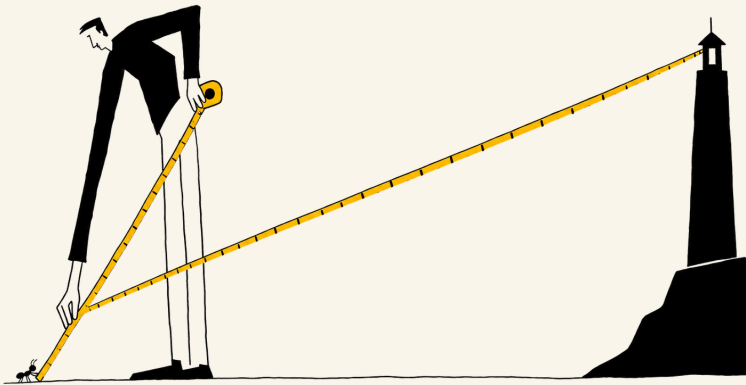


Физика для колледжа



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

Введение: природа науки и физики

Физика: введение

Применения физики

Модели, теории и законы; роль эксперимента

Научный метод и рождение современной физики

Физические величины и единицы

Секунда, метр и килограмм

Метрические приставки

Известные диапазоны и перевод единиц

Завершаем поездку домой

Правильность, точность и погрешность

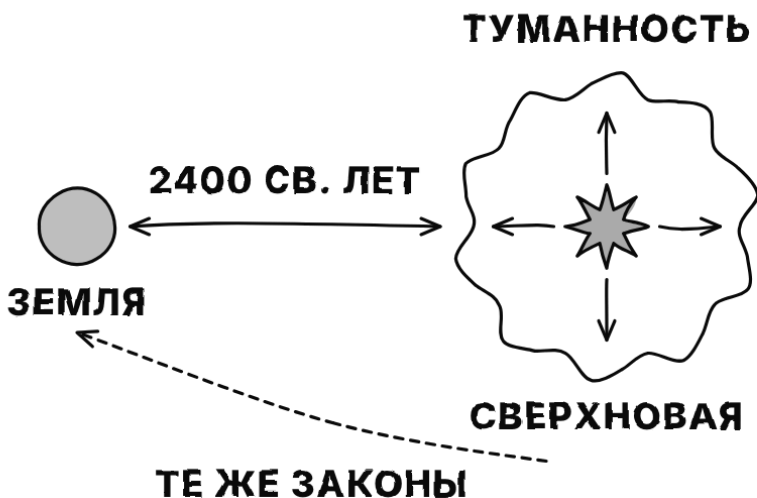
Относительная погрешность и значащие цифры

Нули и значащие цифры в вычислениях

Приближённые оценки

Введение: природа науки и физики

Какова ваша первая реакция, когда вы слышите слово «физика»? Не представилось ли вам, как вы продираетесь сквозь трудные уравнения или заучиваете формулы, которые, кажется, не нужны ни для чего за пределами кабинета физики? Многие приступают к физике с некоторой опаской. Но, начав знакомство с этим обширным предметом, вы, возможно, скоро поймёте, что физика играет в вашей жизни куда большую роль, чем вам казалось, какими бы ни были ваши цели и выбранная профессия.



Туманность Вуаль очень далеко

Возьмём туманность Вуаль — облако нагретой пыли и газа примерно в 2400 световых годах от Земли (световой год — это расстояние, которое свет проходит за год, около 9,5 триллиона километров). Её необычное строение — продолжающийся след сверхновой, вспыхнувшей 8000 лет назад. Ударная волна от взрыва сталкивается с облаком газа и пыли, и так возникают похожие на верёвки нити и полотнища. Учёные сравнивают новые снимки с подробными снимками, сделанными космическим телескопом «Хаббл» в 1997 году, чтобы понять, как расширяется туманность, и изучить другие свойства астрономических объектов. Силы, которые заставляют остаток сверхновой вести себя именно так, — те же самые силы, с которыми мы имеем дело здесь, на Земле, собираемся ли мы отправить ракету в космос или просто отапливаем новый дом. Хотя масштаб совсем иной, газы в туманности Вуаль взаимодействуют так же, как на Земле, а яркие сочетания цветов создаёт знакомое свечение водорода, серы, кислорода и подобных им элементов, из которых состоит всё, что мы знаем. Сегодня вечером найдите минуту и посмотрите на звёзды. Силы там, наверху, те же, что и здесь, на Земле. Изучая физику, вы, возможно, лучше поймёте, как связано между собой всё, что мы можем увидеть и узнать во Вселенной.

За свою историю человечество создало и изготовило миллионы разных предметов. Сменявшие друг друга технологические эпохи (их часто называют каменным веком, бронзовым веком, железным веком и так далее) отмечены нашим знанием физических свойств определённых материалов и умением с ними обращаться. Всё это знание вырастает из физики, будь то то, как раскаляется камень, когда из него делают наконечник копья,

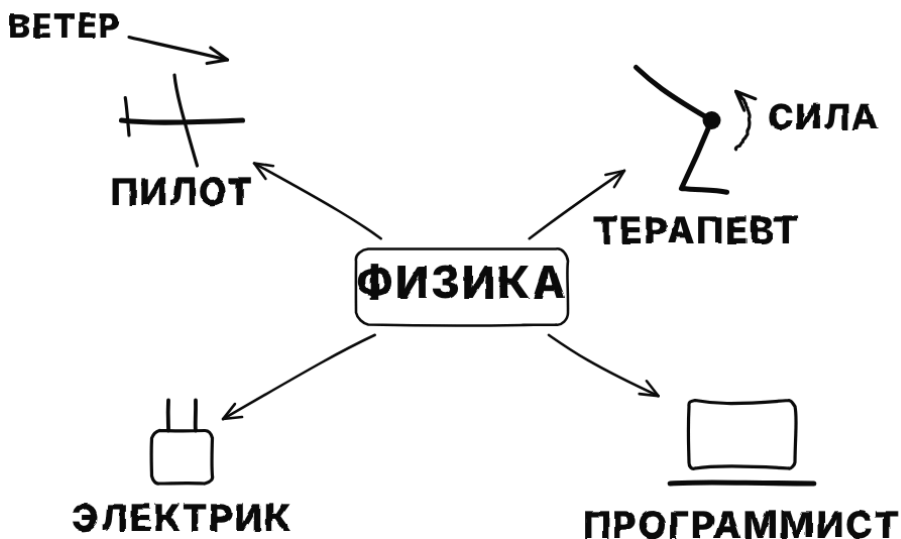
как добавление углерода к железу в печах Южной Индии и Шри-Ланки дало самую раннюю высококачественную сталь, или как правильно соединять идеально отшлифованные и отполированные стёкла, чтобы получить оптические приборы. Наша нынешняя технологическая эпоха, информационная, опирается на всё это знание и восходит к ключевым изобретениям, которые сделали работавшие вместе люди самого разного происхождения. Мохамед М. Аталла и Давон Канг, например, изобрели MOSFET (полевой транзистор со структурой металл — оксид — полупроводник). Хотя о нём мало кто знает, это крошечное устройство, созданное в 1959 году учёными, родившимися в Египте и в Корее и работавшими в лаборатории в Нью-Джерси, — основа современной электроники. MOSFET-транзисторов выпущено больше, чем любых других предметов за всю историю человечества. Они есть в компьютерах, смартфонах, микроволновках, системах управления автомобилей, медицинских приборах и почти в любом другом электронном устройстве.



Эпохи материалов

Теперь вспомните самые захватывающие современные технологии, о которых вы слышали в новостях: поезда, парящие над рельсами, «плащи-невидимки», огибающие свет вокруг себя, и микроскопических роботов, сражающихся с раковыми клетками в нашем теле. Все эти прорывы, обыденные или невероятные, опираются на принципы физики. Помимо того что физика играет важную роль в технике, её понятиями каждый день пользуются в работе инженеры, пилоты, врачи, физиотерапевты, электрики и программисты. Например, пилот должен понимать, как силы ветра влияют на траекторию полёта, а физиотерапевт — как на мышцы тела действуют силы, когда тело движется и сгибается. Как вы узнаете из этой книги,

принципы физики двигают вперёд новые, захватывающие технологии и применяются в самых разных профессиях.



Профессии, где нужна физика

В этой книге вы начнёте знакомиться с историей систематического изучения физики, начиная с натуральной философии и древних мыслителей Ближнего Востока и Средиземноморья и вплоть до сэра Исаака Ньютона и законов физики, носящих его имя. Вы также познакомитесь с эталонами, которыми пользуются учёные, изучая физические величины, и со связанной системой единиц измерения, на которой большая часть научного сообщества говорит на едином математическом языке. Наконец, вы узнаете о пределах нашей способности быть

правильными и точными и о том, почему учёные так тщательно стараются ясно указывать собственные ограничения.

Вопросы

1. Зачем в самом начале курса физики появляется туманность Вуаль?
 - a. Чтобы показать, что силы, формирующие далёкое облако, те же, с которыми мы имеем дело на Земле
 - b. Чтобы показать, что астрономия — самый трудный раздел физики
 - c. Чтобы показать, что физика в основном занимается очень далёкими объектами
 - d. Чтобы показать, что сверхновые часто вспыхивают рядом с Землёй
2. Как учёные узнают, как расширяется туманность?
 - a. Посылают зонды в облако газа
 - b. Один раз измеряют её цвета и сравнивают с Солнцем
 - c. Сравнивают новые снимки с подробными снимками «Хаббла» 1997 года
 - d. Вычисляют, когда вспыхнула сверхновая
3. Чем, согласно тексту, была отмечена каждая технологическая эпоха, например бронзовый или железный век?
 - a. Числом людей, пользовавшихся новыми орудиями

- b. Знанием физических свойств определённых материалов и умением их обрабатывать
- c. Открытием нового закона движения
- d. Изобретением измерительных приборов

Ответы

1. а) Силы, которые заставляют остаток сверхновой вести себя так, — те же силы, с которыми мы имеем дело здесь, на Земле, от ракет до отопления дома.
2. c) Всё ещё движущуюся волну наблюдают снова и снова; если положить новые снимки рядом со снимками 1997 года, видно, как расширяется туманность.
3. b) Сменявшие друг друга технологические эпохи были отмечены знанием физических свойств материалов и умением с ними обращаться, а это знание вырастает из физики.

Задачи

1. В тексте сказано, что и пилот, и физиотерапевт пользуются физикой в повседневной работе. Объясните своими словами, какая физика нужна каждому из них.

Подсказка: Подумайте, с какими силами имеет дело каждый: на самолёте и в теле пациента.

Ответ: Пилот должен понимать, как силы ветра толкают самолёт и меняют траекторию полёта. Физиотерапевт должен понимать силы, которые испытывают мышцы, когда тело движется и сгибается. Оба пользуются одними и теми же физическими представлениями о силах в совсем разных профессиях.

2. О MOSFET мало кто знает, и всё же в тексте он назван основной современной электроники. Объясните, почему оба утверждения могут быть верны одновременно.

Подсказка: Спросите себя, где находится это устройство и видит ли его кто-нибудь.

Ответ: MOSFET — крошечное устройство, спрятанное внутри компьютеров, смартфонов, микроволновок, систем управления автомобилей и медицинских приборов, поэтому люди постоянно им пользуются, никогда его не видя. Их сделано больше, чем любых других предметов в истории, и потому на них держится вся информационная эпоха.

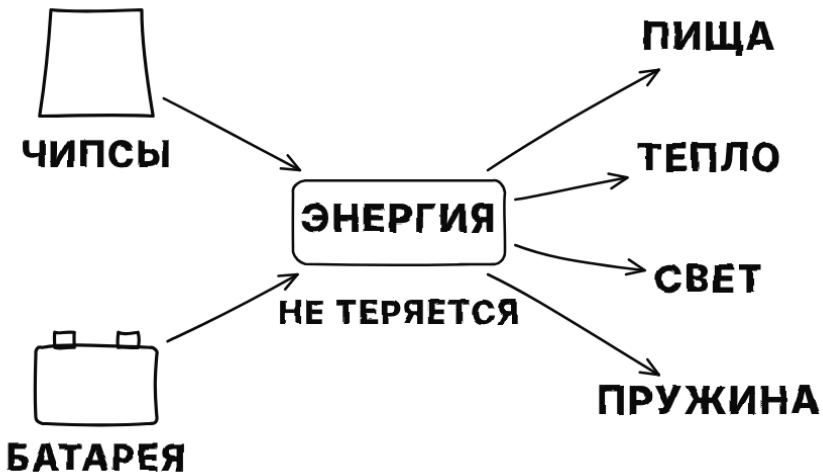
3. Цвета туманности Вуаль дают светящиеся водород, сера и кислород. Почему, по мнению текста, этот факт важен для человека на Земле?

Подсказка: Сравните эти элементы с тем, из чего состоят вещи вокруг вас.

Ответ: Это те же знакомые элементы, из которых состоит всё, что мы знаем. Значит, облако, хотя оно неизмеримо больше и очень далеко, сделано из того же вещества и подчиняется тем же правилам, что и газы на Земле, — в этом и состоит мысль текста о связи всего со всем.

Физика: введение

Физическая Вселенная невероятно сложна в своих подробностях. Каждый день каждый из нас наблюдает огромное разнообразие предметов и явлений. За века любознательность человечества привела нас к тому, что мы сообща исследовали и описали колоссальное богатство сведений. От полёта птиц до окраски цветов, от молнии до тяготения, от кварков до скоплений галактик, от течения времени до тайны сотворения Вселенной — мы задавали вопросы и собирали огромные массивы фактов. Перед лицом всех этих подробностей мы обнаружили, что удивительно небольшой и единый набор физических законов может объяснить то, что мы наблюдаем. Как люди, мы обобщаем и ищем порядок. Мы обнаружили, что природа на редкость сговорчива: в ней есть тот глубинный порядок и та простота, которые мы так ценим.



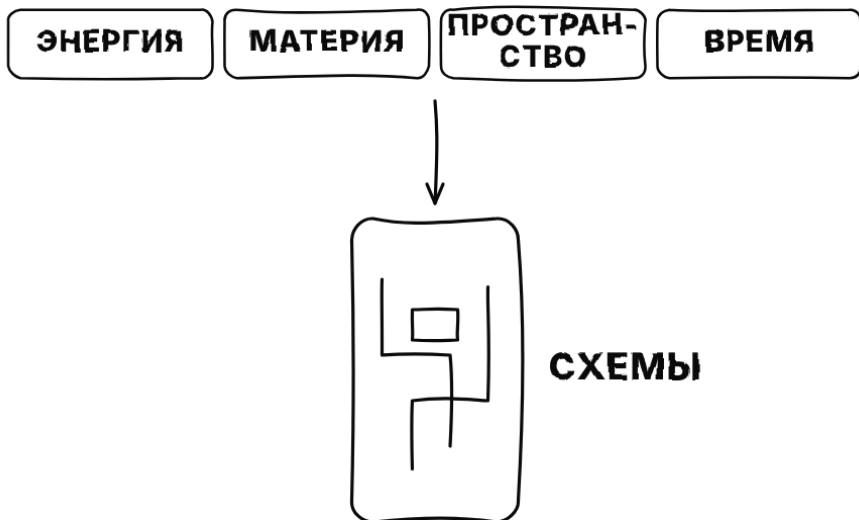
Один закон связывает энергию

Именно глубинный порядок природы делает изучение науки вообще и физики в особенности таким увлекательным.

Например, что общего у пакета чипсов и автомобильного аккумулятора? В обоих есть энергия, которую можно превратить в другие формы. Закон сохранения энергии (он гласит, что энергия может менять форму, но никогда не теряется) связывает между собой такие темы, как калории пищи, батареек, теплота, свет и пружины часов. Понимание этого закона облегчает изучение различных форм энергии и того, как они связаны друг с другом. Темы, на первый взгляд не связанные, соединяются широко применимыми физическими законами, и это позволяет понимать, а не просто заучивать списки фактов.

Объединяющая сила физических законов и основная простота природы — главные темы этой книги. Учась применять эти законы, вы, конечно, изучите самые важные разделы физики. Что ещё важнее, вы приобретёте навыки анализа, которые позволят применять эти законы далеко за пределами того, что может вместить одна книга. Эти навыки анализа помогут вам добиться успехов в учёбе, а также мыслить критически в любой профессии, которую вы выберете. В этом разделе обсуждаются область физики (чтобы определить, что такое физика), некоторые применения физики (чтобы показать её значение для других дисциплин) и точнее — что составляет физический закон (чтобы прояснить значение опыта для теории).

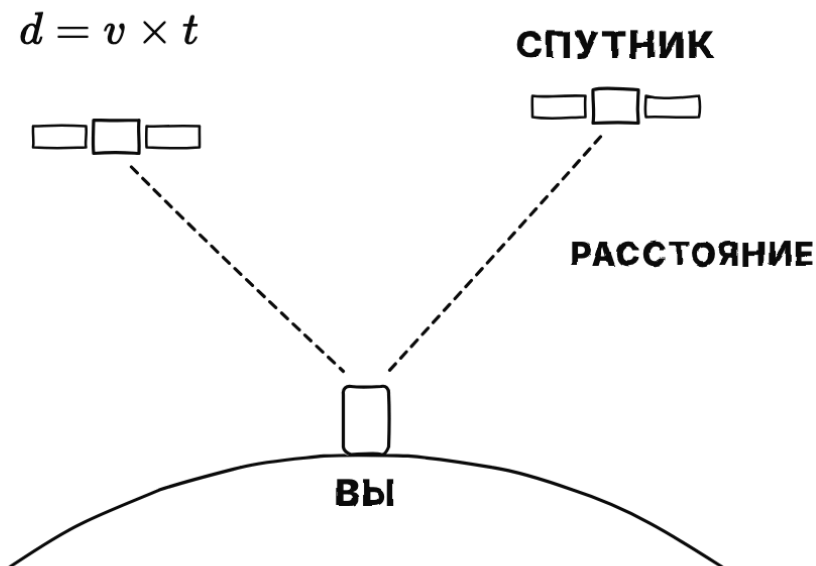
Наука состоит из теорий и законов, которые являются общими истинами о природе, а также из того массива знаний, который они охватывают. Учёные постоянно стараются расширить этот массив знаний и отточить формулировки законов, которые его описывают. Физика занимается описанием взаимодействий энергии, материи, пространства и времени и особенно интересуется тем, какие фундаментальные механизмы лежат в основе каждого явления. Стремление описать основные явления природы, по сути, и определяет область физики.



