

1964 • НАДРОБНЫЙ УЧЕБНИК • 1964



**В. БОРИСОВ**

# ЭТАЛОНЫ И СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ



**В. Б О Р И С О В**

# СТАЛОНЫ

и

**СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»  
Москва 1964

**531.7**

---

**Б 82**

## НЕМНОГО ИСТОРИИ

Первые единицы мер длины, веса, площади появились еще в глубокой древности вместе с возникновением первых государств. Развитое сельское хозяйство требовало знания способов измерения площадей. А для измерения была необходима единица измерения площади, которая была бы единой для всего государства. Торговля потребовала введения единицы веса и единицы емкости.

В древнем Египте существовала мера длины — царский локоть, примерно равная 525 мм. Эта единица была установлена законом. Единица площади (арура) представляла собой площадь квадрата со стороной в сто царских локтей (примерно 2756 см<sup>2</sup>). Единица веса (тен) равнялась примерно 91 г.

В Вавилонии (1500—500 гг. до нашей эры) была весьма развитая система единиц длины, емкости, веса. Например, наибольшая единица длины 1 парасанг (5822 м) равнялся 30-стадиям, 1 стадия равнялась 360 локтям, 1 локоть равнялся 20 большим пальцам, 1 большой палец равнялся 12 линиям (около 27 мм). Один тяжелый талант равнялся 60 тяжелым минам (около 60,6 кг). Одна тяжелая мина равнялась 60 тяжелым сиклям.

Вавилонянам принадлежит честь установления на основе астрономических наблюдений системы единиц времени: год, месяц, сутки, час, минута, секунда. Один год равнялся 12 месяцам и 5 суткам; 1 месяц — 30 суткам; 1 сутки — 24 часам; 1 час — 60 минутам, 1 минута — 60 секундам.

До конца XVIII в., несмотря на многочисленные попытки, ввести единую систему узаконенных мер, общую для нескольких государств, не удавалось. Даже в одном и том же государстве, например в Австрии и Германии, в XV—XVI вв. в разных городах были приняты разные единицы мер.

Узаконенные меры появились в Англии в 1494 г. В первой

половине XVIII в. изготавливаются эталоны (т. е. точно выполненные образцы меры) единицы длины, массы. Во Франции (в 1735 г.) был изготовлен эталон единицы длины (туаз), в России (в 1747 г.) эталон единицы массы (фунт), в Англии (в 1766 г.) эталон единицы длины (ярд) и массы (фунт). Интересно, что меры длины и массы в Англии с того времени по сегодняшний день не изменились.

26 марта 1792 г., по предложению специальной комиссии Французской Академии наук, Национальным собранием Франции была узаконена единица длины — метр, по определению равная 0,0000001 от четверти длины дуги парижского меридиана, и изготовлен платиновый эталон метра. Немного позже был изготовлен платиновый эталон одного килограмма массы (1 кг). Эти эталоны были переданы на хранение Французской республике и названы «архивным метром» и «архивным килограммом».

Для получения однородных более мелких или более крупных систем единиц длины и массы было решено добавлять к слову метр или грамм слова деци, санти, милли, дека, гекто, кило, что означало умножение или деление основной единицы на кратное десяти число. Например, сантиметр — сотая часть метра, миллиграмм — тысячная доля грамма. Килограмм равен тысяче граммов. Эта созданная в XVIII в. во Франции совокупность мер называется метрической системой. Метрическую систему мер в XVIII—XIX вв. продолжали усовершенствовать ученые разных стран.

В 1867 г. в Париже был организован Международный комитет мер и весов, а в 1875 г. было создано Международное бюро мер и весов, задача которого состояла в хранении нормальных прототипов мер, изготовлении копий и сравнении их с прототипами. В СССР переход на метрическую систему мер произошел после Октябрьской революции. В 1956 г. к метрической конвенции присоединилась Индия, а в 1959 году — Китай.

