину: четыре на три — двенадцать целых ноль десятых квадратного метра.

При умножении относительные погрешности складываются: два процента плюс один процент — три процента.

Три процента от двенадцати — тридцать шесть сотых квадратного метра.

Площадь дана с точностью до десятых, поэтому округляем до четырёх десятых.

Ответ: двенадцать целых ноль десятых квадратного метра, плюс-минус около четырёх десятых

Задачи

1. Прямоугольник измерен как пять метров на два метра с погрешностями три процента и два процента. Какова площадь и её относительная погрешность?

Подсказка: Перемножьте стороны, затем сложите проценты.

Ответ: Десять квадратных метров с погрешностью пять процентов, то есть плюс-минус полкватдратного метра.

2. Сколько значащих цифр в числе тридцать шесть целых семь десятых сантиметра и что это говорит об инструменте?

Подсказка: Считайте от первой измеренной цифры до последней записанной.

Ответ: Три; последняя цифра — в десятых долях сантиметра, значит, инструмент, линейка, показывает с точностью до миллиметра.

Нули и честные ответы

Наберите на калькуляторе одна целая две десятых, умноженное на одну целую две десятых и на пи, и он гордо покажет четыре целых пять миллионов двести тридцать восемь тысяч девятьсот тридцать четыре десятимиллионных. Восемь цифр. Но если вы измерили одну целую две десятых простой рулеткой, все ли эти цифры настоящие? Книга отвечает «нет», и эта часть показывает, как понять, какие цифры оставить.

ЗНАЧАЩИЕ ЦИФРЫ

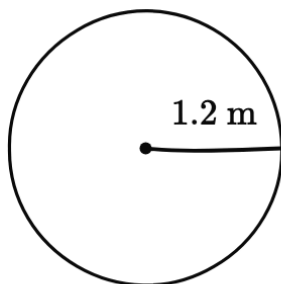
0.0009	1
15 450.0	6
6×10^3	1
87.990	5
30.42	4

Какие нули считаются

Сначала коварная цифра: ноль. В числе ноль целых пятьдесят три тысячных нули лишь показывают, где стоит запятая; они держат место, а не измерены. Так что в ноль целых пятидесяти трёх тысячных всего две значащие цифры — пять и три. В числе десять целых пятьдесят три тысячных нули стоят между измеренными цифрами, поэтому они считаются: пять значащих цифр. Число вроде тысячи трёхсот неоднозначно. Его нули могут означать, что оно измерено до последней единицы, а могут просто держать место, так что значащих цифр может быть две, три или четыре. Чтобы снять сомнение, запишите его в стандартном виде — как число, умноженное на степень десяти. Коротко правило такое: нули значащие, кроме тех случаев, когда они лишь держат место.

Книга предлагает пять чисел для тренировки. В ноль целых девяти десятитысячных одна значащая цифра, потому что нули лишь ставят запятую на место. В пятнадцати тысячах четырёхстах пятидесяти целых ноль десятых — шесть, потому что нули показывают, что измерение сделано до десятых. В шести, умноженных на десять в кубе, — одна; степень десяти лишь ставит запятую на место. В восьмидесяти семи целых девятистах девяноста тысячных — пять, потому что последний ноль показывает измерение до тысячных. А в тридцати целых сорока двух сотых — четыре, потому что ноль между значащими цифрами считается.

Теперь — объединение измерений. Результат не может быть прецизионнее самого грубого измерения, которое в него вошло. Правил два.



СЛАБОЕ ЗВЕНО

4.523893



4.5 m²

2 ЗНАЧ. ЦИФРЫ

Слабое звено: радиус

При умножении и делении оставляйте столько значащих цифр, сколько их у исходного числа с наименьшим их количеством. Возьмём площадь круга: π , умноженное на радиус и ещё раз на радиус. Если радиус одна целая две десятых метра, две значащие цифры, то калькуляторные четыре целых пять миллионов двести тридцать восемь тысяч девятьсот тридцать четыре десятиллионных квадратного метра нужно урезать до четырёх целых пяти десятых квадратного метра. π известно с гораздо большим числом цифр, но это не помогает: слабое звено — радиус. Это как рецепт, где сказано «примерно стакан» муки: если взвесить сахар до миллиграмма, торт точнее не станет.