Что описывает физика

Физика стремится описать, как устроено всё вокруг нас, от движения крошечных заряженных частиц до движения людей, машин и космических кораблей. На самом деле почти всё вокруг вас можно довольно точно описать законами физики. Возьмём смартфон. Физика описывает, как электричество взаимодействует с различными схемами внутри устройства. Это знание помогает инженерам выбирать подходящие материалы и расположение схем при создании смартфона. Далее возьмём систему GPS. Физика описывает связь между скоростью тела, расстоянием, которое оно проходит, и временем, за которое оно проходит это расстояние. GPS опирается на точные расчёты, которые учитывают неровности земной поверхности, точное расстояние между спутниками на орбите и даже влияние

сложного явления — замедления времени. Большинство этих расчётов основано на алгоритмах, разработанных Глэдис Уэст, математиком и специалистом по информатике, которая программировала первые компьютеры, способные к высокоточному дистанционному зондированию и определению местоположения. Когда вы пользуетесь устройством GPS, оно применяет эти алгоритмы, чтобы определить, где вы находитесь и как ваше положение соотносится с другими объектами на Земле.



Как GPS находит вас

Вопросы

1. Что, согласно тексту, общего у пакета чипсов и автомобильного аккумулятора?
 - a. Оба состоят из одних и тех же химических элементов
 - b. В обоих есть энергия, которую можно превратить в другие формы
 - c. Оба полностью теряют свою энергию при использовании
 - d. Оба хранят энергию только в виде теплоты
2. Что гласит закон сохранения энергии?
 - a. Энергия может менять форму, но никогда не теряется
 - b. Энергия расходуется всякий раз, когда что-то движется
 - c. Энергию могут создавать машины
 - d. Каждая форма энергии подчиняется своему отдельному закону
3. Почему, по словам текста, понимать физические законы лучше, чем заучивать списки фактов?
 - a. Потому что списки фактов часто ошибочны
 - b. Потому что законы короче записывать
 - c. Потому что широко применимые законы связывают темы, на первый взгляд не связанные
 - d. Потому что факты меняются каждый год
4. На какое соотношение из физики опирается система GPS, согласно тексту?
 - a. Между массой тела и его цветом
 - b. Между температурой и давлением
 - c. Между электричеством и светом

d. Между скоростью тела, пройденным расстоянием и затраченным временем

Ответы

1. **b)** В обоих есть энергия, которую можно превратить в другие формы, и закон сохранения энергии связывает такие темы между собой.
2. **a)** Закон гласит, что энергия может менять форму, но никогда не теряется, и это связывает калории пищи, батарейки, теплоту, свет и пружины часов.
3. **c)** Темы, на первый взгляд не связанные, соединены широко применимыми физическими законами, и это даёт понимание, а не одно заучивание.
4. **d)** Физика описывает связь между скоростью, расстоянием и временем, и GPS опирается на точные расчёты, построенные на ней.

Задачи

1. Объясните своими словами, чем физика отличается от простого собирания фактов о природе.

Подсказка: Подумайте, сколько законов, по словам текста, объясняют то, что мы наблюдаем.

Ответ: Мы собрали огромные массивы фактов, от птиц до галактик, но их объясняет удивительно небольшой и единый набор физических законов. Физика ищет этот глубинный порядок и фундаментальные механизмы каждого явления, а не заучивает факты по одному.

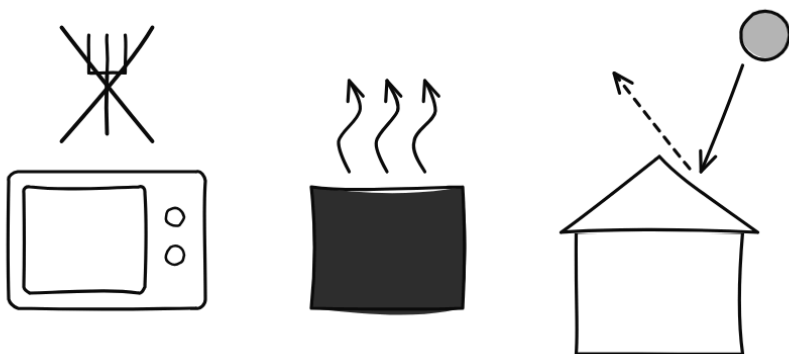
2. Калории пищи, батарейки, теплота, свет и пружины часов кажутся не связанными. Объясните, какая одна мысль их объединяет.

Подсказка: Спросите себя, что есть во всех них и что с этим может происходить.

Ответ: Во всех них есть энергия, которая может переходить из одной формы в другую, но никогда не теряется. Закон сохранения энергии связывает их, поэтому, зная его, легче понять каждую из этих тем.

Применения физики

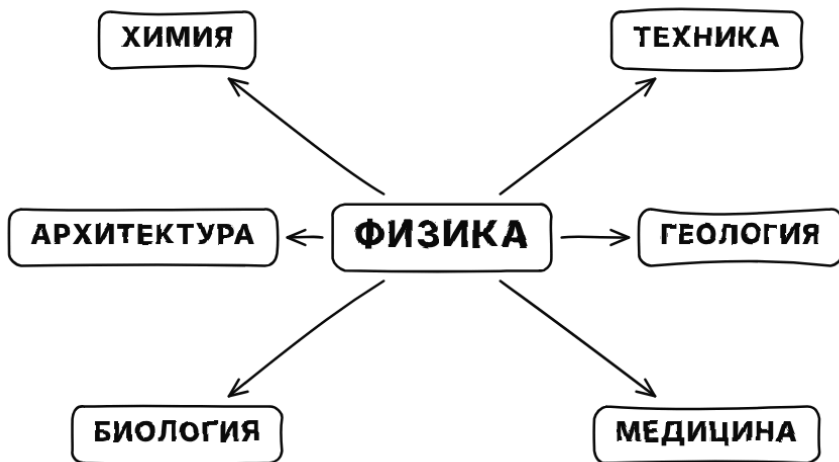
Чтобы пользоваться физикой, не обязательно быть учёным. Напротив, знание физики полезно и в повседневной жизни, и в профессиях, далёких от науки. Оно поможет понять, как работают микроволновые печи, почему в них нельзя класть металл и почему они могут влиять на кардиостимуляторы. Физика позволяет понять опасность излучения и легче оценивать эту опасность здраво. Физика объясняет и то, почему чёрный автомобильный радиатор помогает отводить тепло от двигателя, и то, почему белая крыша помогает сохранять в доме прохладу. Точно так же работу системы зажигания автомобиля и передачу электрических сигналов по нервной системе нашего тела гораздо легче понять, если думать о них с точки зрения основ физики.



МИКРОВОЛНОВАЯ РАДИАТОР БЕЛАЯ КРЫША

Физика в доме и в машине

Физика — основа многих важных дисциплин и прямо вносит вклад в другие. Химия, например, раз она занимается взаимодействием атомов и молекул, уходит корнями в атомную и молекулярную физику. Большинство отраслей техники — это прикладная физика. В архитектуре физика лежит в основе устойчивости конструкций и участвует в акустике, отоплении, освещении и охлаждении зданий. Некоторые разделы геологии сильно опираются на физику, например радиоактивное датирование горных пород, анализ землетрясений и перенос тепла в недрах Земли. Некоторые дисциплины, такие как биофизика и геофизика, — это сплав физики с другими науками.



Науки, построенные на физике

У физики много применений в биологических науках. На микроскопическом уровне она помогает описать свойства клеточных стенок и клеточных мембран. На макроскопическом уровне она может объяснить теплоту, работу и мощность, связанные с человеческим телом. Физика участвует в медицинской диагностике: рентгене, магнитно-резонансной томографии (МРТ) и ультразвуковом измерении кровотока. Лечение иногда прямо связано с физикой; например, лучевая терапия рака использует ионизирующее излучение. Физика может объяснить и явления, связанные с органами чувств: как музыкальные инструменты издают звук, как глаз различает цвет и как лазеры передают информацию.

Изучать все применения физики систематически не нужно. Полезнее всего знать основные законы физики и владеть аналитическими методами их применения. Изучение физики также может развить ваше умение решать задачи. Кроме того, физика сохранила самые основные стороны науки, поэтому ею пользуются все науки, а её изучение облегчает понимание других наук.

Вопросы

1. Почему говорится, что химия уходит корнями в физику?
 - a. Потому что химики работают в тех же лабораториях, что и физики
 - b. Потому что химия занимается взаимодействием атомов и молекул, а это предмет атомной и молекулярной физики
 - c. Потому что химию придумали после физики
 - d. Потому что все химические вещества радиоактивны
2. Что, по словам текста, полезнее всего вынести из курса физики?
 - a. Полный список всех применений физики
 - b. Умение строить медицинские аппараты
 - c. Знание основных законов и владение аналитическими методами их применения
 - d. Заученные значения физических постоянных

3. Какая пара ниже целиком приведена в тексте как примеры физики в медицине?
- a. Магнитно-резонансная томография и лучевая терапия рака
 - b. Вакцины и антибиотики
 - c. Группы крови и генетика
 - d. Диеты и витамины
4. Почему изучение физики облегчает понимание других наук?
- a. Потому что другие науки списывают свои учебники у физики
 - b. Потому что физика обходится без математики
 - c. Потому что физика — самая древняя наука
 - d. Потому что физика сохранила самые основные стороны науки, и ею пользуются все науки

Ответы

1. **b)** Химия занимается взаимодействием атомов и молекул, поэтому уходит корнями в атомную и молекулярную физику.
2. **c)** Изучать каждое применение не нужно; важнее всего основные законы и умение их применять.
3. **a)** Физика участвует в диагностике, например в МРТ, а лучевая терапия рака использует ионизирующее излучение.
4. **d)** Физика хранит самые основные стороны науки, поэтому ею пользуются все науки.

Задачи

1. Назовите три дисциплины вне физики, которые, по словам текста, от неё зависят, и для каждой скажите, что даёт ей физика.

Подсказка: Посмотрите на химию, технику, архитектуру и геологию.

Ответ: Химия опирается на атомную и молекулярную физику, потому что занимается атомами и молекулами. В архитектуре физика лежит в основе устойчивости конструкций, а также акустики, отопления, освещения и охлаждения зданий. Геология использует физику для радиоактивного датирования горных пород, анализа землетрясений и переноса тепла в недрах Земли.

2. В тексте сказано, что пользоваться физикой можно, не будучи учёным. Приведите два бытовых примера из текста и объясните, что в каждом помогает понять физика.

Подсказка: Подумайте о кухне и о доме или машине.

Ответ: Физика помогает понять, как работает микроволновая печь и почему в неё нельзя класть металл. Она объясняет также, почему белая крыша сохраняет в доме прохладу и почему чёрный радиатор помогает отводить тепло от двигателя машины.

Модели, теории и законы; роль эксперимента

Законы природы — краткие описания окружающей нас Вселенной; это человеческие формулировки глубинных законов, или правил, которым следуют все природные процессы. Такие законы присущи самой Вселенной; люди их не создавали и поэтому не могут их изменить. Мы можем лишь открывать и понимать их. Их открытие — очень человеческое дело, со всеми присущими любому творческому усилию элементами тайны, воображения, борьбы, торжества и разочарования.

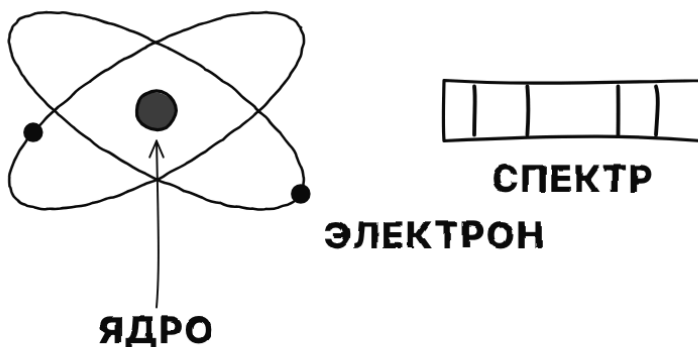
Краеугольный камень открытия законов природы — наблюдение; наука должна описывать Вселенную такой, какая она есть, а не такой, какой мы можем её себе вообразить.

Все мы в какой-то мере любопытны. Мы оглядываемся вокруг, обобщаем и пытаемся понять увиденное; например, смотрим на небо и гадаем, не предвещает ли облако определённого вида приближение грозы. Когда мы всерьёз берёмся изучать природу, мы становимся более организованными и строгими в сборе и анализе данных. Мы стремимся к большей точности, ставим контролируемые эксперименты (если можем) и записываем мысли о том, как данные можно упорядочить и объединить. Затем на основе собранных и проанализированных данных мы формулируем модели, теории и законы, чтобы обобщить результаты этих экспериментов и сообщить их другим.

Модель — это представление чего-то, что зачастую слишком трудно (или невозможно) показать непосредственно. Хотя

модель подкреплена экспериментальными доказательствами, она точна лишь в ограниченных условиях. Пример — планетарная модель атома, в которой электроны представляются вращающимися вокруг ядра подобно тому, как планеты обращаются вокруг Солнца. Мы не можем непосредственно наблюдать орбиты электронов, но этот мысленный образ помогает объяснить то, что мы наблюдать можем, например испускание света нагретыми газами (атомные спектры). Физики используют модели для самых разных целей. Например, модели помогают физикам проанализировать ситуацию и выполнить расчёт, или с их помощью ситуацию можно представить в виде компьютерной симуляции.

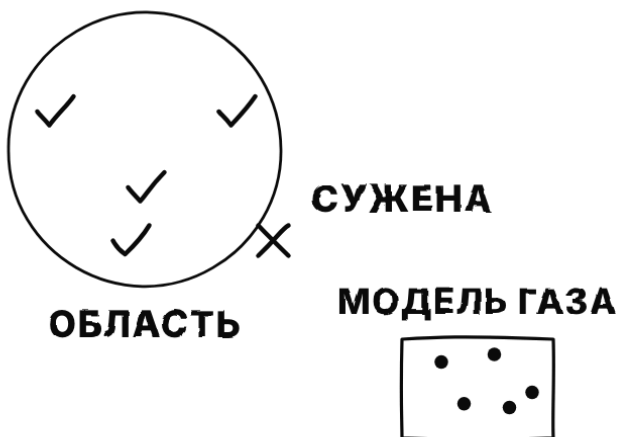
МОДЕЛЬ ОГРАНИЧЕНА



Планетарная модель атома

Слово «теория» означает для учёных нечто иное, чем то, что под ним часто подразумевают в повседневной речи. В частности, для учёного теория — это не то же самое, что «догадка», «идея» или даже «гипотеза». Фраза «это всего лишь теория» кажется учёным бессмысленной и нелепой, потому что наука основана на понятии теории. Для учёного теория — это проверяемое объяснение закономерностей природы, подкреплённое научными данными и многократно подтверждённое разными группами исследователей. Одни теории включают модели, помогающие наглядно представить явления, другие — нет. Теория тяготения Ньютона, например, не требует модели или мысленного образа, потому что мы можем наблюдать тела непосредственно, своими органами чувств. Если модели призваны точно описывать лишь некоторые стороны физической системы, то теория должна описывать все стороны любой системы, попадающей в её область применимости. В частности, любое следствие теории, которое можно проверить экспериментально, должно подтверждаться. Если эксперимент когда-либо покажет, что какое-то следствие теории неверно, теорию либо отбрасывают, либо надлежащим образом изменяют (например, ограничивая её область применимости).

ТЕОРИЯ



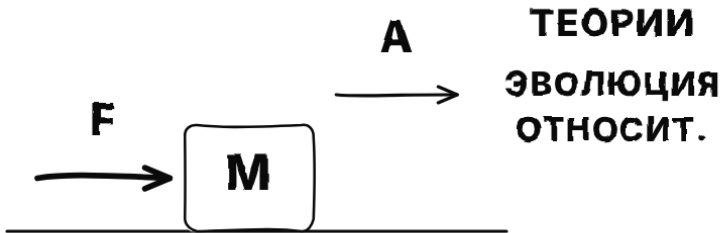
Теорию проверяют в её области

Одни теории включают модели, помогающие наглядно представить явления, другие — нет. Теория тяготения Ньютона, например, не требует модели или мысленного образа, потому что мы можем наблюдать тела непосредственно, своими органами чувств. Молекулярно-кинетическая теория газов, напротив, — это модель, в которой газ рассматривается как состоящий из атомов и молекул. Атомы и молекулы слишком малы, чтобы наблюдать их непосредственно органами чувств; поэтому мы мысленно представляем их, чтобы понять, что приборы сообщают нам о поведении газов.