До революции в России была своя особая система единиц. В качестве единицы длины использовался аршин, равный 28 английским дюймам. Сажень равнялась трем аршинам (примерно 211 см), а верста — 500 сажням. В качестве единиц веса использовались берковец, равный 10 пудам, пуд, равный 40 фунтам (около 16 кг), фунт, равный 96 золотникам, золотник, равный 90 долям. Часть этих единиц появились в России еще в X—XI вв.

## Для чего нужны эталоны?

### Эталон длины.

### Как сохранить метр?

Единицы длины, веса, объема и образцы таких единиц — эталоны, утвержденные законом, появились в различных государствах в связи с появлением и развитием торговли. Они были также нужны для учета произведенной сельскохозяйственной продукции, для измерения земельных участков и т. п. В настоящее время роль единиц измерения различных физических величин в науке и технике трудно переоценить.

Представим себе, что несколько различных предприятий изготавливает по чертежам детали одного и того же станка или машины, которые затем будут собираться на специализированном заводе. Естественно, что все размеры собираемых деталей машины должны подходить друг к другу. А это значит, что единицы длины должны быть на всех заводах одинаковыми. Под словом «одинаковыми» по существу подразумевается, что они должны быть сравнены между собой с очень высокой степенью точности.

Сейчас детали некоторых высокоточных машин обрабатываются с точностью до нескольких микрон. Микрон — это одна тысячная доля миллиметра, или одна миллионная доля метра. Это значит, что калибры для измерения длины, имеющиеся на разных заводах, должны быть сравнены с эталонами метра также с точностью до нескольких микрон. Существуют целые предприятия, которые выпускают только специальный измерительный инструмент. Одним из таких заводов в нашей стране является завод «Калибр». Естественно, что эталоны длины — это не единственное, что нужно технике для создания современных замечательных машин.

Если вы побываете на металлургическом заводе, то в мартовском цехе можно услышать, как репродуктор возвещает

сталеварам о том, что в печи номер такой-то содержание углерода в стали такое-то, марганца, никеля, хрома — такое-то. Металлурги уже давно знают, что незначительные добавки некоторых химических элементов к стали могут придать ей замечательные свойства. Сталь может стать вязкой, жаропрочной, твердой, ее сопротивление на разрыв может увеличиться во много раз.

Эти чудесные превращения со сталью возникают от прибавки очень незначительной дозы одного или нескольких элементов. Точность дозировки массы элемента при этом играет очень большую роль. Поэтому технические секреты легирования «хранятся» в величинах массы элементов, которые нужно добавить к определенному количеству стали.

Готовая, в виде слитков или проката, легированная сталь должна выдерживать определенное разрывное усилие; для некоторых сталей эта величина достигает 300 кг силы на 1 мм<sup>2</sup>. Поэтому завод, выпускающий такие стальные заготовки, должен в своей лаборатории иметь устройство, позволяющее промерять величину силы в определенных единицах.

Таким образом, кроме единиц и эталонов длины, в современной промышленности играют роль и единицы массы, и единицы силы. Однако современная промышленность вырабатывает не только механические станки. Если взять обычные электрические конденсаторы, выпускаемые разными фирмами в разных государствах, то обычно на внешней оболочке можно прочесть две цифры. Одна цифра обозначает величину электрической емкости этого конденсатора, другая — рабочее напряжение, до которого конденсатор может быть заряжен без опасности, что произойдет пробой.

Обе эти величины играют большую роль при расчете и конструировании электронных машин, и поэтому естественно, что единицы, в которых они измерены, должны быть единым образом установлены и для инженера, принимающего участие в изготовлении конденсаторов, и для конструктора, который использует эти конденсаторы.

Этот длинный перечень случаев, в которых единицы и эталоны измерения физических величин оказываются необходимыми в технике, можно продолжать практически неограниченно.

Еще большую роль единицы измерения физических величин и эталоны этих единиц играют в научной работе. Представим себе двух ученых, работающих в разных лабораториях в одной или в разных странах. Пусть этим ученым удалось открыть новое физическое явление. Обнаружение нового физического явления, с точки зрения известных единиц измерения, очень часто означает, что с этим явлением связывается несколько чисел, выражающих в старых, уже известных единицах некоторые свойства явления.