При сложении и вычитании правило касается не значащих цифр, а знаков после запятой. В ответе может быть не больше знаков после запятой, чем у самого грубого измерения. Пример книги: вы покупаете семь целых пятьдесят шесть сотых килограмма картофеля на весах магазина, которые показывают до сотых. Шесть целых пятьдесят две тысячных килограмма вы оставляете в лаборатории, взвесив их на весах, показывающих до тысячных. Потом дома вы добавляете тринадцать целых семь десятых килограмма, взвешенных на напольных весах, которые показывают только до десятых. Семь целых пятьдесят шесть сотых минус шесть целых пятьдесят две тысячных плюс тринадцать целых семь десятых — это пятнадцать целых двести восемь тысячных килограмма. Самое грубое измерение, тринадцать целых семь десятых, известно только до десятых, поэтому ответ округляют до десятых: пятнадцать целых две десятых килограмма. Иначе говоря, цепочка взвешиваний точно ровно настолько, насколько точны самые грубые весы в ней.

$$\begin{array}{r}
 7.56 \\
 - 6.052 \\
 + 13.7 \\
 \hline
 15.208
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \\
 \\
 \text{ЛИШЬ ДЕСЯТЫЕ} \\
 \longrightarrow 15.2 \text{ kg}
 \end{array}$$

Решают самые грубые весы

Запомним

Нули, которые лишь ставят запятую на место, не значащие; нули между цифрами или измеренные в конце после запятой — значащие. Число вроде тысячи трёхсот неоднозначно; стандартный вид снимает сомнение. При умножении и делении оставляйте столько значащих цифр, сколько у самого грубого исходного числа: радиус одна целая две десятых метра даёт площадь четыре целых пять десятых квадратного метра. При сложении и вычитании оставляйте столько знаков после запятой, сколько у самого грубого исходного числа: картофеля всего пятнадцать целых две десятых килограмма. Ответ никогда не должен претендовать на большую прецизионность, чем его измерения.

Вопросы

1. Почему в ноль целых пятидесяти трёх тысячных всего две значащие цифры?
 - a. Потому что это число меньше единицы
 - b. Потому что его нули лишь отмечают, где стоит запятая
 - c. Потому что пятёрка недостоверна
 - d. Потому что нули никогда не считаются
2. Радиус круга — одна целая две десятых метра. Почему его площадь указывают как четыре целых пять десятых

квадратного метра?

- a. Потому что у радиуса две значащие цифры, и результат сохраняет две
 - b. Потому что пи известно только до двух цифр
 - c. Потому что площади всегда округляют до одного знака после запятой
 - d. Потому что калькулятор ошибается
3. Почему картофеля указано пятнадцать целых две десятых килограмма, а не пятнадцать целых двести восемь тысячных?
- a. Потому что весы магазина показывают до сотых
 - b. Потому что вычитание всегда теряет цифры
 - c. Потому что напольные весы, самые грубые, показывают только до десятых
 - d. Потому что килограммы по закону округляют до десятых
4. Сколько значащих цифр в восьмидесяти семи целых девятистах девяноста тысячных?
- a. Три
 - b. Четыре
 - c. Шесть
 - d. Пять

Ответы

1. b) Нули здесь держат место, а не измерены, поэтому считаются только пять и три.

- 2. а)** При умножении результат сохраняет столько значащих цифр, сколько у самого грубого исходного числа — радиуса.
- 3. с)** При сложении и вычитании в ответе не больше знаков после запятой, чем у самого грубого измерения.
- 4. d)** Последний ноль показывает измерение до тысячных, поэтому он считается: пять значащих цифр.

Разобранные примеры

Складываем взвешивания картофеля Вы покупаете семь целых пятьдесят шесть сотых килограмма картофеля, оставляете шесть целых пятьдесят две тысячных килограмма в лаборатории, а дома добавляете тринадцать целых семь десятых килограмма. Сколько у вас картофеля с правильной прецизионностью?

Семь целых пятьдесят шесть сотых минус шесть целых пятьдесят две тысячных — одна целая пятьсот восемь тысячных.

Прибавляем тринадцать целых семь десятых: пятнадцать целых двести восемь тысячных килограмма.

Самое грубое измерение, тринадцать целых семь десятых, известно только до десятых.

Округляем до десятых: пятнадцать целых две десятых килограмма.

Ответ: пятнадцать целых две десятых килограмма

Задачи

1. Сколько значащих цифр в ноль целых девяти десяти тысячных, в пятнадцати тысячах четырёхстах пятидесяти целых ноль десятых и в тридцати целых сорока двух сотых?