Закон кратко описывает обобщённую закономерность природы, подкреплённую научными данными и повторными

экспериментами. Часто закон можно выразить в виде одного математического уравнения. Законы и теории схожи в том, что и те и другие — научные утверждения, возникшие из проверенной гипотезы и подкреплённые научными данными. Однако название «закон» сохраняют за кратким и очень общим утверждением, описывающим явления природы, таким как закон сохранения энергии в любом процессе или второй закон движения Ньютона, который связывает силу, массу и ускорение простым уравнением $F = ma$. Теория же — менее краткое изложение наблюдаемых явлений. Например, теорию эволюции и теорию относительности нельзя выразить достаточно кратко, чтобы считать их законом. Самое большое различие между законом и теорией в том, что теория гораздо сложнее и подвижнее. Закон описывает одно действие, а теория объясняет целую группу связанных явлений. И если закон — это постулат, лежащий в основе научного метода, то теория — конечный результат этого процесса.

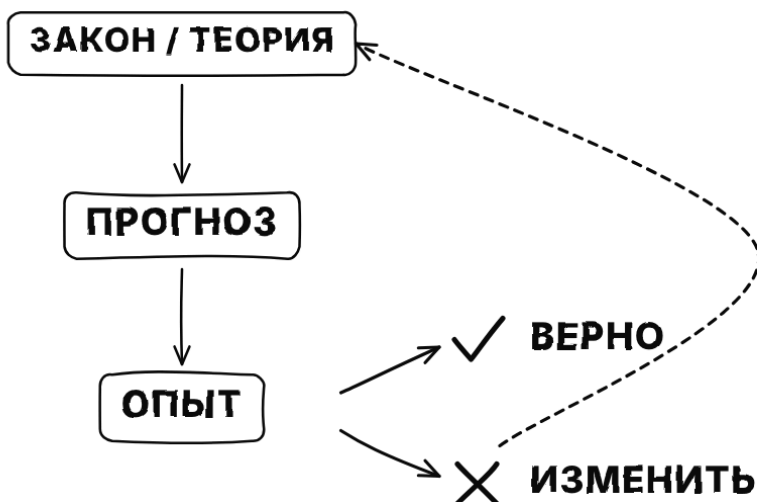
$$F = m a$$



Закон в одном уравнении

Менее широко применимые утверждения обычно называют принципами (например, принцип Паскаля, применимый только к жидкостям и газам), но различие между законами и принципами часто строго не соблюдается.

Модели, теории и законы помогают учёным анализировать уже собранные данные. Однако часто, после того как модель, теория или закон разработаны, они указывают учёным путь к новым открытиям, которых иначе не было бы.



Предсказание встречается опыт

Придуманые нами модели, теории и законы иногда предполагают существование ещё не наблюдавшихся объектов или явлений. Такие предсказания — замечательные победы и свидетельства силы науки. Именно глубинный порядок во Вселенной позволяет учёным делать столь впечатляющие предсказания. Однако если эксперимент не подтверждает наших предсказаний, теория или закон неверны, какими бы изящными или удобными они ни были. Законы никогда нельзя знать с абсолютной уверенностью, потому что невозможно поставить все мыслимые эксперименты, чтобы подтвердить закон во всех возможных случаях. Физики исходят из того, что все научные законы и теории верны, пока не замечен противоречащий пример. Если качественный, проверяемый эксперимент

противоречит прочно установленному закону, закон должен быть изменён или полностью отвергнут.

Вопросы

1. Почему учёным кажется бессмысленной фраза «это всего лишь теория»?
 - a. Потому что для учёного теория — проверяемое объяснение, подкреплённое данными и многократно подтверждённое
 - b. Потому что теории всегда доказаны абсолютно
 - c. Потому что теории никогда не меняются
 - d. Потому что теория — то же самое, что закон
2. Почему планетарную картину атома называют моделью?
 - a. Потому что это маленькая копия из проволоки
 - b. Потому что она доказана верной во всех случаях
 - c. Потому что орбиты электронов нельзя наблюдать непосредственно, но образ помогает объяснить то, что мы наблюдать можем
 - d. Потому что это одно уравнение
3. Что происходит с теорией, если эксперимент показывает, что одно из её следствий ложно?
 - a. Ничего, потому что теории не проверяют
 - b. Она становится законом
 - c. Её оставляют без изменений, потому что она изящна

- d. Её отбрасывают или изменяют, например ограничивая её область
4. Почему законы никогда нельзя знать с абсолютной уверенностью?
- a. Потому что невозможно поставить все мыслимые эксперименты во всех возможных случаях
 - b. Потому что законы — всего лишь догадки
 - c. Потому что учёные расходятся во мнениях о каждом законе
 - d. Потому что законы меняются каждый год

Ответы

1. **a)** Для учёного теория — не догадка, а проверяемое объяснение, подкреплённое данными и многократно подтверждённое разными группами.
2. **c)** Модель представляет то, что нельзя показать непосредственно; мысленный образ объясняет наблюдения, например свет нагретых газов.
3. **d)** Если эксперимент показывает, что следствие ложно, теорию либо отбрасывают, либо надлежащим образом изменяют.
4. **a)** Невозможно поставить все эксперименты, которые подтвердили бы закон во всех случаях, поэтому законы верны, пока не появится противоречащий пример.

Задачи

1. Объясните своими словами разницу между законом и теорией, пользуясь примерами из текста.

Подсказка: Сравните, насколько кратко каждый сформулирован и сколько охватывает.

Ответ: Закон — краткое, очень общее утверждение о закономерности, часто одно уравнение, как закон сохранения энергии или второй закон Ньютона $F = ma$. Теория менее кратка и сложнее; она объясняет целую группу связанных явлений, как теория эволюции или теория относительности.

2. Почему теории тяготения Ньютона не нужна модель, а молекулярно-кинетической теории газов нужна?

Подсказка: Спросите себя, можно ли увидеть соответствующие объекты органами чувств.

Ответ: Объекты тяготения, например падающие тела и планеты, можно наблюдать непосредственно органами чувств. Атомы и молекулы газа слишком малы для наблюдения, поэтому мы мысленно их представляем, чтобы понять, что сообщают приборы.

3. В тексте сказано, что закон, каким бы изящным он ни был, в определённом случае должен быть изменён или отвергнут. В каком случае и почему?

Подсказка: Подумайте, что должна описывать наука: Вселенную такой, какая она есть, или такой, какой мы её воображаем.

Ответ: Когда ему противоречит качественный, проверяемый эксперимент. Наука должна описывать Вселенную такой, какая она есть, поэтому решают наблюдение и опыт, а не изящество или удобство.

Научный метод и рождение современной физики

Изучение науки вообще и физики в особенности — приключение, очень похожее на исследование неизведанного океана.

Совершаются открытия, формулируются модели, теории и законы, и красота физической Вселенной становится ещё возвышеннее благодаря обрётённому пониманию.

Ибн аль-Хайсам (его иногда называют Альхазеном), учёный X–XI веков, работавший в Каире, значительно продвинул понимание оптики и зрения. Но его вклад гораздо шире.

Доказывая, что прежние подходы были неверны, он подчёркивал, что учёные должны быть готовы отвергнуть существующее знание и стать «врагом» всего, что читают; он говорил, что учёные должны доверять только объективным свидетельствам. Аль-Хайсам подчёркивал необходимость повторных экспериментов и проверки и признавал, что органы чувств и предубеждения могут вести к неверным выводам. Его работа предвосхитила научный метод, которым мы пользуемся сегодня.

Исследуя мир и собирая о нём сведения, учёные следуют процессу, который называется научным методом. Обычно этот процесс начинается с наблюдения и вопроса, который учёный будет исследовать. Затем учёный обычно изучает литературу по теме, а потом выдвигает гипотезу. Далее учёный проверяет гипотезу, ставя эксперимент. Наконец, учёный анализирует результаты эксперимента и делает вывод. Заметьте, что научный

метод можно применять во многих ситуациях, не ограниченных наукой, и его можно приспосабливать к обстоятельствам.

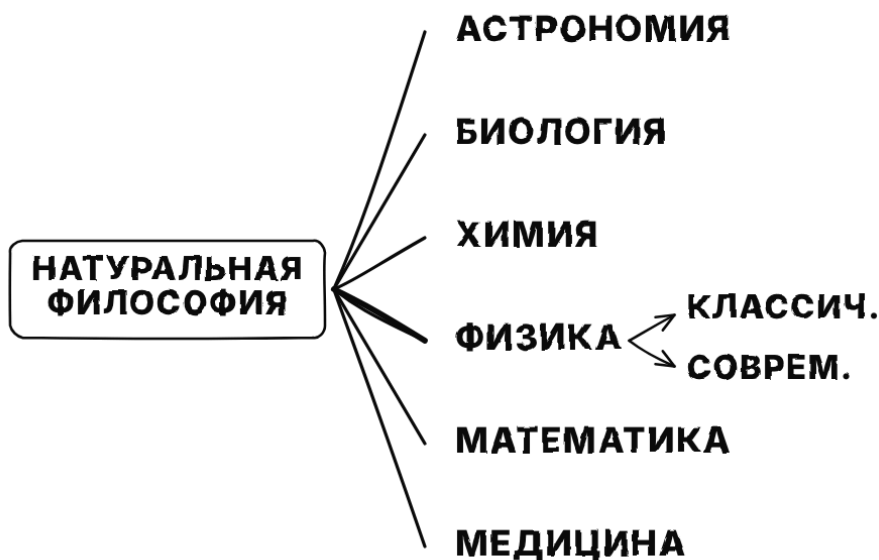
Рассмотрим пример. Допустим, вы пытаетесь завести машину, но она не заводится. Вы, несомненно, задаётесь вопросом: почему машина не заводится? Чтобы ответить на этот вопрос, можно последовать научному методу. Прежде всего вы можете выяснить, по каким разным причинам машина может не заводится. Затем вы формулируете гипотезу. Например, вы можете решить, что машина не заводится, потому что в двигателе нет масла. Чтобы это проверить, вы открываете капот и смотрите уровень масла. Вы видите, что уровень масла в норме, и поэтому заключаете, что дело не в масле. Чтобы искать неисправность дальше, вы можете выдвинуть новую гипотезу для проверки и повторить весь процесс.



Почему машина не заводится?

Физика не всегда была отдельной самостоятельной дисциплиной. Она и по сей день связана с другими науками. Слово «физика» происходит от греческого слова, означающего «природа». Изучение природы стали называть «натуральной философией». С древности и до эпохи Возрождения натуральная философия охватывала многие области, в том числе астрономию, биологию, химию, физику, математику и медицину. За последние несколько веков рост знаний привёл ко всё большей специализации и разветвлению натуральной философии на отдельные науки, причём физика сохранила самые основные её стороны. Физику в том виде, в каком она развивалась от Возрождения до конца XIX века, называют классической. В

современную физику её превратили революционные открытия, сделанные начиная с начала XX века.



Ветви натуральной философии

Классическая физика не является точным описанием Вселенной, но она — превосходное приближение при следующих условиях: вещество должно двигаться со скоростями меньше примерно 1 % скорости света, рассматриваемые объекты должны быть достаточно большими, чтобы их можно было разглядеть в микроскоп, и в игре могут быть только слабые гравитационные поля, например поле Земли. Поскольку люди живут именно в таких условиях, классическая физика кажется интуитивно разумной, а многие стороны современной физики — странными. Вот почему модели так полезны в современной физике: они

позволяют представить себе явления, с которыми мы обычно не сталкиваемся. Модели понятны нам по-человечески: с их помощью можно представить, что происходит, когда тела движутся с большими скоростями, или вообразить, какими могут быть объекты, слишком малые для наших органов чувств. Например, мы можем понимать свойства атома, потому что можем представить его себе, хотя никогда не видели атом своими глазами. Новые инструменты, конечно, позволяют лучше представлять явления, которые мы не можем видеть. Более того, новые приборы в последние годы позволили нам в самом деле получить «изображение» атома.

Чтобы законы классической физики были применимы, должны выполняться следующие условия: вещество должно двигаться со скоростями меньше примерно 1 % скорости света, рассматриваемые объекты должны быть достаточно большими, чтобы их можно было разглядеть в микроскоп, и в игре могут быть только слабые гравитационные поля (например, поле Земли).

Некоторые из самых впечатляющих достижений науки сделаны в современной физике. Многие законы классической физики были изменены или отвергнуты, и это привело к революционным переменам в технике, обществе и нашем взгляде на Вселенную. Как и научная фантастика, современная физика полна удивительных объектов за пределами нашего обычного опыта, но перед фантастикой у неё есть преимущество: всё это совершенно реально. Почему же тогда бóльшая часть этой книги посвящена темам классической физики? Причин две: классическая физика даёт чрезвычайно точное описание Вселенной в широком круге

повседневных обстоятельств, а знание классической физики необходимо для понимания современной.

Сама современная физика состоит из двух революционных теорий — теории относительности и квантовой механики. Эти теории имеют дело соответственно с очень быстрым и с очень малым. Теорией относительности нужно пользоваться всякий раз, когда тело движется быстрее примерно 1 % скорости света или находится в сильном гравитационном поле, например вблизи Солнца. Квантовой механикой нужно пользоваться для объектов, слишком малых, чтобы разглядеть их в микроскоп. Сочетание этих двух теорий — релятивистская квантовая механика, и она описывает поведение малых объектов, движущихся с большими скоростями или находящихся в сильном гравитационном поле. Релятивистская квантовая механика — лучшая из имеющихся у нас универсально применимых теорий. Из-за её математической сложности ею пользуются только тогда, когда это необходимо, а другие теории применяют всякий раз, когда они дают достаточно точные результаты. Мы, однако, увидим, что с алгеброй и тригонометрией, используемыми в этой книге, можно сделать очень многое и в современной физике.



Какую теорию выбрать

Вопросы

1. Что в научном методе, как его описывает текст, идёт сразу после формулировки гипотезы?
 - а. Вывод
 - б. Проверка гипотезы экспериментом
 - в. Новый вопрос
 - г. Публикация результата

2. Почему классическая физика кажется нам интуитивно разумной, а современная — странной?
- a. Потому что классическая физика точна, а современная нет
 - b. Потому что современную физику не проверяли
 - c. Потому что мы живём в условиях, где работает классическая физика: малые скорости, видимые объекты, слабое тяготение
 - d. Потому что классическую физику открыли раньше
3. Объект меньше, чем можно разглядеть в микроскоп. Какой теорией нужно его описывать?
- a. Квантовой механикой
 - b. Теорией относительности
 - c. Классической физикой
 - d. Натуральной философией
4. Почему бóльшая часть книги посвящена классической физике, хотя современная точнее?
- a. Потому что современная физика — всего лишь фантастика
 - b. Потому что современной физикой нельзя заниматься с помощью алгебры
 - c. Потому что классическую физику никогда не изменяли
 - d. Потому что классическая физика очень точна в повседневных условиях и нужна для понимания современной

Ответы

1. **б)** Учёный выдвигает гипотезу, а затем проверяет её экспериментом, прежде чем анализировать результаты.
2. **с)** Люди живут среди малых скоростей, видимых объектов и слабого тяготения — именно там, где классическая физика превосходно приближает действительность.
3. **а)** Для объектов, слишком малых, чтобы разглядеть их в микроскоп, нужно пользоваться квантовой механикой.
4. **д)** Текст называет две причины: классическая физика чрезвычайно точна в повседневных обстоятельствах и необходима для понимания современной физики.

Разобранные примеры

Почему машина не заводится? Ваша машина не заводится. Пользуясь научным методом, как в тексте, проверьте предположение, что в двигателе нет масла.

Наблюдение и вопрос: машина не заводится; почему?

Изучение темы: выясните, по каким разным причинам машина может не заводится.

Гипотеза: машина не заводится, потому что в двигателе нет масла.

Эксперимент: откройте капот и проверьте уровень масла.

Анализ и вывод: уровень масла в норме, значит, дело не в масле; выдвиньте новую гипотезу и повторите.

Ответ: Гипотеза о масле отвергнута; нужно проверить новую гипотезу.

Задачи

1. Для каждого случая скажите, какой теорией, по словам текста, нужно пользоваться: (а) космический аппарат движется быстрее

примерно 1 % скорости света; (б) электрон внутри атома; (в) брошенный мяч на Земле.

Подсказка: Вспомните три условия, при которых классическая физика — хорошее приближение.

Ответ: (а) Теорией относительности, потому что он движется быстрее примерно 1 % скорости света. (б) Квантовой механикой, потому что электрон меньше того, что можно разглядеть в микроскоп. (в) Классической физикой, потому что мяч медленный, видимый и находится в слабом тяготении Земли.

2. Что внёс Ибн аль-Хайсам в то, как делается наука, помимо своих работ по оптике?

Подсказка: Подумайте о его отношении к существующему знанию и к свидетельствам.

Ответ: Он настаивал, что учёные должны быть готовы отвергнуть существующее знание и доверять только объективным свидетельствам, подчёркивал необходимость повторных опытов и проверки и предупреждал, что органы чувств и предубеждения могут нас обманывать. Поэтому его работа предвосхитила научный метод.