Предположим, что наши двое ученых открыли новую элементарную частицу. Один из них утверждает, что масса ее составляет десять сотых долей массы протона, другой — одиннадцать. Эта ситуация может означать, что либо это разные частицы, либо методика сравнения с единицей массы, массой протона, — недостаточно хорошо разработана у одного из ученых (либо у обоих).

В этом примере мы, конечно, сгустили краски: такого грубого расхождения быть не могло. Но более тонкие расхождения бывают и довольно часто. Например, история физики знает длительный спор по поводу величины заряда электрона. Предметом спора была третья значащая цифра в величине заряда (подробнее об этом см. в разделе об электрических единицах).

Единицы и эталоны физических величин играют в науке роль международного языка. Этот «язык» непрерывно совершенствуется. Почти во всех государствах с достаточно высоким уровнем развития науки и техники существуют специальные учреждения, занимающиеся вопросами метрологии, т. е. хранением, воспроизведением уже принятых эталонов единиц физических величин. В этих учреждениях (обычно это научно-исследовательские институты) разрабатывается и совершенствуется методика сравнения эталонов, создаются новые эталоны, соответствующие новым физическим величинам.

В Советском Союзе такими учреждениями управляет Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР. Этот Комитет участвует в работах Генеральной конференции по мерам и весам (это Международная организация, в которую входят 36 стран). 18 сентября 1961 года в Советском Союзе в соответствии с решениями Одиннадцатой генеральной конференции по мерам и весам была принята международная система единиц (ее обычно обозначают «SI», или по-русски «СИ»).

После этого небольшого обзора, который должен был кратко познакомить читателя с теми случаями в науке и технике, когда важны единицы и эталоны физических величин, мы перейдем к одной из основных единиц — единице измерения длины — метру.

Метр, как мы уже говорили в историческом обзоре, был установлен 26 марта 1791 г. Национальным собранием Франции по предложению комиссии Французской Академии наук. Под метром была принята длина, равная 0,000001 от одной четвертой части парижского меридиана.

Такое определение метра (по мнению ученых, предложивших его) было сделано для того, чтобы иметь не изменную и восстановливаемую меру длины. Иными словами, если изготовить эталон и затем почему-либо засомневаться в точности его изготовления, то можно заново промерить длину



дуги парижского меридиана, разделить ее на 40 млн. и снова получить отрезок длиной в 1 м. Это определение, таким образом, опиралось на астрономические измерения размеров Земли и предполагало неизменность размеров нашей планеты.

Однако спустя небольшое время было установлено, что при измерении длины дуги парижского меридиана была допущена ошибка, в результате которой архивный метр оказался примерно на 80 микрон короче того, который должен был бы быть, если исходить из  $10^{-7}$  от четверти дуги парижского меридиана. Эту ошибку обнаружил немецкий астроном Бессель.

В соответствии с таким определением метра через несколько лет был изготовлен платиновый эталон метра, получивший название «архивного метра». Во второй половине XIX в. по образцу архивного метра изготовили из сплава платины с иридием 31 прототип метра. Этот сплав обладает очень большой твердостью и упругостью. Кроме того, он весьма незначительно подвержен химическому воздействию окружающей среды.

В результате тщательного измерения было установлено, что прототип № 6 в точности равен длине архивного метра. Этот прототип оставлен на хранении в Международном бюро мер и весов в Севре (недалеко от Парижа). По жребию, России достались прототипы № 11 и 28. Последний, по декрету Совнаркома 11 сентября 1918 г., был объявлен основным государственным эталоном единицы длины в СССР. При  $0^\circ$  его длина равна  $1 \text{ м} + 0,71 \text{ микрона} \pm 0,12 \text{ микрона}$ .

Как видно из этих цифр, ошибка в определении длины тела, если его сравнивать с эталоном, не должна превосходить одной десятиллионной доли. Именно с такой точностью и был определен эталон метра (напомним, что 0,1 микрона — это одна десятиллионная метра).

Интересно, что достаточно нагреть этот прототип эталона на  $1^\circ$  и за счет теплового расширения его длина станет примерно на 8,6 микрона больше. А это значительно больше ошибки в 0,12 микрона. Поэтому сравнения рабочих эталонов с этим прототипом метра производят, фиксируя температуру точнее  $0,1^\circ$ .