Подсказка: Нули-заполнители не считаются; нули между цифрами или измеренные в конце после запятой считаются.

Ответ: Одна, шесть и четыре.

2. Прямоугольник имеет размеры две целых пять десятых метра на одну целую двадцать три сотых метра. Какова его площадь с правильным числом значащих цифр?

Подсказка: Перемножьте, затем оставьте столько значащих цифр, сколько у исходного числа с наименьшим их количеством.

Ответ: Три целых одна десятая квадратного метра: две целых пять десятых на одну целую двадцать три сотых — три целых семьдесят пять тысячных, а у двух целых пяти десятых только две значащие цифры.

Три цифры и прикидка триллиона

Какой высоты многоквартирная на вашей улице? Измерить её вы, скорее всего, не сможете, но этажи сосчитать можете. С одной знакомой длиной и небольшим умножением можно сделать на удивление хорошую прикидку, и эта часть как раз об этом умении. Но сначала — пара слов о том, как эта книга обращается с цифрами.

СКОЛЬКО ЦИФР? В КНИГЕ: 3 ЗНАЧАЩИЕ ЦИФРЫ

$$2 \times 13.5 + 10.2 = 37.2 \text{ lb}$$

ТОЧНОЕ

$$F = 55 \times 0.0255 \approx 1.4 \text{ N}$$

2 ЗНАЧ. ЦИФРЫ

Точные числа не считаются

В этой книге считается, что у большинства чисел три значащие цифры, и разобранные примеры последовательно держат это

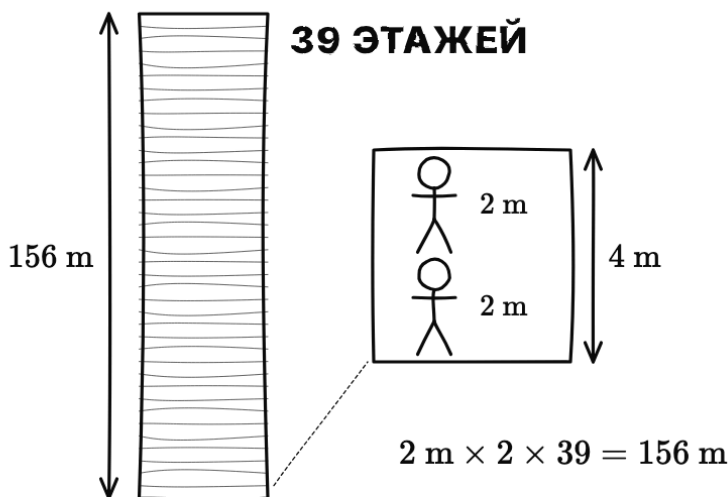
число. Ответ с тремя цифрами опирается на данные, известные хотя бы до трёх цифр; если у данных их меньше, то и у ответа меньше. Книга также следит, чтобы число цифр имело смысл в данной ситуации, а в некоторых темах, например в оптике, берёт больше трёх, потому что нужна бóльшая точность. И одно важное исключение: точное число не ограничивает число цифр результата. Двойка в правиле для длины окружности, два пи эр, — это ровно два, а не измерение, поэтому она не считается.

Книга проверяет это двумя быстрыми расчётами. У женщины три сумки: две весят по тринадцать целых пять десятых фунта, а одна — десять целых две десятых. Всего — дважды тринадцать целых пять десятых плюс десять целых две десятых, то есть тридцать семь целых две десятых фунта. «Две сумки» — это счёт, точное число, поэтому оно не урезает цифры. Второе: сила равна массе, умноженной на ускорение. Тележка массой пятьдесят пять килограммов разгоняется на двести пятьдесят пять десяти тысячных метра в секунду каждую секунду. Пятьдесят пять на это число — около одной целой сорока сотых, а поскольку у пятидесяти пяти килограммов всего две значащие цифры, сила — одна целая четыре десятых ньютона.

Теперь новый раздел: оценка. Физикам, учёным и инженерам часто нужна быстрая прикидка. Как далеко до такого-то места? Какова примерно плотность какого-то предмета? Какой примерно ток потечёт в цепи? Многие приближённые ответы получаются из формул, данные для которых известны лишь приблизительно. Умение растёт с практикой: думать числами, не бояться рискнуть и хорошо знать свои единицы. Оценки позволяют отбросить невозможные сценарии и нереальные

числа, оспорить чужие утверждения и направить собственный подход к задаче.