Физические величины и единицы

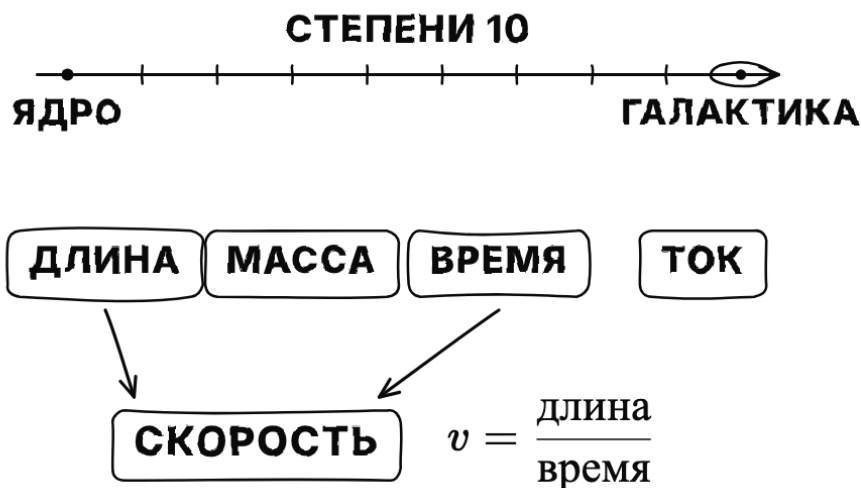
Проверьте себя. Знакомый рассказывает, что узнал о новом законе природы. Что можно сказать об этих сведениях ещё до того, как он опишет закон? Чем отличались бы эти сведения, если бы он сказал, что узнал о научной теории, а не о законе?

Не зная подробностей закона, всё равно можно заключить, что узнанное отвечает требованиям ко всем законам природы: это будет краткое описание окружающей нас Вселенной, формулировка глубинных правил, которым следуют все природные процессы. Если бы речь шла о теории, можно было бы заключить, что это крупное, широко применимое обобщение.

Графопостроитель уравнений: узнайте, как строить графики многочленов. Форма кривой меняется при изменении постоянных. Посмотрите на кривые отдельных слагаемых (например, $y = bx$), чтобы увидеть, как они складываются в кривую многочлена.

Круг объектов и явлений, которые изучает физика, огромен. От невероятно короткого времени жизни ядра до возраста Земли, от крошечных размеров субъядерных частиц до громадного расстояния до краёв известной Вселенной, от силы, с которой отталкивается прыгающая блоха, до силы между Землёй и Солнцем — здесь столько степеней десяти, что они поразят воображение даже самого опытного учёного. Числовые значения физических величин и уравнения физических принципов позволяют понимать природу гораздо глубже, чем одно лишь качественное описание. Чтобы охватить эти огромные

диапазоны, нужны и общепринятые единицы для их выражения. И мы увидим, что (даже в, казалось бы, будничном разговоре о метрах, килограммах и секундах) проявляется глубокая простота природы: большинство физических величин можно выразить через сочетания всего четырёх основных физических величин — длины, массы, времени и силы электрического тока.



Четыре основные величины

Физическую величину определяют, либо указывая, как её измеряют, либо указывая, как её вычисляют из других измерений. Например, расстояние и время мы определяем, указывая способы их измерения, а среднюю скорость — указывая, что она вычисляется как пройденное расстояние, делённое на время в пути.

Результаты измерений физических величин выражают в единицах — стандартизованных значениях. Например, длину дистанции забега — физическую величину — можно выразить в метрах (для спринтеров) или в километрах (для стайеров). Без стандартизованных единиц учёным было бы чрезвычайно трудно осмысленно выражать и сравнивать измеренные значения.

В мире используются две основные системы единиц: единицы СИ (их также называют метрической системой) и английские единицы (их также называют традиционной или имперской системой). Английские единицы исторически применялись в странах, когда-то входивших в Британскую империю, и до сих пор широко используются в США. Практически все остальные страны мира теперь используют в качестве стандарта единицы СИ; метрическая система — это и стандартная система, о которой договорились учёные и математики. Сокращение «СИ» происходит от французского *Système International* — «Международная система».

В таблице основных единиц СИ приведены единицы, используемые во всей этой книге: для длины — метр (м); для массы — килограмм (кг); для времени — секунда (с); для силы электрического тока — ампер (А). В нескольких применениях, где они очень распространены, книга пользуется единицами не из СИ, например при измерении кровяного давления в миллиметрах ртутного столба (мм рт. ст.). Всякий раз, когда речь пойдёт о единицах не из СИ, они будут связаны с единицами СИ через перевод.

Любопытный факт: одни физические величины фундаментальнее других, а самые фундаментальные можно определить только через процедуру их измерения. Поэтому единицы, в которых их измеряют, называют основными единицами. В этой книге основными физическими величинами считаются длина, масса, время и сила электрического тока. (Заметьте, что электрический ток появится в книге гораздо позже.) Все остальные физические величины, такие как сила и электрический заряд, можно выразить как алгебраические сочетания длины, массы, времени и силы тока (например, скорость — это длина, делённая на время); такие единицы называют производными.

Вопросы

1. Как, согласно тексту, определяется средняя скорость?
 - a. Способом её прямого измерения, как линейкой
 - b. Как пройденное расстояние, делённое на время в пути
 - c. Как одна из четырёх основных величин
 - d. Сравнением со скоростью света
2. Зачем нужны стандартизованные единицы?
 - a. Без них учёные не могли бы осмысленно выражать и сравнивать измеренные значения
 - b. Они делают числа меньше
 - c. Все страны должны говорить на одном языке
 - d. Физические величины со временем меняются

3. Какая из этих величин в этой книге производная, а не основная?
- a. Длина
 - b. Масса
 - c. Время
 - d. Скорость
4. Что, согласно тексту, делает физическую величину основной?
- a. Это самая большая величина в природе
 - b. Её можно определить только через процедуру её измерения
 - c. Её открыли первой
 - d. Её измеряют в английских единицах

Ответы

1. **b)** Расстояние и время определяют по способу их измерения, а среднюю скорость — по тому, как её вычисляют из них.
2. **a)** Без стандартизованных единиц было бы чрезвычайно трудно осмысленно выражать и сравнивать измеренные значения.
3. **d)** Скорость — это длина, делённая на время, алгебраическое сочетание основных величин, поэтому её единица производная.
4. **b)** Самые фундаментальные величины можно определить только через процедуру их измерения; их единицы — основные единицы.

Разобранные примеры

Закон или теория? Знакомый говорит, что узнал о новом законе природы. Что можно о нём знать до того, как он его

опишет, и что было бы иначе, будь это теория?

Каждый закон природы — краткое описание Вселенной, формулировка глубинных правил, которым следуют все природные процессы.

Значит, даже без подробностей закон, о котором говорит знакомый, должен быть таким кратким утверждением о глубинном правиле.

Теория же — крупное, широко применимое обобщение, а не краткое правило.

Ответ: Закон будет кратким утверждением о глубинном правиле природы; теория была бы крупным, широко применимым обобщением.

Задачи

1. Разделите на основные и производные величины, как их определяет эта книга: масса, скорость, сила электрического тока, сила, время.

Подсказка: Книга называет ровно четыре основные величины.

Ответ: Основные: масса, сила электрического тока и время (четвёртая — длина). Производные: скорость (длина, делённая на время) и сила — это алгебраические сочетания основных величин.

2. Бегун пробегает дистанцию 400 метров за 50 секунд. Пользуясь определением из текста, найдите его среднюю скорость.

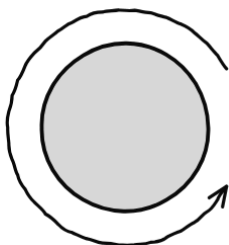
Подсказка: Средняя скорость вычисляется как пройденное расстояние, делённое на время в пути.

Ответ: 8 метров в секунду: 400 м, делённые на 50 с. Единица «метр в секунду» производная — длина, делённая на время.

Секунда, метр и килограмм

У единицы времени СИ, секунды (обозначение с), долгая история. Много лет её определяли как $1/86\,400$ средних солнечных суток. Позже был принят новый эталон, чтобы добиться большей точности и определить секунду через неизменное, постоянное физическое явление (потому что солнечные сутки удлиняются из-за очень постепенного замедления вращения Земли). Атомы цезия можно заставить колебаться очень равномерно, и эти колебания легко наблюдать и подсчитывать. В 1967 году секунду переопределили как время, за которое совершается 9 192 631 770 таких колебаний. Точность основных единиц крайне важна, потому что все измерения в конечном счёте выражаются в основных единицах и не могут быть точнее самих основных единиц.

1 СУТКИ



$\frac{1}{86\,400}$ сутки

ЗАМЕДЛЕНИЕ

ЦЕЗИЙ



9,192,631,770

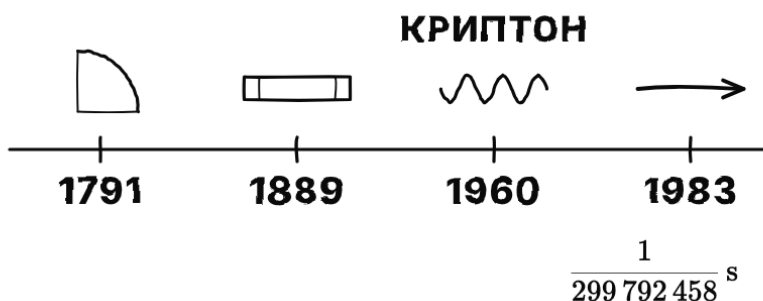
КОЛЕБАНИЯ = 1 С

Как определили секунду

Единица длины СИ — метр (обозначение м); его определение тоже менялось со временем, становясь всё более правильным и точным. Впервые метр определили в 1791 году как $1/10\,000\,000$ расстояния от экватора до Северного полюса. В 1889 году это измерение улучшили, переопределив метр как расстояние между двумя штрихами, нанесёнными на платино-иридиевый стержень, который теперь хранится под Парижем. К 1960 году стало возможным определить метр ещё точнее через длину волны света, и его снова переопределили как $1\,650\,763,73$ длины волны оранжевого света, испускаемого атомами криптона. В 1983 году метр получил нынешнее определение (отчасти ради большей точности): расстояние, которое свет проходит в вакууме за $1/299\,792\,458$ секунды. Это изменение делает скорость света

равной ровно 299 792 458 метрам в секунду. Длина метра изменится, если когда-нибудь скорость света будет измерена точнее.

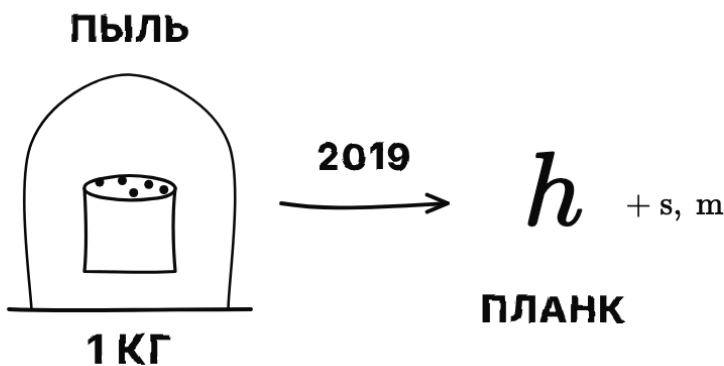
$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$



Четыре определения метра

Единица массы СИ — килограмм (обозначение кг); прежде его определяли как массу платино-иридиевого цилиндра, хранящегося вместе со старым эталоном метра в Международном бюро мер и весов под Парижем. Точные копии прежнего эталона килограмма хранятся также в Национальном институте стандартов и технологий США, NIST, в Гейтерсберге (штат Мэриленд) под Вашингтоном и в других местах по всему миру. Определение всех прочих масс в конечном счёте можно было свести к сравнению с эталоном массы. Хотя платино-иридиевый

цилиндр был стоек к коррозии, к его поверхности могли прилипнуть загрязнения из воздуха, со временем слегка меняя его массу. В мае 2019 года научное сообщество приняло более устойчивое определение килограмма. Теперь килограмм определяется через секунду, метр и постоянную Планка h (квантовомеханическую величину, связывающую энергию фотона с его частотой).



Как определили килограмм

Электрический ток и его единица, ампер, появятся в главе об электрическом токе, сопротивлении и законе Ома, когда речь пойдёт об электричестве и магнетизме. Первые разделы этой книги посвящены механике, жидкостям и газам, теплоте и

волнам. В этих темах все нужные физические величины можно выразить через основные единицы длины, массы и времени.

Вопросы

1. Почему секунду переопределили через колебания цезия, а не через солнечные сутки?
 - a. Потому что солнечные сутки медленно удлиняются и поэтому непостоянны
 - b. Потому что цезий дешевле часов
 - c. Потому что солнечные сутки слишком коротки для измерения
 - d. Потому что колебания цезия легче увидеть глазом
2. Почему точность основных единиц так важна?
 - a. Потому что ими пользуются только учёные
 - b. Потому что их дорого хранить
 - c. Потому что каждое измерение выражается через них и не может быть точнее их
 - d. Потому что они меняются каждый год
3. Что следует из определения метра как расстояния, которое свет проходит за $1/299\,792\,458$ секунды?
 - a. Скорость света измеряют грубее
 - b. Скорость света по определению равна ровно $299\,792\,458$ метрам в секунду
 - c. Метр с каждым годом становится длиннее

- d. Свет проходит один метр в секунду
4. Почему в 2019 году заменили старый платино-иридиевый килограмм?
- a. Его потеряли
 - b. Он полностью проржавел
 - c. Он был слишком тяжёл для сравнения
 - d. К нему прилипали загрязнения из воздуха, со временем слегка меняя его массу

Ответы

1. a) Вращение Земли постепенно замедляется, поэтому солнечные сутки удлиняются; колебания цезия дают постоянный эталон.
2. c) Все измерения в конечном счёте выражаются в основных единицах и не могут быть точнее самих этих единиц.
3. b) Если задать метр через время пути света, скорость света по определению становится равной ровно 299 792 458 метрам в секунду.
4. d) Хотя цилиндр был стоек к коррозии, на нём оседали загрязнения из воздуха, слегка меняя его массу, поэтому приняли более устойчивое определение.

Разобранные примеры

Откуда берётся $1/86\,400$ Когда-то секунду определяли как $1/86\,400$ средних солнечных суток. Покажите, что в сутках 86 400 секунд.

В сутках 24 часа.

В каждом часе 60 минут, значит, в сутках $24 \times 60 = 1440$ минут.

В каждой минуте 60 секунд, значит, в сутках $1440 \times 60 = 86\,400$ секунд.

Поэтому одна секунда — это $1/86\,400$ суток.

Ответ: 86 400 секунд в сутках

Задачи

1. Впервые метр определили в 1791 году как $1/10\,000\,000$ расстояния от экватора до Северного полюса. Каково, по этому определению, расстояние от экватора до полюса в километрах?

Подсказка: Если метр — десятимиллионная доля расстояния, то расстояние — десять миллионов метров.

Ответ: 10 000 км: это 10 000 000 м, а в 1 км 1000 м.

2. Свет проходит 299 792 458 метров за одну секунду. Какое расстояние он примерно проходит за одну тысячную секунды?

Подсказка: Разделите расстояние за одну секунду на 1000.

Ответ: Около 300 000 метров, то есть 300 км: $299\,792\,458 \div 1000 \approx 299\,792$ м.

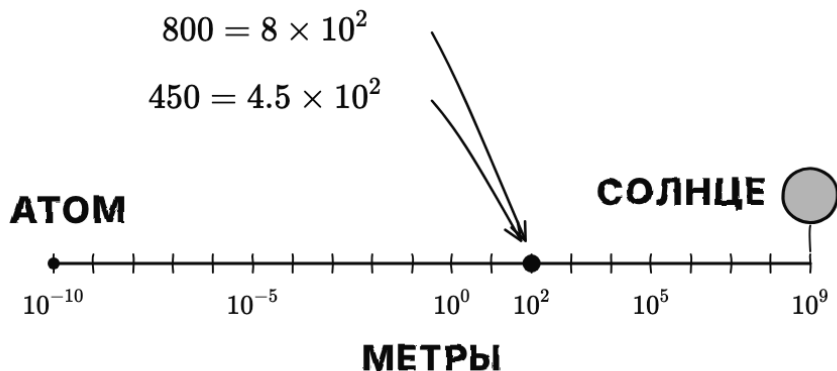
Метрические приставки

Единицы СИ входят в метрическую систему. Метрическая система удобна для научных и инженерных расчётов, потому что единицы в ней различаются в 10 раз и его степени. В таблице метрических приставок приведены приставки и обозначения разных множителей, кратных 10.

Преимущество метрических систем в том, что перевод единиц сводится только к степеням 10. В метре 100 сантиметров, в километре 1000 метров и так далее. В неметрических системах, например в американской системе традиционных единиц, соотношения не так просты: в футе 12 дюймов, в миле 5280 футов и так далее. Ещё одно преимущество метрической системы в том, что одну и ту же единицу можно использовать в чрезвычайно широком диапазоне значений, просто подбирая подходящую метрическую приставку. Например, расстояния в метрах удобны в строительстве, расстояния в километрах — в авиаперелётах, а крошечные нанометры удобны в оптическом конструировании. В метрической системе не нужно изобретать новые единицы для особых применений.

Термин «порядок величины» обозначает масштаб значения, выраженного в метрической системе. Каждая степень 10, например 10^0 , 10^1 , 10^2 и так далее, — это отдельный порядок величины. О всех величинах, которые можно выразить как произведение на определённую степень 10, говорят, что они одного порядка. Например, число 800 можно записать как 8×10^2 , а число 450 — как $4,5 \times 10^2$. Значит, числа 800 и 450 одного

порядка: 10^2 . Порядок величины можно считать прикидкой масштаба значения. Диаметр атома — порядка 10^{-10} м, а диаметр Солнца — порядка 10^9 м.