Что же представляет собой эталон метра? Это стержень длиной 102 см, имеющий сечение в виде буквы X. Вблизи концов стержня на отполированных плоскостях нанесены на расстоянии 0,2 мм две линии, параллельные оси стержня. Перпендикулярно этим линиям нанесены шесть штрихов: по три с каждого конца эталона. Расстояние между средними штрихами и есть единица длины метра.

Несмотря на то, что эталон и прототип эталона метра изготовлены из одного из наиболее неизменных материалов, расстояние между штрихами, нанесенными на эталон, может

изменяться. Это может происходить потому, что кристаллическая структура вещества может изменяться во времени.

Другая причина изменения длины эталона метра — внутренние натяжения. Такие натяжения (напряжения) возникают в металлах всегда, как бы «нежно» мы их не обрабатывали. Со временем натяжения снимаются, «рассасываются». При этом, естественно, немного изменяются и размеры деталей, а также должны изменяться и размеры эталонов метра.

Такое «непостоянство», хотя оно и весьма незначительно, никак не могло устроить ученых. Можно было вернуться к определению метра, данному еще во время Французской революции. Но тогда мы столкнулись бы с непостоянством дуги парижского меридиана, которое может быть больше, чем у эталона метра. Поэтому было решено для создания «идеального», естественного и воспроизводимого эталона обратиться к процессам, происходящим в атоме.

Физикам, работающим в области атомной и молекулярной оптики, уже давно известно, что атомы каждого элемента излучают набор строго определенных длин волн. Эти длины волн не зависят ни от давления, ни от влажности, ни от поля тяготения и т. п.

Линии излучения атомов некоторых элементов очень четкие. Поэтому в 1960 г. на Одиннадцатой генеральной конференции по мерам и весам было принято новое определение метра: «Метр есть длина, равная  $1650763,73$  длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями  $2 p_{10}$  и  $5 d_5$  атома криптона 86».

Как видно из сказанного, точность такого определения метра значительно выше: здесь определено девять значащих цифр, в то время как в платиново-иридиевом прототипе только семь. Однако в очень большом числе случаев нет необходимости иметь такую высокую степень точности, и поэтому весьма часто в научных исследованиях и особенно в технике прибегают к сравнению с копиями эталона метра или его прототипов.

На примере эталона метра мы проследили эволюцию единицы длины. Как видно из этой эволюции, основное стремление метрологов состояло в том, чтобы иметь возможно более надежно сохраняемую и воспроизводимую единицу.

## Эталон массы

Следующей за единицей длины по важности является единица массы. Создатели метрической системы мер рассуждали очень просто. Если сохранить и легко воспроизвести единицу массы так же важно, как и единицу длины, то лучше не

удваивать трудностей по «сохранению». Поэтому определение единицы массы связали с определением единицы длины.

Для этого была взята единица объема в  $1 \text{ дм}^3$  (куб с ребром  $10 \text{ см}$ ). Если такой куб заполнить водой (одним из самых распространенных и удобных для экспериментов веществ), то масса этого куба по определению будет равна  $1 \text{ кг}$ .

Так как вода из-за теплового расширения изменяет свой объем, то было оговорено, что воду необходимо брать при температуре  $4^\circ$  по шкале Цельсия. При этой температуре вода обладает наибольшей плотностью, т. е. единица объема воды обладает наибольшей массой.

Затем там же, на родине метрической системы единиц, изготовили платиновый эталон, который передали в архив Французской республики. Прошло немного менее века. Наука метрология совершенствовалась вместе с экспериментальной техникой. Росли точность измерения длины и веса. И вот во второй половине XIX в. была проведена проверка архивного килограмма, т. е. проверено, соответствует ли его масса определению. При этом оказалось, что разница есть, и она составляет  $0,028 \text{ г}$ . Иными словами, различие было меньше, чем три стотысячные доли, но для метрологии такое различие очень существенно.