Первый пример — тридцатидевятиэтажное здание. Хитрость в том, чтобы отталкиваться от знакомого: от человека. Взрослый человек ростом около двух метров, а один этаж — примерно рост двух взрослых, около четырёх метров. Значит, здание — это около двух метров на человека, умноженных на двух человек на этаж и на тридцать девять этажей, то есть сто пятьдесят шесть метров. Это грубая цифра, но полезная.



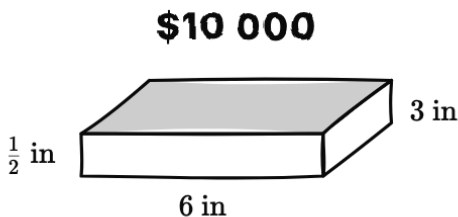
Здание, измеренное людьми

Опыт

Растопырьте ладонь и один раз измерьте её линейкой — скажем, десять сантиметров в ширину. Теперь пройдите ладонью по столу и посчитайте ладони. Восемь ладоней — это примерно восемьдесят сантиметров. Вы измерили стол, взяв за линейку собственное тело.

Книга спрашивает, что ещё, кроме длины, можно оценить, а затем ставит куда более крупную задачу. В 2021 году федеральный долг Соединённых Штатов составлял чуть больше двадцати восьми триллионов долларов. У большинства из нас нет никакого ощущения даже одного триллиона. Так что представьте триллион долларов в стодолларовых купюрах, связанных в банковские пачки по сто купюр, по десять тысяч долларов в пачке. Разложите пачки ровным слоем по полю для американского футбола, между зачётными зонами. Какой высоты получилась бы груда? Один друг считает, что три дюйма; другой — что десять футов. (Здесь книга считает в дюймах и футах, потому что поля для американского футбола измеряют в ярдах.)

триллион: $\$10^{12}$



$$\frac{10^{12}}{10^4} = 10^8$$

ПАЧКИ

$$6 \times 3 \times \frac{1}{2} = 9 \text{ in}^3$$

Триллион в банковских пачках

План — начать с того, что легко представить: одной банковской пачки. Найти её объём, найти, сколько пачек составляют триллион, а затем распределить их общий объём по площади поля, чтобы получить высоту. Одна купюра — примерно три на шесть дюймов, а пачка из ста купюр — около полудюйма толщиной. Значит, одна пачка занимает шесть на три на половину, то есть девять кубических дюймов. Это примерно размер толстого смартфона, достаточно мало, чтобы сунуть в карман пальто. Сколько пачек? Триллион — это единица с двенадцатью нулями, а в каждой пачке десять тысяч долларов — единица с четырьмя нулями. При делении нули вычитаются: двенадцать минус четыре — восемь, значит, пачек сто миллионов.

Запомним

Эта книга обычно работает с тремя значащими цифрами и последовательно держит это число в примерах. Точные числа, например двойка в два пи эр или число сумок, не ограничивают цифры результата. Оценки позволяют отбросить нереальные числа, проверить утверждения и направить подход. Тридцатидевятиэтажное здание имеет высоту около ста пятидесяти шести метров, если на этаж приходится два человека, четыре метра. Триллион долларов в стодолларовых купюрах — это сто миллионов банковских пачек, каждая около девяти кубических дюймов.

Вопросы

1. Почему счёт «две сумки» не ограничивает значащие цифры общего веса?
 - a. Потому что два — маленькое число
 - b. Потому что счёт — точное число, а не измерение
 - c. Потому что сумки весят одинаково
 - d. Потому что фунты не метрические
2. Почему сила, действующая на тележку, указана как одна целая четыре десятых ньютона, а не одна целая сорок сотых?
 - a. Потому что у массы, пятидесяти пяти килограммов, только две значащие цифры

- b. Потому что силу всегда округляют до десятых
 - c. Потому что ускорение мало
 - d. Потому что калькулятор показывает две цифры
3. Как в лекции оценивают высоту тридцатидевятиэтажного здания?
- a. Измеряя его тень
 - b. Угадывая сто метров
 - c. Масштабируя: около двух метров на человека, два человека на этаж, тридцать девять этажей
 - d. Считая окна
4. Сколько банковских пачек стодолларовых купюр составляют триллион долларов?
- a. Тысяча
 - b. Миллион
 - c. Десять тысяч
 - d. Сто миллионов

Ответы

1. **b)** Точные числа, например число сумок, не ограничивают цифры результата.
2. **a)** При умножении оставляйте столько значащих цифр, сколько у самого грубого исходного числа: у пятидесяти пяти их две.
3. **c)** Два метра на человека, умноженные на двух человек на этаж и на тридцать девять этажей, дают около ста пятидесяти шести метров.
4. **d)** У триллиона двенадцать нулей, а у пачки в десять тысяч — четыре; двенадцать минус четыре оставляет восемь нулей: сто

МИЛЛИОНОВ.