Порядки величины

Основные единицы, описанные в этой главе, — те, что обеспечивают наибольшую правильность и точность измерений. Среди физиков бытует мнение, что, раз у вещества есть микроскопическое строение, лучше всего было бы основывать эталоны измерений на микроскопических объектах и фундаментальных физических явлениях, таких как скорость света. Микроскопический эталон удалось создать для времени: он основан на колебаниях атома цезия.

Эталон длины когда-то основывался на длине волны света (малой длине), испускаемого атомами определённого вида, но его вытеснило более точное измерение скорости света. Если удастся измерять массу атомов или определённого их расположения, например кремниевого шара, точнее, чем эталон килограмма, можно будет основать измерения массы на малом масштабе. Возможно также, что электрические явления малого масштаба когда-нибудь позволят основать единицу заряда на заряде электронов и протонов, но пока ток и заряд связаны с крупномасштабными токами и силами между проводами.

В таблице метрических приставок для степеней 10 для каждой приставки даны обозначение, значение и пример. Экса, обозначение Э, — это 10^{18} : эксаметр — примерно расстояние, которое свет проходит за столетие. Пета, обозначение П, — это 10^{15} : петасекунда — около 30 миллионов лет. Тера, обозначение Т, — это 10^{12} : тераватт — мощность сильного лазера. Гига, обозначение Г, — это 10^9 : гигагерц — частота микроволн. Мега, обозначение М, — это 10^6 : мегакюри — высокая радиоактивность. Кило, обозначение к, — это 10^3 : километр — около 6/10 мили. Гекто, обозначение г, — это 10^2 : гектолитр — 26 галлонов. Дека, обозначение да, — это 10^1 : декаграмм — чайная ложка масла. Без приставки значение равно 10^0 , то есть 1. Деци, обозначение д, — это 10^{-1} : децилитр — меньше половины банки газировки. Санти, обозначение с, — это 10^{-2} : сантиметр — толщина кончика пальца. Милли, обозначение м, — это 10^{-3} : миллиметр — рост блохи в холке. Микро, обозначение мк, — это 10^{-6} : микрометр — деталь, видимая в микроскоп. Нано, обозначение н, — это 10^{-9} : нанограмм — маленькая пылинка. Пико, обозначение п, — это 10^{-12} : пикофарад — маленький

конденсатор в радиоприёмнике. Фемто, обозначение ф, — это 10^{-15} : фемтометр — размер протона. Атто, обозначение а, — это 10^{-18} : аттосекунда — время, за которое свет пересекает атом.

экса	<i>E</i>	10^{18}	деци	<i>d</i>	10^{-1}
пета	<i>P</i>	10^{15}	санти	<i>c</i>	10^{-2}
тера	<i>T</i>	10^{12}	милли	<i>m</i>	10^{-3}
гига	<i>G</i>	10^9	микро	μ	10^{-6}
мега	<i>M</i>	10^6	нано	<i>n</i>	10^{-9}
кило	<i>k</i>	10^3	пико	<i>p</i>	10^{-12}
			фемто	<i>f</i>	10^{-15}
			атто	<i>a</i>	10^{-18}

Метрические приставки

Вопросы

1. Почему переводить единицы в метрической системе проще, чем в американских традиционных единицах?
 - а. Потому что метрические единицы меньше
 - б. Потому что метрический перевод сводится только к степеням 10

- c. Потому что в метрической системе меньше величин
 - d. Потому что метрические единицы старше
2. Почему 800 и 450 одного порядка величины?
- a. Потому что оба числа чётные
 - b. Потому что оба меньше 1000 и больше 400
 - c. Потому что оба можно записать как число, умноженное на 10^2
 - d. Потому что их разность меньше 400
3. Для какой основной единицы, согласно тексту, уже создан микроскопический эталон?
- a. Для времени, на основе колебаний атома цезия
 - b. Для массы, на основе кремниевого шара
 - c. Для электрического заряда, на основе электронов
 - d. Для длины, на основе света криптона
4. В чём, согласно тексту, одно из преимуществ метрических приставок?
- a. Они делают каждую величину целым числом
 - b. Они избавляют от необходимости измерять
 - c. Они совпадают с английскими единицами
 - d. Одну и ту же единицу можно использовать в огромном диапазоне, не изобретая новых

Ответы

1. **b)** Метрический перевод сводится только к степеням 10, например 100 сантиметров в метре, а в традиционных единицах — 12 дюймов в футах и 5280 футов в миле.

2. c) 800 — это 8×10^2 , а 450 — это $4,5 \times 10^2$, так что у них общая степень 10^2 .

3. a) Микроскопический эталон создан для времени, на основе колебаний цезия.

4. d) С приставками одна единица служит от нанометров в оптике до километров в авиAPERелётах, так что новые единицы не нужны.

Разобранные примеры

От атома до Солнца Диаметр атома — порядка 10^{-10} м, а диаметр Солнца — порядка 10^9 м. На сколько порядков они различаются?

Каждый порядок величины — одна степень 10.

От 10^{-10} до 10^0 — 10 степеней 10.

От 10^0 до 10^9 — ещё 9.

Всего $10 + 9 = 19$ степеней 10.

Ответ: 19 порядков величины

Задачи

1. Запишите 3000 метров и 5 миллиметров с помощью метрических приставок и скажите, какого порядка каждая величина в метрах.

Подсказка: Кило — это 10^3 , милли — 10^{-3} .

Ответ: 3000 м = 3 км, то есть 3×10^3 м, порядок 10^3 м. 5 мм = 5×10^{-3} м, порядок 10^{-3} м.

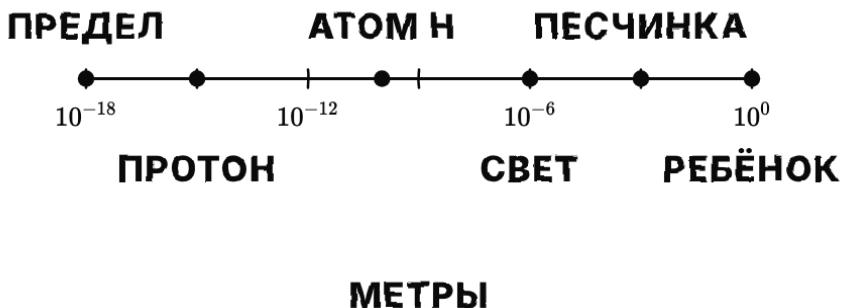
2. Сколько сантиметров в километре?

Подсказка: В метре 100 сантиметров, а в километре 1000 метров.

Ответ: 100 000 сантиметров: $1000 \times 100 = 100\,000$, то есть 10^5 .

Известные диапазоны и перевод единиц

Огромность Вселенной и широта, с которой применима физика, видны по широкому кругу примеров известных длин, масс и времён в таблице приближённых значений. Изучив эту таблицу, вы почувствуете, сколь широк круг возможных тем и числовых значений.

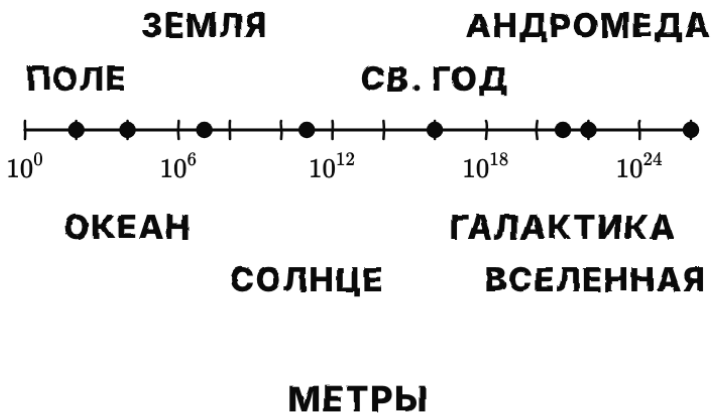


Малые длины, степени десяти

В таблице длины даны в метрах, массы в килограммах, а времена в секундах, каждая величина — как степень 10, а более точные

значения — в скобках. 10^{-18} м — нынешний экспериментальный предел наименьшей наблюдаемой детали; масса 10^{-30} кг — это масса электрона ($9,11 \times 10^{-31}$ кг); 10^{-23} с — время, за которое свет пересекает протон. 10^{-15} м — диаметр протона; 10^{-27} кг — масса атома водорода ($1,67 \times 10^{-27}$ кг); 10^{-22} с — среднее время жизни крайне нестабильного ядра. 10^{-14} м — диаметр ядра урана; 10^{-15} кг — масса бактерии; 10^{-15} с — время одного колебания видимого света. 10^{-10} м — диаметр атома водорода; 10^{-5} кг — масса комара; 10^{-13} с — время одного колебания атома в твёрдом теле. 10^{-8} м — толщина мембран в клетках живых организмов; 10^{-2} кг — масса колибри; 10^{-8} с — время одного колебания радиоволны УКВ-диапазона. 10^{-6} м — длина волны видимого света; 1 килограмм — масса литра воды (около кварты); 10^{-3} с — длительность нервного импульса. 10^{-3} м — размер песчинки; 10^2 кг — масса человека; 1 секунда — время одного удара сердца. 1 метр — рост четырёхлетнего ребёнка; 10^3 кг — масса автомобиля; 10^5 с — одни сутки ($8,64 \times 10^4$ с). 10^2 м — длина футбольного поля; 10^8 кг — масса большого корабля; 10^7 с — один год ($3,16 \times 10^7$ с). 10^4 м — наибольшая глубина океана; 10^{12} кг — масса большого айсберга; 10^9 с — около половины продолжительности человеческой жизни. 10^7 м — диаметр Земли; 10^{15} кг — масса ядра кометы; 10^{11} с — письменная история. 10^{11} м — расстояние от Земли до Солнца; 10^{23} кг — масса Луны ($7,35 \times 10^{22}$ кг); 10^{17} с — возраст Земли. 10^{16} м — расстояние, которое свет проходит за 1 год, световой год; 10^{25} кг — масса Земли ($5,97 \times 10^{24}$ кг); 10^{18} с — возраст Вселенной. 10^{21} м — диаметр нашей Галактики, Млечного Пути, а 10^{30} кг — масса Солнца ($1,99 \times 10^{30}$ кг). 10^{22} м — расстояние от Земли до ближайшей большой галактики, Андромеды, а 10^{42} кг — масса Млечного Пути (нынешний верхний предел). 10^{26} м — расстояние от Земли до краёв

известной Вселенной, а 10^{53} кг — масса известной Вселенной (нынешний верхний предел).



Большие длины, степени десяти

Часто бывает нужно перевести одни единицы в другие.

Например, если вы читаете европейскую кулинарную книгу, некоторые количества могут быть указаны в литрах, и их нужно перевести в чашки. Или, может быть, вы читаете, как дойти пешком из одного места в другое, и хотите знать, сколько миль придётся пройти. Тогда нужно перевести футы в мили.

$$80 \text{ m} \rightarrow \text{km}$$

ПЕРЕВОДНОЙ МНОЖИТЕЛЬ

$$\frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}}$$

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

МЕТРЫ СОКРАЩАЮТСЯ

Переводим 80 м в км

Рассмотрим простой пример перевода единиц. Допустим, мы хотим перевести 80 метров (м) в километры (км).

Сначала нужно записать, какие единицы у вас есть и в какие вы хотите их перевести. В данном случае у нас метры, а перевести мы хотим в километры.

Затем нужно найти переводной множитель, связывающий метры с километрами. Переводной множитель — это отношение, показывающее, сколько одних единиц равно другой единице. Например, в 1 футе 12 дюймов, в 1 метре 100 сантиметров, в 1 минуте 60 секунд и так далее. В данном случае мы знаем, что в 1 километре 1000 метров.

Теперь можно записать перевод единиц. Запишем имеющиеся единицы и умножим их на переводной множитель так, чтобы единицы сократились: $80 \text{ м} \times (1 \text{ км} / 1000 \text{ м}) = 0,080 \text{ км}$.

Заметьте, что ненужная единица м сокращается и остаётся только нужная единица км. Этим способом можно переводить любые единицы. В приложении С дан более полный список переводных множителей.

Пример: перевод единиц, короткая поездка домой. Допустим, вы проезжаете 10,0 км от школы до дома за 20,0 мин. Вычислите вашу среднюю скорость (а) в километрах в час (км/ч) и (б) в метрах в секунду (м/с). (Примечание: средняя скорость — это пройденное расстояние, делённое на время в пути.)

10,0 КМ



20,0 МИН

$$\frac{10.0 \text{ km}}{20.0 \text{ min}} = 0.500 \frac{\text{km}}{\text{min}}$$

$$0.500 \frac{\text{km}}{\text{min}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 30.0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Поездка домой: 30,0 км/ч

Стратегия. Сначала вычислим среднюю скорость в данных единицах. Затем приведём среднюю скорость к нужным единицам, подобрав верный переводной множитель и умножив на него. Верный переводной множитель — тот, что сокращает ненужную единицу и оставляет на её месте нужную.

Решение для (а). (1) Вычислим среднюю скорость. Средняя скорость — это пройденное расстояние, делённое на время в пути. (Пока примем это определение как данность; средняя скорость и другие понятия движения будут рассмотрены в одном из следующих разделов.) В виде уравнения: средняя скорость = расстояние / время. (2) Подставим данные значения расстояния и времени: средняя скорость = 10,0 км / 20,0 мин = 0,500 км/

мин. (3) Переведём км/мин в км/ч: умножим на переводной множитель, который сократит минуты и оставит часы. Этот переводной множитель — 60 мин/ч: $0,500 \text{ км/мин} \times 60 \text{ мин/ч} = 30,0 \text{ км/ч}$.

Обсуждение (а). Чтобы проверить ответ, учтите следующее. (1) Убедитесь, что вы правильно сократили единицы при переводе. Если вы записали переводной множитель вверх ногами, единицы в уравнении не сократятся как следует. Если вы случайно перевернёте отношение, единицы не сократятся, а дадут неверные единицы: $\text{км/мин} \times 1 \text{ ч/60 мин} = (1/60) \text{ км} \cdot \text{ч/мин}^2$, а это явно не нужные нам км/ч. (2) Проверьте, что единицы окончательного ответа — нужные. В задаче требовалось найти среднюю скорость в км/ч, и мы действительно получили эти единицы. (3) Проверьте значащие цифры. Поскольку каждое из данных в задаче значений имеет три значащие цифры, ответ тоже должен иметь три значащие цифры. Ответ 30,0 км/ч действительно имеет три значащие цифры, так что он верен. Заметьте, что значащие цифры переводного множителя не важны, потому что час по определению равен 60 минутам, так что точность переводного множителя абсолютна.

Вопросы

1. Что такое переводной множитель?
 - а. Отношение, показывающее, сколько одних единиц равно другой единице
 - б. Число, которое делает каждый ответ меньше

- c. Точность измерительного прибора
 - d. Степень 10, приписанная к единице
2. Как понять, что переводной множитель записан вверх ногами?
- a. Ответ получается отрицательным
 - b. Единицы не сокращаются, и у результата неверные единицы
 - c. В ответе слишком много значащих цифр
 - d. Число становится больше
3. Почему значащие цифры множителя 60 мин/ч не ограничивают ответ 30,0 км/ч?
- a. Потому что 60 — круглое число
 - b. Потому что множитель используется лишь раз
 - c. Потому что час по определению равен 60 минутам, так что множитель абсолютно точен
 - d. Потому что минуты сокращаются
4. Примерно сколько порядков величины разделяют диаметр атома водорода (10^{-10} м) и диаметр Земли (10^7 м)?
- a. 3
 - b. 7
 - c. 10
 - d. 17

Ответы

1. a) Переводной множитель — это отношение вроде 1000 метров в 1 километре или 60 секунд в 1 минуте.

- 2. б)** Если множитель перевёрнут, единицы не сокращаются; получается км·ч/мин², а это явно не км/ч.
- 3. с)** Час по определению равен ровно 60 минутам, поэтому точность переводного множителя абсолютна.
- 4. д)** От 10^{-10} до 10^7 — 17 степеней 10, и это показывает огромный разброс длин в таблице.

Разобранные примеры

Короткая поездка домой Вы проезжаете 10,0 км от школы до дома за 20,0 мин. Какова ваша средняя скорость в км/ч?

Средняя скорость — это пройденное расстояние, делённое на время в пути.

Подставим: $10,0 \text{ км} \div 20,0 \text{ мин} = 0,500 \text{ км/мин}$.

Чтобы перейти от минут к часам, умножим на переводной множитель 60 мин/1 ч, который сокращает минуты и оставляет часы.

$0,500 \text{ км/мин} \times 60 \text{ мин/ч} = 30,0 \text{ км/ч}$ — три значащие цифры, как у данных.

Ответ: 30,0 км/ч

Задачи

1. Часть (б) того же примера: выразите среднюю скорость 30,0 км/ч в метрах в секунду.

Подсказка: Используйте 1000 м в 1 км и 3600 с в 1 ч, чтобы километры и часы сократились.

Ответ: $8,33 \text{ м/с}$: $30,0 \text{ км/ч} \times 1000 \text{ м/км} \times 1 \text{ ч/3600 с} = 30\,000/3600 \text{ м/с} \approx 8,33 \text{ м/с}$.

2. Переведите 2500 метров в километры с помощью переводного множителя.

Подсказка: Умножьте на $1 \text{ км}/1000 \text{ м}$, чтобы метры сократились.

Ответ: 2,5 км: $2500 \text{ м} \times 1 \text{ км}/1000 \text{ м} = 2,5 \text{ км}$.

3. Длина прогулки — 15 840 футов. Сколько это миль?