Несмотря на расхождение, все же было решено считать архивный килограмм массы «идеальным». Затем была изготовлена копия эталона из сплава иридия и платины и затем  $42$  прототипа килограмма. Их сверили с этой копией. России по жребию достались прототипы с номерами  $12$  и  $26$ . По декрету Совнаркома первый из них был объявлен основным государственным эталоном единицы массы в СССР.

Точность, с которой сравнивали прототипы эталонов, довольно высокая: она составляет  $0,002 \text{ мг}$ . Иными словами, различие между прототипом эталона и его копией не превышает двух миллиардных долей! Это очень высокая точность. Она почти в  $60$  раз выше (в относительных единицах) точности определения метра. В этом и заключается причина того, что архивный эталон и был по общему соглашению объявлен идеальным. Просто изменение массы физики умеют различать значительно точнее, чем изменение длины.

Прототип  $12$  представляет собой цилиндр диаметром  $39 \text{ мм}$  и высотой  $39 \text{ мм}$ . Грани цилиндра закруглены. Объем прототипа равен  $46,407 \text{ см}^3$ . Он хранится во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии имени Д. И. Менделеева в Ленинграде.

На этом можно было бы и закончить рассказ об эталоне единицы массы, который входит в большое количество систем единиц. Однако эталон массы и единица массы тесно связаны еще с одной единицей физической величины. На ее описании мы кратко остановимся.

В связи с описанием единицы массы в большое число систем единиц физических величин была включена и единица силы, связанная с единицей массы — килограмм силы. Под этой единицей подразумевается сила, с которой архивный эталон массы притягивается к Земле, иными словами — вес эталона массы. Так как эти величины существенно различны, во многих учебниках и по сей день для того, чтобы различить их, килограмм силы обозначают *кГ* или *кгс*.

Единица силы — килограмм силы — была введена не слишком удачно: притяжение к Земле зависит от расстояния до ее центра. Таким образом, необходимо было, во-первых, сразу оговорить и расстояние до центра. Поэтому к определению килограмма силы было добавлено «вес килограмма массы на уровне моря». Однако это не очень удачное уточнение, так как уровень мирового океана изменяется.

Во-вторых, из-за вращения Земли вес тела на разных широтах различен, поэтому в определении килограмма силы пришлось ввести оговорку о широте места, где измеряются единицы силы.

Таким образом, килограмм силы, так же как и архивный метр, был связан по определению с Землей. Иными словами, единица была введена не слишком удачно.

Как мы потом увидим, в этом и не было особой необходимости. Достаточно было иметь единицу длины, единицу массы и единицу времени, чтобы получить очень «хорошую» единицу силы. Однако исторически сложившаяся ситуация с единицей силы — килограммом силы осталась довольно запутанной и по сегодняшний день. Эта единица наряду с значительно более «качественными» входит во многие учебники и справочники, и, к сожалению, с ее существованием пока приходится считаться.

Нужно добавить, что определение метра и килограмма массы с ростом потребностей научного эксперимента возможно изменятся, или, лучше сказать, уточнятся. Но сегодня и килограмм массы, и метр находятся на «уровне» современных метрологических требований, а килограмм силы определен значительно грубее, чем это нужно для точных физических экспериментов. Именно поэтому килограмм силы и не вошел в Международную систему единиц «СИ».

Теперь после знакомства с единицей длины и единицей массы перейдем к третьей основной единице, входящей почти во все системы единиц — единице времени.

## Равномерно ли вращается Земля? Как сохранить секунду?

Один из способов определения местоположения корабля в море состоял в определении высоты Солнца над горизонтом в полдень. Капитан корабля, отправляясь в плавание, брал с собой очень хорошие часы — точный морской хронометр. Определяя высоту Солнца над горизонтом, он мог узнать широту места. Определяя момент, когда Солнце поднималось на максимальную высоту, капитан мог узнать разницу во времени между тем местом, где находится корабль, и портом, откуда он вышел.

По разнице времен можно определить и долготу места, а тем самым и точное положение места на карте. Чем точнее шел хронометр, тем точнее определялось местоположение корабля. Сейчас корабельные хронометры можно сверить по радиосигналам специальной службы времени. Но это только один пример того, как важно точно сохранить единицу времени. Таких примеров можно привести очень много.