Разобранные примеры

Высота 39-этажного здания Оцените высоту тридцатидевятиэтажного здания, считая рост взрослого около двух метров, а этаж — около двух взрослых.

Один этаж — это около двух взрослых по два метра, около четырёх метров.

Тридцать девять этажей умножить на четыре метра на этаж.

Тридцать девять на четыре — сто пятьдесят шесть.

Ответ: около ста пятидесяти шести метров

Задачи

1. Тем же способом оцените высоту двенадцатиэтажного здания.

Подсказка: Возьмите около четырёх метров на этаж.

Ответ: Около сорока восьми метров: двенадцать на четыре.

2. У женщины три сумки: две весят по тринадцать целых пять десятых фунта, а одна — десять целых две десятых. Каков общий вес с правильными цифрами?

Подсказка: Счёт «две сумки» точен; сохраните десятые измеренных весов.

Ответ: Тридцать семь целых две десятых фунта: дважды тринадцать целых пять десятых — двадцать семь, плюс десять целых две десятых.

3. Одна банковская пачка — шесть на три на полдюйма. Каков её объём?

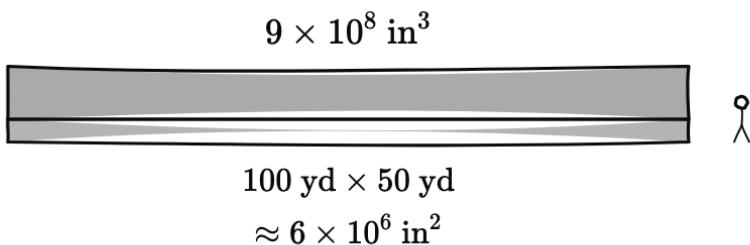
Подсказка: Перемножьте длину, ширину и высоту.

Ответ: Девять кубических дюймов: шесть на три — восемнадцать, на половину — девять.

Какой высоты триллион?

У нас сто миллионов банковских пачек, каждая около девяти кубических дюймов. Теперь разложим их по футбольному полю.

$$h = \frac{V}{A} \quad \frac{9 \times 10^8}{6 \times 10^6} = 150 \text{ in} \\ \approx 12 \text{ ft}$$



Объём, делённый на площадь, — это высота

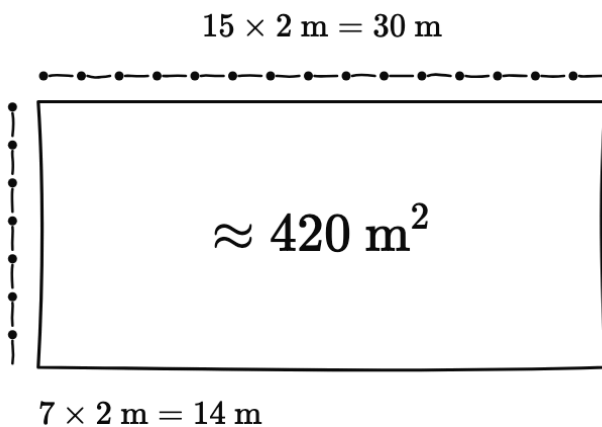
Поле — сто ярдов в длину и пятьдесят в ширину, то есть пять тысяч квадратных ярдов. Чтобы согласовать с пачками, измеренными в дюймах, переведём: в ярде три фута, а в футе двенадцать дюймов, так что в одном квадратном ярде три на три на двенадцать на двенадцать, то есть тысяча двести девяносто шесть квадратных дюймов. Значит, пять тысяч квадратных ярдов

— это около шести миллионов четырёрхсот восьмидесяти тысяч квадратных дюймов, округлённо шесть миллионов: для грубой оценки оставляем всего одну значащую цифру.

Общий объём денег — девять кубических дюймов на пачку, умноженные на сто миллионов пачек: девятьсот миллионов кубических дюймов. Объём равен площади, умноженной на высоту, поэтому высота — это объём, делённый на площадь. Девятьсот миллионов, делённые на шесть миллионов, — сто пятьдесят, так что груда поднимается примерно на сто пятьдесят дюймов. Разделите на двенадцать дюймов в футе — и получится около двенадцати футов. Это в полтора раза выше потолка обычной комнаты — и так по всему футбольному полю.