Подсказка: В миле 5280 футов; умножьте на $1 \text{ миля}/5280 \text{ футов}$.

Ответ: 3 мили: $15\,840 \div 5280 = 3$.

Завершаем поездку домой

(4) Далее проверим, разумен ли ответ. Возьмём сведения из задачи: если за треть часа (20 мин) вы проезжаете 10 км, то за час проехали бы втрое больше. Ответ действительно кажется разумным.

$$30.0 \text{ km/h}$$

$$10 \text{ км за } \frac{1}{3} \text{ h} \Rightarrow 30 \text{ км за } 1 \text{ h}$$

$$30.0 \frac{\cancel{\text{km}}}{\cancel{\text{h}}} \times \frac{1\cancel{\text{h}}}{3600 \text{ s}} \times \frac{1000 \text{ m}}{1\cancel{\text{km}}} = 8.33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$0.500 \text{ km/min} \Rightarrow 8.33 \text{ m/s}$$

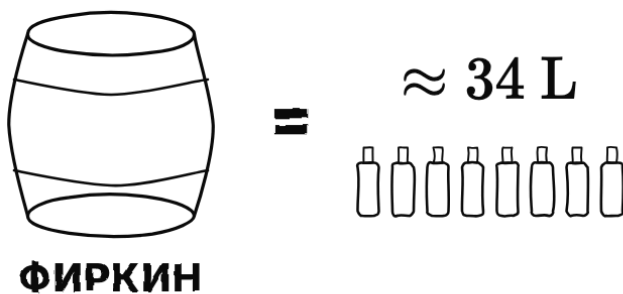
От км/ч к м/с

Решение для (б). Перевести среднюю скорость в метры в секунду можно несколькими способами. (1) Начнём с ответа к (а) и переведём км/ч в м/с. Нужны два переводных множителя: один переводит часы в секунды, другой — километры в метры. (2)

Умножение на них даёт: средняя скорость = $30,0 \text{ км/ч} \times 1 \text{ ч}/3600 \text{ с} \times 1000 \text{ м}/1 \text{ км}$, так что средняя скорость = $8,33 \text{ м/с}$.

Обсуждение (б). Если бы мы начали с $0,500 \text{ км/мин}$, понадобились бы другие переводные множители, но ответ был бы тем же: $8,33 \text{ м/с}$.

Вы, возможно, заметили, что ответы в только что разобранным примере даны с тремя цифрами. Почему? Когда нужно заботиться о числе цифр в том, что вы вычисляете? Почему бы не записать все цифры, которые выдаёт калькулятор? Ответить на эти вопросы поможет раздел «Правильность, точность и значащие цифры».

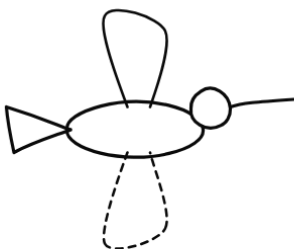


ЯЧМ. ЗЕРНО?

Фиркин пива

Нестандартные единицы. Хотя есть множество знакомых нам всем единиц, существуют и гораздо менее известные. Например, фиркин — единица объёма, которой когда-то измеряли пиво. Один фиркин равен примерно 34 литрам. Чтобы узнать больше о нестандартных единицах, поищите в словаре или энциклопедии разные «меры и веса». Обратите внимание на необычные единицы, например ячменное зерно, которых нет в тексте. Подумайте, как определяется эта единица, и укажите её связь с единицами СИ.

Проверьте себя. Некоторые колибри взмахивают крыльями больше 50 раз в секунду. Учёный измеряет время, за которое колибри делает один взмах. Какой основной единицей учёному следует описывать измерение? Каким множителем, кратным 10, учёный, скорее всего, воспользуется, чтобы точно описать движение? Назовите метрическую приставку, соответствующую этому множителю.



50 ВЗМ./С

$$\frac{1}{50} \text{ s} = 0.020 \text{ s}$$

$$= 20 \text{ ms}$$

$$1 \text{ ms} = 10^{-3} \text{ s}$$

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

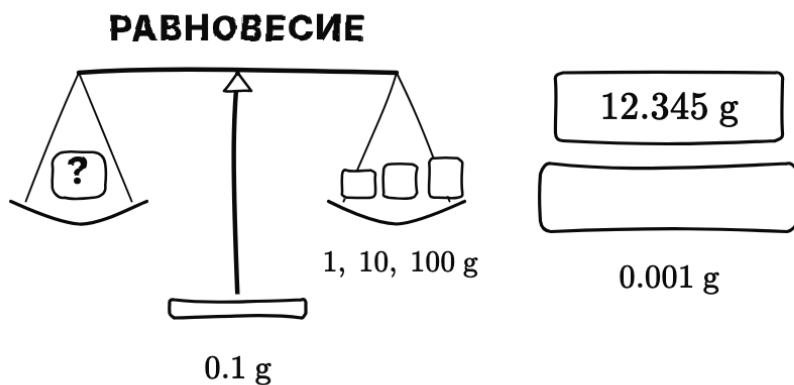
Взмах крыла колибри

Учёный будет измерять время между взмахами в основной единице — секундах. Поскольку крылья машут так быстро, учёному, вероятно, придётся измерять в миллисекундах, то есть в 10^{-3} секунды. (50 взмахов в секунду соответствуют 20 миллисекундам на взмах.)

Проверьте себя. Один кубический сантиметр равен одному миллилитру. Что это говорит о разных единицах метрической системы СИ?

Основная единица длины (метр), вероятно, используется для построения производной единицы объёма (литра). Величина миллилитра зависит от величины сантиметра.

Двухчашечные механические весы служат для сравнения разных масс. Обычно тело неизвестной массы кладут на одну чашу, а тела известной массы — на другую. Когда коромысло, соединяющее чаши, горизонтально, массы на обеих чашах равны. «Известные массы» — обычно металлические цилиндры стандартной массы, например 1 грамм, 10 граммов и 100 граммов. Многие механические весы, например двухчашечные, сменились цифровыми, которые обычно могут измерять массу тела точнее. Если механические весы показывают массу тела лишь с точностью до десятой доли грамма, то многие цифровые весы измеряют массу с точностью до тысячной доли грамма.



Вопросы

1. Почему 30,0 км/ч кажется разумным ответом для 10 км, пройденных за 20 мин?
 - a. Потому что 20 минут — треть часа, так что за час проедешь втрое больше
 - b. Потому что все машины ездят примерно со скоростью 30 км/ч
 - c. Потому что 10 плюс 20 — это 30
 - d. Потому что переводной множитель равен 60
2. Почему для перевода км/ч в м/с нужны два переводных множителя?
 - a. Потому что у скорости две значащие цифры
 - b. Потому что меняются и единица расстояния, и единица времени
 - c. Потому что метры и секунды — производные единицы
 - d. Потому что один множитель всегда перевёрнут
3. Почему учёный станет описывать один взмах крыла колибри в миллисекундах?
 - a. Потому что миллисекунда — основная единица времени
 - b. Потому что взмахи длятся несколько секунд
 - c. Потому что крылья машут так быстро, что каждый взмах длится лишь тысячные доли секунды
 - d. Потому что миллисекунды точнее любой другой единицы

4. Что означает, что один кубический сантиметр равен одному миллилитру?
- а. Что объём — основная величина
 - б. Что литры и метры не связаны
 - с. Что кубические сантиметры больше
 - д. Что единица объёма произведена от единицы длины

Ответы

1. **а)** За треть часа вы проезжаете 10 км, значит, за целый час — втрое больше, 30 км.
2. **б)** Один множитель переводит часы в секунды, другой — километры в метры.
3. **с)** При 50 взмахах в секунду каждый взмах длится 20 миллисекунд, так что подходит приставка милли, 10^{-3} .
4. **д)** Литр — производная единица, построенная из метра, поэтому миллилитр зависит от сантиметра.

Разобранные примеры

Переводим поездку домой в м/с Переведите среднюю скорость 30,0 км/ч в метры в секунду.

Нужны два переводных множителя: один для часов в секунды, другой для километров в метры.

Умножим: $30,0 \text{ км/ч} \times 1 \text{ ч}/3600 \text{ с} \times 1000 \text{ м}/1 \text{ км}$.

Часы и километры сокращаются, остаются м/с.

$$30,0 \times 1000 \div 3600 = 8,33.$$

Ответ: 8,33 м/с

Задачи

1. Некоторые колибри взмахивают крыльями больше 50 раз в секунду. Сколько миллисекунд длится один взмах?

Подсказка: Одну секунду делим на 50 взмахов; в 1 секунде 1000 миллисекунд.

Ответ: 20 миллисекунд: $1 \text{ с} \div 50 = 0,02 \text{ с}$, то есть 20 мс.

2. Один фиркин равен примерно 34 литрам. Примерно сколько литров в 3 фиркинах?

Подсказка: Умножьте на переводной множитель 34 литра на фиркин.

Ответ: Около 102 литров: $3 \text{ фиркина} \times 34 \text{ л/фиркин} = 102 \text{ л}$.

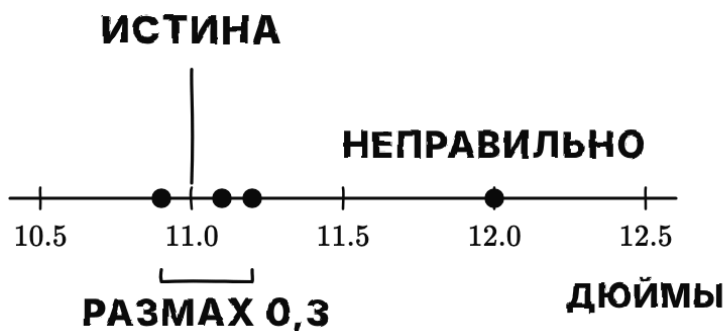
3. Переведите 72 км/ч в метры в секунду.

Подсказка: Умножьте на $1 \text{ ч}/3600 \text{ с}$ и на $1000 \text{ м}/1 \text{ км}$.

Ответ: 20 м/с: $72 \times 1000 \div 3600 = 20$.

Правильность, точность и погрешность

Наука основана на наблюдении и эксперименте, то есть на измерениях. Правильность — это то, насколько измерение близко к истинному значению измеряемой величины. Допустим, например, что вы измеряете длину стандартного листа бумаги для принтера. На упаковке, в которой вы купили бумагу, сказано, что длина листа — 11,0 дюйма. Вы измеряете длину листа трижды и получаете: 11,1 дюйма, 11,2 дюйма и 10,9 дюйма. Эти измерения довольно правильны, потому что очень близки к истинному значению 11,0 дюйма. Если бы вы, напротив, получили 12 дюймов, ваше измерение было бы не очень правильным.



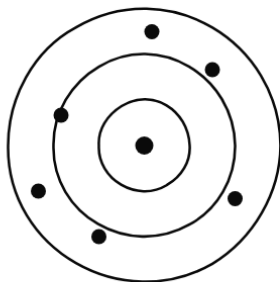
Правильно и точно

Точность измерительной системы — это то, насколько хорошо согласуются повторные измерения (выполненные в одинаковых условиях). Вернёмся к примеру с измерением бумаги. Точность измерений относится к разбросу измеренных значений. Один из способов оценить точность измерений — найти размах, то есть разность между наименьшим и наибольшим измеренными значениями. В нашем случае наименьшее значение было 10,9 дюйма, а наибольшее — 11,2 дюйма. Значит, измеренные значения отличались друг от друга самое большее на 0,3 дюйма. Эти измерения были сравнительно точными, потому что значения не слишком различались. Однако если бы измеренные значения были 10,9, 11,1 и 11,9, измерения были бы не очень

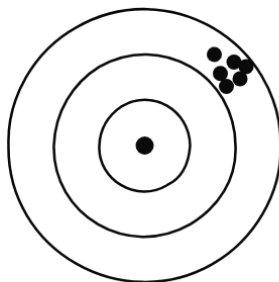
точными, потому что от измерения к измерению значения заметно менялись бы.

Измерения в примере с бумагой и правильны, и точны, но бывает, что измерения правильны, но неточны, или точны, но неправильны. Рассмотрим пример: система GPS пытается определить положение ресторана в городе. Представьте, что ресторан находится в центре мишени, а каждая попытка GPS определить его положение — чёрная точка. На первом рисунке видно, что измерения GPS далеко разбросаны друг от друга, но их центр близок к истинному положению ресторана в центре мишени. Это говорит о системе измерений с низкой точностью и высокой правильностью. На втором же рисунке измерения GPS собраны довольно тесно друг к другу, но далеко от цели. Это говорит о системе измерений с высокой точностью и низкой правильностью.

● = РЕСТОРАН



**ПРАВИЛЬНО,
НЕТОЧНО**

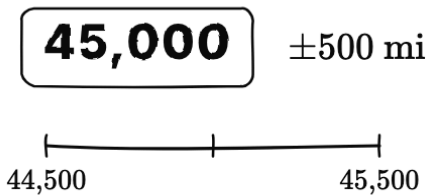


**ТОЧНО,
НЕПРАВИЛЬНО**

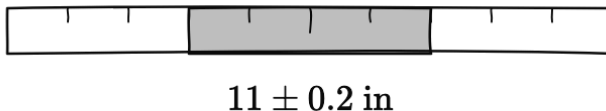
Две мишени GPS

Степень правильности и точности измерительной системы связана с погрешностью измерений. Погрешность — количественная мера того, насколько измеренные значения отклоняются от эталонного или ожидаемого значения. Если ваши измерения не очень правильны или точны, погрешность ваших значений будет очень большой. Говоря шире, погрешность можно считать оговоркой к вашим измеренным значениям. Например, если вас спросят о пробеге вашей машины, вы можете сказать, что он 45 000 миль плюс-минус 500 миль. Эта величина «плюс-минус» и есть погрешность вашего значения. То есть вы указываете, что настоящий пробег машины может быть и всего 44 500 миль, и целых 45 500 миль, и любым между ними. Любое измерение содержит какую-то погрешность.

В нашем примере с измерением длины бумаги можно сказать, что длина листа 11 дюймов плюс-минус 0,2 дюйма. Погрешность измерения A часто обозначают δA , так что результат измерения записывают как $A \pm \delta A$. В нашем примере с бумагой длину листа можно записать как 11 дюймов $\pm$ 0,2.



$$A \pm \delta A$$

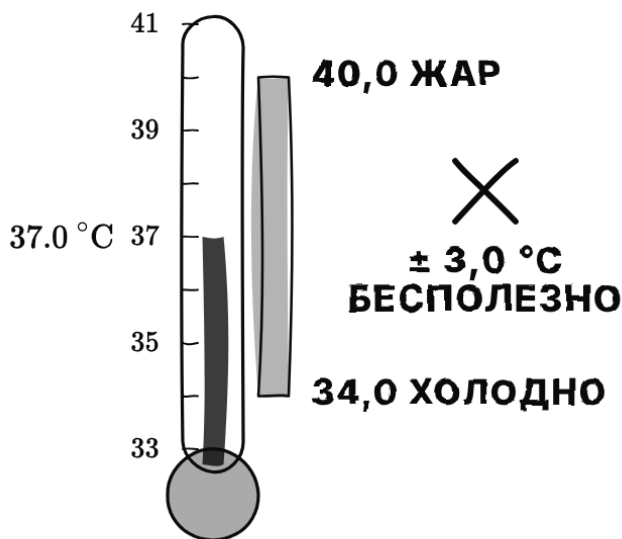


$$A \pm \delta A$$

К факторам, создающим погрешность измерения, относятся: во-первых, ограничения измерительного прибора; во-вторых, умение того, кто измеряет; в-третьих, неровности измеряемого предмета; в-четвёртых, любые другие факторы, влияющие на результат (сильно зависят от ситуации). В нашем примере такими факторами могут быть следующие: наименьшее деление линейки — 0,1 дюйма, у человека с линейкой плохое зрение или

одна сторона листа немного длиннее другой. Во всяком случае, погрешность измерения должна основываться на тщательном учёте всех факторов, которые могут на неё влиять, и их возможного действия.

Связи с жизнью: жар или озноб? Погрешность — важнейшая информация и в физике, и во многих других практических областях. Представьте, что вы ухаживаете за больным ребёнком. Вы подозреваете у ребёнка жар и измеряете ему температуру термометром. Что, если погрешность термометра составляет 3,0 °C? Если термометр показал 37,0 °C (нормальную температуру тела), «истинная» температура может быть где угодно — от переохлаждения при 34,0 °C до опасного жара при 40,0 °C. Термометр с погрешностью 3,0 °C был бы бесполезен.



Бесполезный термометр

Вопросы

1. Определения положения ресторана с помощью GPS сильно разбросаны, но их центр совпадает с рестораном. Как описать такую систему?
 - a. Высокая точность, низкая правильность
 - b. Низкая точность, высокая правильность
 - c. Высокая точность, высокая правильность
 - d. Низкая точность, низкая правильность

2. Три измерения листа бумаги дали 10,9, 11,1 и 11,9 дюйма. Почему они не очень точны?
- a. Потому что они заметно меняются от измерения к измерению
 - b. Потому что ни одно не равно 11,0 дюйма
 - c. Потому что их сделали линейкой
 - d. Потому что их всего три
3. О чём говорит запись пробега машины как 45 000 миль плюс-минус 500 миль?
- a. Машина проехала ровно 45 500 миль
 - b. Одометр сломан
 - c. Истинный пробег — где угодно от 44 500 до 45 500 миль
 - d. Машина проезжает 500 миль в год
4. Почему термометр с погрешностью 3,0 °C бесполезен для проверки жара?
- a. Потому что он показывает градусы Цельсия
 - b. Потому что он всегда показывал бы 37,0 °C
 - c. Потому что температура тела никогда не меняется
 - d. Потому что показание 37,0 °C может означать что угодно от 34,0 °C до 40,0 °C

Ответы

1. **b)** Разбросанные точки означают низкую точность; то, что их центр совпадает с целью, означает высокую правильность.
2. **a)** Точность — это разброс повторных значений; размах в 1,0 дюйма — заметный разброс.

3. c) Величина «плюс-минус» — это погрешность, так что истинное значение может быть где угодно в этом диапазоне.

4. d) Истинная температура может быть где угодно — от переохлаждения до опасного жара, так что показание ничего полезного не говорит.

Разобранные примеры

Размах измерений бумаги Три измеренные длины листа — 11,1, 11,2 и 10,9 дюйма. Каков размах и что он говорит о точности?

О точности можно судить по размаху — разности между наибольшим и наименьшим значениями.

Наибольшее значение — 11,2 дюйма, наименьшее — 10,9 дюйма.

$11,2 - 10,9 = 0,3$ дюйма.

Значения отличаются друг от друга самое большее на 0,3 дюйма, так что они сравнительно точны.

Ответ: 0,3 дюйма; измерения сравнительно точны

Задачи

1. Длина записана как 11 дюймов $\pm 0,2$ дюйма. Каковы наименьшее и наибольшее возможные значения истинной длины?

Подсказка: Вычтите и прибавьте погрешность.

Ответ: От 10,8 до 11,2 дюйма: $11 - 0,2$ и $11 + 0,2$.

2. Назовите четыре фактора, создающих погрешность, которые перечисляет текст, и приведите для каждого пример при измерении бумаги.

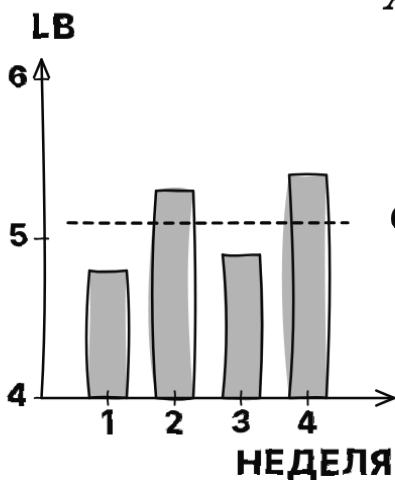
Подсказка: Подумайте о линейке, человеке, бумаге и всём остальном.

Ответ: Ограничения прибора (наименьшее деление линейки — 0,1 дюйма), умение человека (плохое зрение), неровности предмета (одна сторона листа немного длиннее) и другие факторы, зависящие от ситуации.

Относительная погрешность и значащие цифры

Один из способов выразить погрешность — в процентах от измеренного значения. Если измерение A выражено с погрешностью δA , то относительная погрешность в процентах (%погр) определяется как $\% \text{погр} = \delta A / A \times 100 \%$.

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



СРЕДНЕЕ 5,1

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

5 lb $\pm$ 8%

Относительная погрешность пакета яблок

Пример: вычисление относительной погрешности, пакет яблок. Продуктовый магазин продаёт пакеты яблок по 5 фунтов. За месяц вы покупаете четыре пакета и каждый раз взвешиваете

яблоки. Вы получаете такие результаты: вес на первой неделе — 4,8 фунта; на второй — 5,3 фунта; на третьей — 4,9 фунта; на четвёртой — 5,4 фунта. Ранее, по дополнительным измерениям, вы установили, что погрешность среднего веса пятифунтового пакета составляет $\pm 0,4$ фунта. Каковы средний вес пакета и относительная погрешность его веса по этим 4 измерениям?

Стратегия. Среднее из четырёх измеренных весов — 5,1 фунта. Заметьте, что измеренное среднее согласуется с номинальным весом 5 фунтов в пределах погрешности 0,4 фунта. Погрешность этого значения, δA , составляет 0,4 фунта. Чтобы найти относительную погрешность веса, воспользуемся уравнением:

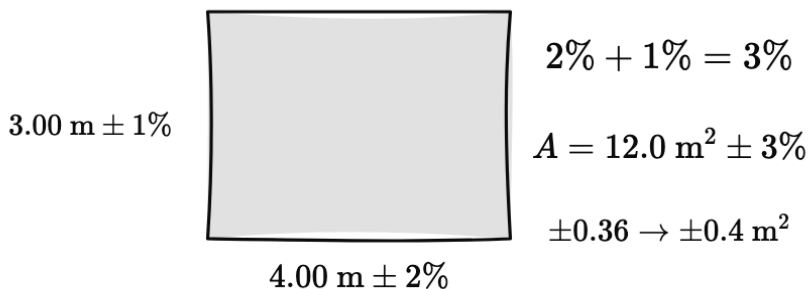
$$\% \text{погр} = \delta A / A \times 100 \%$$

Решение. Подставим известные значения в уравнение: $\% \text{погр} = 0,4 \text{ фунта} / 5,1 \text{ фунта} \times 100 \% = 8 \%$.

Обсуждение. Можно заключить, что вес пакета яблок — 5 фунтов $\pm 8 \%$. Подумайте, как изменилась бы эта относительная погрешность, если бы пакет яблок был вдвое легче, а погрешность веса осталась прежней. Совет на будущее: вычисляя относительную погрешность, всегда помните, что дробь нужно умножить на 100 %. Если этого не сделать, получится десятичная дробь, а не значение в процентах.

Всё, что вычислено из измеренных величин, имеет погрешность. Например, площадь пола, вычисленная по измерениям его длины и ширины, имеет погрешность, потому что погрешности есть у длины и ширины. Насколько велика погрешность того, что вычислено умножением или делением? Если у входящих в вычисление измерений малые погрешности (несколько процентов или меньше), то для умножения и деления можно

пользоваться способом сложения процентов. Согласно этому способу, относительная погрешность величины, вычисленной умножением или делением, равна сумме относительных погрешностей величин, участвующих в вычислении. Например, если длина пола 4,00 м, а ширина 3,00 м, с погрешностями 2 % и 1 % соответственно, то площадь пола 12,0 м² и её погрешность 3 %. (В единицах площади это 0,36 м², что мы округляем до 0,4 м², поскольку площадь пола дана с точностью до десятой доли квадратного метра.)



Сложение процентов для пола

Проверьте себя. Школьный тренер по лёгкой атлетике только что купил новый секундомер. В инструкции к секундомеру сказано, что его погрешность $\pm 0,05$ с. Лучший спринтер команды

пробежал 100 метров за 12,04 секунды на прошлой неделе и за 11,96 секунды на этой. Можно ли заключить, что на этой неделе он пробежал быстрее?



линейка: 1 mm штангенц.: 0.01 mm

Быстрее или нет?

Нет, погрешность секундомера слишком велика, чтобы надёжно различить эти времена.

Важный фактор правильности и точности измерений — точность измерительного инструмента. Вообще говоря, точный измерительный инструмент — это тот, что может измерять значения очень мелкими шагами. Например, обычная линейка измеряет длину с точностью до миллиметра, а штангенциркуль — до 0,01 миллиметра. Штангенциркуль — более точный

инструмент, потому что может измерять очень малые различия в длине. Чем точнее измерительный инструмент, тем точнее и правильнее могут быть измерения.

Записывая измеренные значения, мы можем указать лишь столько цифр, сколько изначально измерили своим инструментом. Например, если вы измеряете длину палочки обычной линейкой, у вас может получиться 36,7 см. Записать это значение как 36,71 см нельзя, потому что ваш инструмент недостаточно точен, чтобы измерить сотую долю сантиметра. Следует заметить, что последнюю цифру измеренного значения тот, кто измерял, так или иначе оценил на глаз. Например, человек, измеряющий палочку линейкой, замечает, что её длина, по-видимому, где-то между 36,6 и 36,7 см, и должен оценить значение последней цифры. По правилу значащих цифр, последняя записанная цифра измерения — это первая цифра, в которой есть неопределённость. Чтобы найти число значащих цифр в значении, начните с первой измеренной цифры слева и сосчитайте цифры до последней записанной справа. Например, у измеренного значения 36,7 см три цифры, то есть три значащие цифры. Значащие цифры указывают на точность инструмента, которым измерено значение.

Вопросы

1. Если бы пакет яблок был вдвое легче, а его погрешность осталась 0,4 фунта, что произошло бы с относительной погрешностью?
 - а. Она осталась бы прежней

- b. Она уменьшилась бы вдвое
 - c. Она примерно удвоилась бы
 - d. Она стала бы нулевой
2. Погрешность длины пола — 2 %, ширины — 1 %. Какова относительная погрешность его площади?
- a. 3 %
 - b. 2 %
 - c. 1 %
 - d. 1,5 %
3. Почему тренер не может заключить, что 11,96 с быстрее, чем 12,04 с?
- a. Потому что спринтер бежал разные дистанции
 - b. Потому что времена записаны в разные недели
 - c. Потому что секундомер округляет до целых секунд
 - d. Потому что погрешность секундомера слишком велика, чтобы различить эти времена
4. Почему длину палочки, измеренную обычной линейкой, нельзя записать как 36,71 см?
- a. Потому что линейка не измеряет до сотой доли сантиметра
 - b. Потому что палочки не бывают такой длины
 - c. Потому что в 36,71 слишком мало цифр
 - d. Потому что последняя цифра должна быть нулём

Ответы

1. **с)** Относительная погрешность — это $\delta A/A \times 100 \%$; если уменьшить A вдвое при том же δA , дробь удвоится.
2. **а)** При умножении с малыми погрешностями относительные погрешности складываются: $2 \% + 1 \% = 3 \%$.
3. **д)** При $\pm 0,05$ с на каждом отсчёте два времени перекрываются, так что секундомер не может их различить.
4. **а)** Можно указать лишь столько цифр, сколько измерил инструмент; линейка недостаточно точна для сотых долей сантиметра.

Разобранные примеры

Пакет яблок Четыре пятифунтовых пакета яблок весят 4,8, 5,3, 4,9 и 5,4 фунта. Погрешность среднего веса — $\pm 0,4$ фунта.

Найдите средний вес и относительную погрешность.

Сложим четыре веса: $4,8 + 5,3 + 4,9 + 5,4 = 20,4$ фунта.

Разделим на 4: среднее — 5,1 фунта, что согласуется с номинальными 5 фунтами в пределах 0,4 фунта.

Воспользуемся формулой $\% \text{погр} = \delta A/A \times 100 \%$ при $\delta A = 0,4$ фунта и $A = 5,1$ фунта.

$0,4 \div 5,1 \times 100 \% \approx 8 \%$.

Ответ: 5,1 фунта, относительная погрешность около 8 %

Задачи

1. Длина пола 4,00 м, ширина 3,00 м, погрешности 2 % и 1 %.

Найдите площадь и её погрешность в квадратных метрах.

Подсказка: Умножьте длину на ширину, затем сложите относительные погрешности.

Ответ: $12,0 \text{ м}^2 \pm 0,4 \text{ м}^2$: площадь $12,0 \text{ м}^2$, погрешность 3 %, а 3 % от $12,0 \text{ м}^2$ — это $0,36 \text{ м}^2$, округлённые до $0,4 \text{ м}^2$.

2. Пакет яблок весит 2,55 фунта с погрешностью 0,4 фунта. Какова его относительная погрешность?

Подсказка: Разделите погрешность на значение и умножьте на 100 %.

Ответ: Около 16 %: $0,4 \div 2,55 \times 100 \% \approx 15,7 \%$, примерно вдвое больше 8 % для пакета в 5,1 фунта.

3. Сколько значащих цифр у каждого значения: 36,7 см, 11,96 с, 4,00 м?

Подсказка: Считайте от первой измеренной цифры слева до последней записанной.

Ответ: Три, четыре и три: у 36,7 три, у 11,96 четыре, а у 4,00 три, потому что записанные нули были измерены.

Нули и значащие цифры в вычислениях

При подсчёте значащих цифр к нулям относятся по-особому.

Нули в 0,053 не значащие, потому что они лишь занимают места, указывая положение запятой. В 0,053 две значащие цифры.

Нули в 10,053 не просто занимают места, а значащие: в этом числе пять значащих цифр. Нули в 1300 могут быть значащими, а могут и не быть, — в зависимости от того, как записывают числа. Они могут означать, что число известно до последней цифры, а могут лишь занимать места. Так что у 1300 может быть две, три или четыре значащие цифры. (Чтобы избежать этой неоднозначности, запишите 1300 в стандартном виде.) Нули значащие, кроме случаев, когда они лишь занимают места.

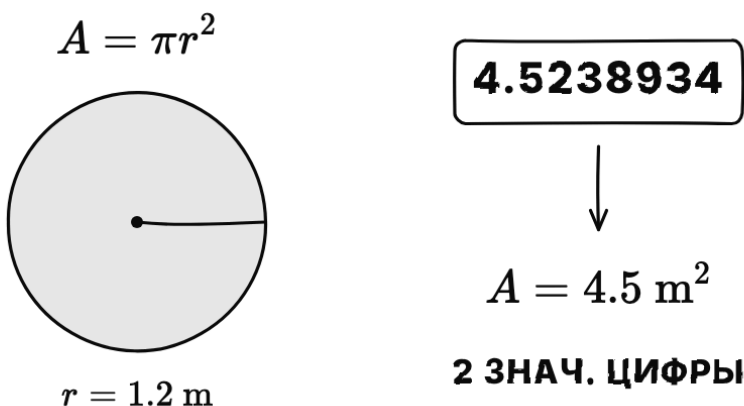
	ЗНАЧ. ЦИФРЫ
0.0009	1
15, 450.0	6
6×10^3	1
87.990	5
30.42	4

Какие нули считаются

Проверьте себя. Определите число значащих цифр в следующих измерениях: (1) 0,0009; (2) 15 450,0; (3) 6×10^3 ; (4) 87,990; (5) 30,42.

(а) 1; нули в этом числе лишь занимают места, указывая положение запятой. (б) 6; здесь нули показывают, что измерение сделано с точностью до десятых, так что нули значащие. (в) 1; множитель 10^3 указывает разряд, а не число измеренных цифр. (г) 5; последний нуль показывает, что измерение сделано с точностью до тысячных, так что он значащий. (д) 4; нули, стоящие между значащими цифрами числа, тоже значащие.

Когда объединяют измерения с разной правильностью и точностью, число значащих цифр в окончательном ответе не может быть больше, чем у наименее точного измеренного значения. Есть два разных правила — одно для умножения и деления, другое для сложения и вычитания; они рассмотрены ниже.



Округляем площадь круга

1. Для умножения и деления: в результате должно быть столько значащих цифр, сколько их у участвующей в вычислении величины с наименьшим числом значащих цифр. Например, площадь круга можно вычислить по его радиусу по формуле $A = \pi r^2$. Посмотрим, сколько значащих цифр будет у площади, если у радиуса их всего две, скажем $r = 1,2 \text{ м}$. Тогда $A = \pi r^2 =$

$(3,1415927...) \times (1,2 \text{ м})^2 = 4,5238934 \text{ м}^2$ — вот что вы получите на калькуляторе, выдающем восемь цифр. Но поскольку у радиуса лишь две значащие цифры, он ограничивает вычисленную величину двумя значащими цифрами, то есть $A = 4,5 \text{ м}^2$, хотя π известно по меньшей мере до восьми цифр.

2. Для сложения и вычитания: в ответе может быть не больше десятичных знаков, чем в наименее точном измерении.

Допустим, вы покупаете в магазине 7,56 кг картофеля, взвешенного на весах с точностью 0,01 кг. Затем вы оставляете в своей лаборатории 6,052 кг картофеля, взвешенного на весах с точностью 0,001 кг. Наконец, вы идёте домой и добавляете 13,7 кг картофеля, взвешенного на напольных весах с точностью 0,1 кг. Сколько килограммов картофеля у вас теперь и сколько значащих цифр уместно в ответе? Масса находится простым сложением и вычитанием: $7,56 \text{ кг} - 6,052 \text{ кг} + 13,7 \text{ кг} = 15,208 \text{ кг}$, что округляется до 15,2 кг. Далее находим наименее точное измерение: 13,7 кг. Это измерение дано с точностью до десятых, поэтому и окончательный ответ нужно дать с точностью до десятых. Итак, ответ округляется до десятых, и получается 15,2 кг.

КАРТОФЕЛЬ, КГ

$$\begin{array}{r} 7.56 \\ - 6.052 \\ \hline + 13.7 \\ \hline 15.208 \end{array} \begin{array}{l} 0.01 \text{ kg} \\ 0.001 \text{ kg} \\ 0.1 \text{ kg} \\ \rightarrow 15.2 \text{ kg} \end{array}$$

Складываем картофель

В этой книге большинство чисел считаются имеющими три значащие цифры. Кроме того, во всех разобранных примерах число значащих цифр согласовано. Вы заметите, например, что ответ с тремя цифрами основан на данных, верных по меньшей мере до трёх цифр. Если у входных данных меньше значащих цифр, их будет меньше и у ответа. Следят и за тем, чтобы число значащих цифр было разумным для поставленной ситуации. В некоторых темах, особенно в оптике, нужны более точные числа, и будет использоваться больше трёх значащих цифр. Наконец, если число точное, как двойка в формуле длины окружности $s = 2\pi r$, оно не влияет на число значащих цифр в вычислении.