Друг, который назвал три дюйма, сильно ошибся в меньшую сторону; тот, кто сказал десять футов, был примерно прав. Книга предлагает сравнить вашу собственную первую догадку и подумать о разнице между быстрой догадкой и тщательной пошаговой оценкой.

Последнее упражнение использует в качестве линейки ваше собственное тело. Какого размера стандартная баскетбольная площадка? Взрослый мужчина ростом около двух метров. Около пятнадцати мужчин, уложенных один за другим, покроют её длину, около тридцати метров, а около семи — её ширину, около четырнадцати метров. Тридцать на четырнадцать даёт примерно четыреста двадцать квадратных метров.



Площадка, измеренная людьми

На этом глава заканчивается: от немногих простых законов через согласованные единицы и честную погрешность к оценкам, которые можно сделать в уме.

Запомним

Футбольное поле в пять тысяч квадратных ярдов — это около шести миллионов квадратных дюймов. Сто миллионов пачек по девять кубических дюймов дают девятьсот миллионов кубических дюймов денег. Деление объёма на площадь даёт высоту около ста пятидесяти дюймов, примерно двенадцать футов. Баскетбольная площадка, измеренная двухметровыми людьми, — около пятнадцати на семь человек, примерно четыреста двадцать квадратных метров.

Вопросы

1. Почему квадратные ярды нужно переводить, применяя множители «ярды в футы» и «футы в дюймы» по два раза?
 - a. Потому что у площади два измерения, длина и ширина, и каждое нужно перевести
 - b. Потому что поле вдвое длиннее, чем шире
 - c. Потому что квадратные ярды больше ярдов
 - d. Потому что дюймы меньше футов
2. Как находят высоту груды денег?
 - a. Складывая объём и площадь
 - b. Деля объём денег на площадь поля
 - c. Умножая площадь на число пачек
 - d. Деля площадь на объём

3. Чья догадка была ближе и почему это упражнение важно?
- a. Три дюйма — это показывает, что догадки обычно верны
 - b. Ничья — это показывает, что оценки бесполезны
 - c. Десять футов — это показывает, что тщательная пошаговая оценка может проверить быстрые догадки
 - d. Обе одинаково
4. Как оценивают площадь баскетбольной площадки?
- a. Смотрят в справочнике
 - b. Обходят её с телефоном
 - c. Считают её квадратной
 - d. Считают двухметровых людей вдоль длины и ширины и перемножают

Ответы

1. **a)** В одном квадратном ярде три на три на двенадцать на двенадцать квадратных дюймов, потому что переводятся и длина, и ширина.
2. **b)** Объём равен площади, умноженной на высоту, поэтому высота равна объёму, делённому на площадь.
3. **c)** Груда — около двенадцати футов; десять футов — примерно верно, а три дюйма — сильно меньше.
4. **d)** Около пятнадцати мужчин покрывают длину, тридцать метров, а семь — ширину, четырнадцать метров; тридцать на четырнадцать — около четырёхсот двадцати.

Разобранные примеры

Высота триллиона долларов Сто миллионов банковских пачек по девять кубических дюймов ровно разложены по

футбольному полю площадью около шести миллионов квадратных дюймов. Какой высоты гряда?

Общий объём: девять кубических дюймов на сто миллионов — девятьсот миллионов кубических дюймов.

Высота — это объём, делённый на площадь.

Девятьсот миллионов на шесть миллионов — сто пятьдесят, то есть около ста пятидесяти дюймов.

Сто пятьдесят дюймов, делённые на двенадцать дюймов в футае, — около двенадцати футов.

Ответ: около ста пятидесяти дюймов, примерно двенадцать футов

Задачи

1. Сколько квадратных дюймов в одном квадратном ярде?

Подсказка: В ярде три фута, а в футе двенадцать дюймов; переведите и длину, и ширину.

Ответ: Тысяча двести девяносто шесть: три на три на двенадцать на двенадцать.

2. Оцените площадь комнаты длиной примерно в три роста взрослого и шириной в два, если взрослый ростом около двух метров.

Подсказка: Переведите людей в метры, затем перемножьте длину и ширину.

Ответ: Около двадцати четырёх квадратных метров: шесть метров на четыре.