Проверьте себя. Выполните следующие вычисления и запишите ответ с правильным числом значащих цифр. (а) У женщины три сумки: две весят по 13,5 фунта, а одна — 10,2 фунта. Каков общий вес сумок? (б) Сила F , действующая на тело, равна его массе m , умноженной на ускорение a . Если тележка массой 55 кг разгоняется с ускорением $0,0255 \text{ м/с}^2$, какая сила на неё действует? (Единица силы называется ньютоном и обозначается Н.)

(а) 37,2 фунта; поскольку число сумок — точное значение, оно не учитывается в значащих цифрах. (б) 1,4 Н; поскольку у значения 55 кг всего две значащие цифры, окончательное значение тоже должно иметь две значащие цифры.

Вопросы

1. Почему нули в 0,053 не значащие?
 - а. Потому что они лишь занимают места, указывая положение запятой
 - б. Потому что нули никогда не бывают значащими
 - с. Потому что число меньше единицы
 - д. Потому что они стоят после запятой
2. Радиус круга 1,2 м. Почему его площадь записывают как 4,5 м², а не 4,5238934 м²?
 - а. Потому что π известно лишь до двух цифр
 - б. Потому что калькуляторы округляют автоматически

- c. Потому что у радиуса лишь две значащие цифры, и это ограничивает результат
 - d. Потому что площади всегда округляют до одного десятичного знака
3. Почему при сложении 7,56 кг, вычитании 6,052 кг и сложении 13,7 кг ответ — 15,2 кг?
- a. Потому что у 6,052 кг больше всего десятичных знаков
 - b. Потому что в ответе не может быть больше десятичных знаков, чем в наименее точном измерении, 13,7 кг
 - c. Потому что все весы округляют до десятых
 - d. Потому что картофель взвешивали трижды
4. Почему двойка в $c = 2\pi r$ не влияет на число значащих цифр?
- a. Потому что это маленькое число
 - b. Потому что оно чётное
 - c. Потому что оно умножается на π
 - d. Потому что это точное число

Ответы

1. а) В 0,053 нули лишь указывают положение запятой, так что в числе две значащие цифры.
2. с) При умножении в результате столько значащих цифр, сколько у наименее точной величины; у радиуса их две.
3. b) При сложении и вычитании в ответе оставляют столько десятичных знаков, сколько у наименее точного значения.

4. d) Точные числа, например двойка в формуле длины окружности, не ограничивают значащие цифры.

Разобранные примеры

Площадь круга Радиус круга $r = 1,2$ м. Найдите его площадь $A = \pi r^2$ с правильным числом значащих цифр.

Калькулятор даёт $(3,1415927...) \times (1,2 \text{ м})^2 = 4,5238934 \text{ м}^2$.

При умножении в результате столько значащих цифр, сколько у наименее точного исходного значения.

У радиуса $1,2$ м две значащие цифры; π известно гораздо точнее.

Значит, площадь округляется до двух значащих цифр.

Ответ: $4,5 \text{ м}^2$

Задачи

1. У женщины три сумки: две весят по $13,5$ фунта, а одна — $10,2$ фунта. Каков общий вес с правильным числом значащих цифр?

Подсказка: Число сумок точное; сложите веса и сохраните десятичные знаки измеренных значений.

Ответ: $37,2$ фунта: $2 \times 13,5 + 10,2 = 37,2$; число сумок, две, точное и не ограничивает ответ.

2. Тележка массой 55 кг разгоняется с ускорением $0,0255 \text{ м/с}^2$. Пользуясь $F = ma$, найдите силу с правильным числом значащих цифр.

Подсказка: Перемножьте, затем оставьте столько значащих цифр, сколько у наименее точного исходного значения.

Ответ: $1,4 \text{ Н}$: $55 \times 0,0255 = 1,4025$, а у 55 кг всего две значащие цифры.

3. Сколько значащих цифр в 0,0009, 15 450,0 и 30,42?

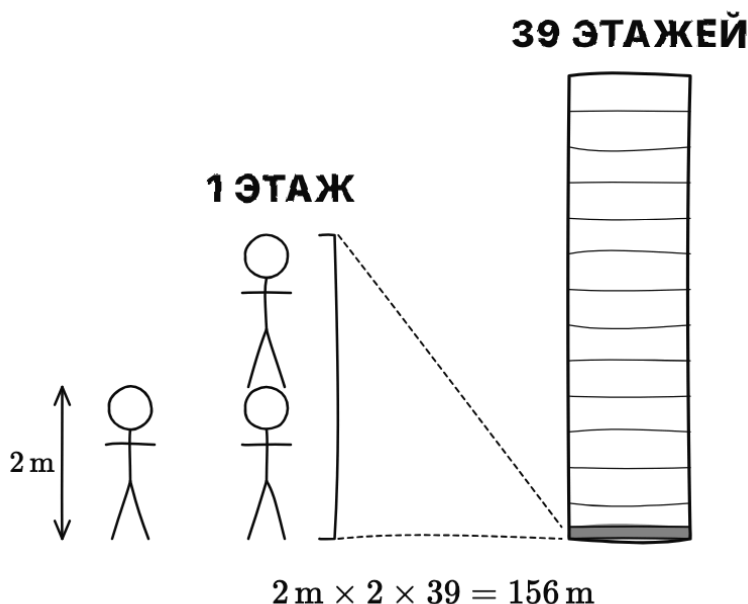
Подсказка: Нули, лишь указывающие положение запятой, не считаются; нули между цифрами или измеренные в конце считаются.

Ответ: 1, 6 и 4: нули в 0,0009 лишь занимают места, нули в 15 450,0 показывают измерение до десятых, а нуль в 30,42 стоит между значащими цифрами.

Приближённые оценки

Физикам, другим учёным и инженерам часто приходится делать приближённые оценки, или «прикидки», той или иной величины. Каково расстояние до определённого места? Какова примерно плотность данного предмета? Примерно какой ток будет в цепи? Многие приближённые числа основаны на формулах, входные величины которых известны лишь с ограниченной точностью. Развивая умение решать задачи (которое, изучая физику, можно применять в самых разных областях), вы будете развивать и умение делать прикидки. Эти навыки вы разовьёте, если будете мыслить количественное и не бояться рисковать. Как и в любом деле, помогает опыт, а также знакомство с единицами. Такие прикидки позволяют исключать некоторые сценарии или нереальные числа. Прикидки позволяют также спорить с другими и направляют наш подход к научному миру. Разберём два примера, чтобы это показать.

Пример: прикинем высоту здания. Можете ли вы прикинуть высоту одного из зданий в вашем кампусе или по соседству? Сделаем прикидку, исходя из роста человека. В этом примере мы вычислим высоту 39-этажного здания.



39-этажное здание в людях

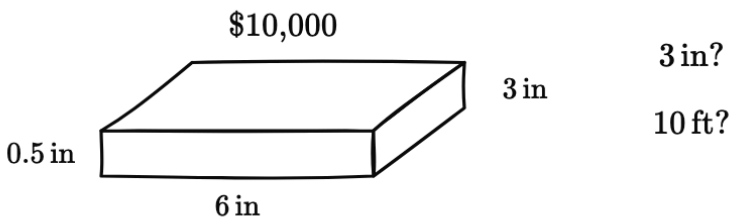
Стратегия. Подумайте о среднем росте взрослого мужчины. Высоту здания можно прикинуть, масштабируя рост человека.

Решение. Из условия примера мы знаем, что в здании 39 этажей. Если учесть, что высота одного этажа примерно равна длине двух взрослых людей (рост каждого около 2 м), то полную высоту здания можно оценить как $2 \text{ м}/1 \text{ человек} \times 2 \text{ человека}/1 \text{ этаж} \times 39 \text{ этажей} = 156 \text{ м}$.

Обсуждение. По известным величинам можно получить приближённое значение неизвестных. Если ширина вашей ладони 10 см, сколько ладоней уложится по ширине вашего стола? Какие ещё величины, кроме длины, можно прикинуть?

Пример: прикидка огромных чисел, триллион долларов.

Банковская пачка содержит сто купюр по 100 долларов и стоит 10 000 долларов. Государственный долг США в 2021 году составлял чуть больше 28 триллионов долларов. Большинство из нас не имеет никакого представления о том, сколько это — хотя бы один триллион. Допустим, вам дали триллион долларов купюрами по 100 долларов. Если сложить пачки по 100 купюр и равномерно покрыть ими футбольное поле (между зачётными зонами), прикиньте, какой высоты получится груда денег. (Здесь мы будем пользоваться футами и дюймами, а не метрами, потому что американские футбольные поля измеряют в ярдах.) Один ваш знакомый говорит — 3 дюйма, другой — 10 футов. А как думаете вы?



$$6 \times 3 \times 0.5 = 9 \text{ in}^3$$

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

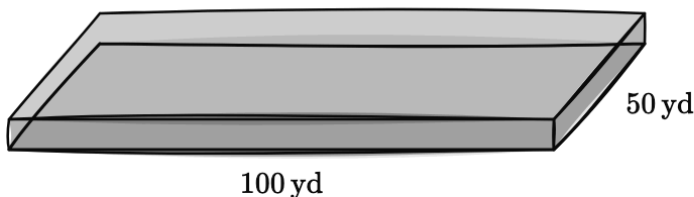
Триллион долларов в пачках

Стратегия. Представляя эту ситуацию, вы, вероятно, видите тысячи маленьких пачек по 100 перетянутых купюр в 100 долларов, как в кино или в банке. Поскольку эту величину легко прикинуть, начнём с неё. Найдём объём пачки из 100 купюр, выясним, сколько пачек составляют триллион долларов, а затем приравняем этот объём площади футбольного поля, умноженной на неизвестную высоту.

Решение. (1) Вычислим объём пачки из 100 купюр. Размеры одной купюры примерно 3 на 6 дюймов. Пачка из 100 таких купюр толщиной около 0,5 дюйма. Значит, полный объём пачки из 100 купюр: объём пачки равен длине, умноженной на ширину и высоту, $6 \text{ дюймов} \times 3 \text{ дюйма} \times 0,5 \text{ дюйма} = 9 \text{ куб. дюймов}$. (2) Вычислим число пачек. Заметьте, что триллион долларов равен 1×10^{12} долларов, а пачка из ста купюр по 100 долларов равна 10 000 долларов, или 1×10^4 долларов. Число пачек будет $1 \times 10^{12} \text{ долларов} / 1 \times 10^4 \text{ долларов на пачку} = 1 \times 10^8 \text{ пачек}$. (3) Вычислим площадь футбольного поля в квадратных дюймах. Площадь футбольного поля — 100 ярдов на 50 ярдов, что даёт 5000 кв. ярдов. Поскольку мы работаем в дюймах, нужно перевести квадратные ярды в квадратные дюймы: площадь = $5000 \text{ кв. ярдов} \times 3 \text{ фута/1 ярд} \times 3 \text{ фута/1 ярд} \times 12 \text{ дюймов/1 фут} \times 12 \text{ дюймов/1 фут} = 6\,480\,000 \text{ кв. дюймов}$, так что площадь примерно $6 \times 10^6 \text{ кв. дюймов}$. Этот перевод даёт нам $6 \times 10^6 \text{ кв. дюймов}$ для площади поля. (Заметьте, что в этих вычислениях мы используем только одну значащую цифру.) (4) Вычислим полный объём купюр. Объём всех пачек купюр по 100 долларов: $9 \text{ куб. дюймов/пачка} \times 10^8 \text{ пачек} = 9 \times 10^8 \text{ куб. дюймов}$. (5) Вычислим высоту. Чтобы найти высоту груды купюр, воспользуемся уравнением: объём купюр равен площади поля,

умноженной на высоту денег, так что высота денег равна объёму купюр, делённому на площадь поля. Высота денег = 9×10^8 куб. дюймов / 6×10^6 кв. дюймов = $1,33 \times 10^2$ дюйма $\approx 1 \times 10^2$ дюймов = 100 дюймов. Высота груды денег будет около 100 дюймов. В футах это 100 дюймов $\times$ 1 фут/12 дюймов = 8,33 фута $\approx$ 8 футов.

$$V = 9 \times 10^8 \text{ in}^3$$

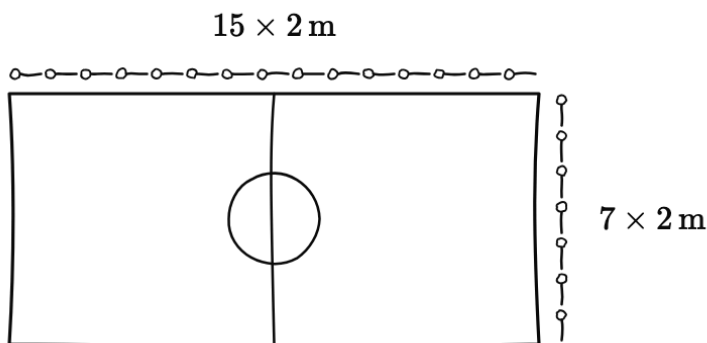


$$A \approx 6 \times 10^6 \text{ in}^2$$

$$h = \frac{9 \times 10^8}{6 \times 10^6} \approx 100 \text{ in} \qquad \approx 8 \text{ ft}$$

Какой высоты груды денег

Обсуждение. Окончательная прикидка намного больше первой оценки в 3 дюйма, а вот другая первая оценка, 10 футов (120 дюймов), была примерно верной. Как прикидка соотносится с вашей первой догадкой? Что это упражнение говорит о грубых «прикидках на глаз» по сравнению с тщательно вычисленными приближениями?



$$30 \text{ m} \times 14 \text{ m} \approx 420 \text{ m}^2$$

Баскетбольная площадка в людях

Проверьте себя. С помощью устного счёта и понимания основных единиц прикиньте площадь стандартной баскетбольной площадки. Опишите, как вы пришли к своей окончательной прикидке.

Средний мужчина ростом около двух метров. Чтобы покрыть длину площадки, понадобилось бы примерно 15 мужчин, уложенных один за другим, а ширину — около 7. Это даёт приблизительную площадь 420 m^2 .

Вопросы

1. Какое из применений прикидок названо в тексте?
 - a. Они дают точные значения без измерений
 - b. Они позволяют исключать некоторые сценарии или нереальные числа
 - c. Они заменяют единицы
 - d. Они нужны только для задач о деньгах
2. Почему в примере со зданием один этаж считают примерно 4 м?
 - a. Потому что этаж — это примерно длина двух взрослых, каждый ростом около 2 м
 - b. Потому что строительные нормы требуют 4 м
 - c. Потому что 39, делённое на 10, — примерно 4
 - d. Потому что этаж равен росту одного взрослого
3. Как найти высоту груды денег, когда известны её объём и площадь поля?
 - a. Умножить объём на площадь
 - b. Сложить их
 - c. Разделить объём купюр на площадь поля
 - d. Разделить площадь на объём
4. Чья догадка оказалась примерно верной и чем важно это упражнение?
 - a. Догадка «3 дюйма»: она показывает, что догадки обычно верны
 - b. Ничья: это показывает, что прикидки бесполезны
 - c. Обе одинаково

d. Догадка «10 футов»: тщательная прикидка позволяет проверять грубые догадки

Ответы

1. b) Прикидки позволяют исключать нереальные числа и оспаривать утверждения других.
2. a) Этаж — это примерно два взрослых человека, каждый около 2 м, то есть $2 \text{ м/человек} \times 2 \text{ человека/этаж}$.
3. c) Объём равен площади, умноженной на высоту, значит, высота равна объёму, делённому на площадь.
4. d) Груда — около 8 футов, намного больше 3 дюймов; 10 футов было примерно верно, и вычисление показывает, какая догадка выдерживает проверку.

Разобранные примеры

Высота 39-этажного здания Оцените высоту 39-этажного здания, считая этаж примерно равным двум взрослым ростом около 2 м каждый.

Рост человека — около 2 м.

Этаж — около 2 человек, то есть примерно $2 \text{ м} \times 2 = 4 \text{ м}$.

$39 \text{ этажей} \times 4 \text{ м на этаж} = 156 \text{ м}$.

Ответ: около 156 м

Триллион долларов на футбольном поле Триллион долларов в пачках из ста купюр по 100 долларов (каждая пачка $6 \times 3 \times 0,5$ дюйма) равномерно покрывает футбольное поле 100×50 ярдов. Примерно какой высоты груда?

Объём каждой пачки $6 \times 3 \times 0,5 = 9 \text{ куб. дюймов}$.

Число пачек: 10^{12} долларов $\div$ 10^4 долларов на пачку = 10^8 пачек, так что полный объём 9×10^8 куб. дюймов.

Площадь поля: 5000 кв. ярдов $\times$ 9 кв. футов/кв. ярд $\times$ 144 кв. дюйма/кв. фут = $6\,480\,000$ кв. дюймов, около 6×10^6 кв. дюймов.

Высота = объём $\div$ площадь = $9 \times 10^8 \div 6 \times 10^6 \approx 1 \times 10^2$ дюймов, около 100 дюймов, то есть около 8 футов.

Ответ: около 100 дюймов, примерно 8 футов

Задачи

1. Рассуждая так же, как в книге, оцените высоту 20-этажного здания.

Подсказка: Считайте этаж примерно равным двум взрослым ростом около 2 м каждый.

Ответ: Около 80 м: 20 этажей $\times$ 4 м на этаж.

2. Прикиньте площадь стандартной баскетбольной площадки, исходя из роста среднего мужчины, около 2 м.

Подсказка: Сосчитайте, примерно сколько мужчин, уложенных один за другим, покроют длину и ширину.

Ответ: Около 420 м²: примерно 15 мужчин (30 м) по длине и 7 мужчин (14 м) по ширине, а 30 м $\times$ 14 м = 420 м².