Представим себе радиолокатор, посылающий импульсы электромагнитных волн на самолеты и принимающий отраженные сигналы. Разница во времени между «отправкой» радиоимпульса и его «возвращением назад» составляет несколько десятков миллионных долей секунды. Чтобы измерить расстояние до самолета, нужно помножить эти малые доли секунды на скорость света. Таким образом, точность измерения миллионных долей секунды — это точность определения расстояния до самолета.

Ну, а если это не самолет, а планета и локатор установлен не на Земле или самолете, а на космическом корабле? Тогда вопрос определения расстояния до планеты окажется еще более важным. Ведь нужно вовремя включить двигатели, чтобы с минимальной затратой горючего совершить маневр.

Приведем еще два примера, в которых отсчет времени и точность его хранения играют определяющую роль.

Представим себе, что мы присутствуем при запуске двух космических кораблей, которые должны соединиться в космосе, и что корабли запускаются через один полный оборот вокруг околоземной орбиты. Один оборот занимает около 90 мин., если орбита проходит на высоте 300 км от поверхности Земли. Ошибка в старте второго корабля 10 сек., и между ними такое же расстояние, как между Москвой и Серпуховым (около 80 км).

А если встреча происходит не на околоземной орбите, а где-то в солнечной системе? Там отсчет времени должен быть еще точнее. При этом задача усложнится тем, что точное время придется «хранить» значительно дольше.

Точные траектории автоматических межпланетных станций, направляемых с Земли к ближайшим планетам, вычисляются заранее с очень высокой степенью точности. И в эти расчеты входит время.

В заключение еще один пример, теперь из области военной техники, в котором хранение единицы времени играет первостепенную роль. Чтобы скрытно доставить к месту старта боевую ракету с ядерной боеголовкой, в современной военной технике широко применяются подводные лодки-ракетоносцы. Скрытое передвижение подводной лодки и возможность нанести ракетный удар, не всплывая, — огромные преимущества.

Однако как определить местонахождение подводного корабля? Ведь всплыть — это значит обнаружить себя. А радиоволны очень плохо проникают на большую глубину, тем более что противник может заглушить радиопеленг.

Один из способов, который сейчас обсуждается в военной литературе, состоит в том, чтобы использовать систему так называемой инерциальной навигации. Что это такое? Представим себе, что в каюту подводной лодки мы взяли с собой маятник и очень точные часы. Если мы точно знаем координаты порта, из которого выходит лодка, то можно, наблюдая колебания маятника и пользуясь часами, точно установить место, куда придет подводный корабль.

Опишем, как это можно сделать в принципе. Нужно наблюдать за отклонением маятника от вертикали. Лодка стоит на месте — маятник висит спокойно. Но вот заработали моторы, и лодка стала набирать скорость. Маятник отклонился в сторону, противоположную направлению движения. Чем больше ускорение, тем больше угол отклонения. Затем маятник вернулся на прежнее место и висит опять вертикально. Это значит, что лодка движется равномерно.

Если по углу наклона рассчитать ускорение и помножить его на время, в течение которого это ускорение было сообщено лодке, мы получим скорость, которую получила лодка. А направление отклонения маятника противоположно направлению движения лодки. Если теперь умножить скорость на время движения, можно определить и координаты движущейся лодки.

Всякое изменение скорости, включая полную остановку, вызовет отклонение маятника, которое позволит вычислить изменение курса подводного корабля. Вся эту процедуру, конечно, может автоматически выполнять прибор. Сердцем прибора должны быть часы, которые очень точно хранили бы время. Ведь ошибка в отсчете времени даже на 0,1% — это ошибка на многие километры.

Список случаев в технике и особенно в научных экспериментах, когда нужна очень точно отмеренная и хорошо сохра-

ненная единица времени, можно было бы продолжать очень долго. Обратимся теперь к самой единице времени — секунде.

Как мы уже говорили в историческом обзоре, секунда была введена еще в древней Вавилонии как определенная часть полного оборота Земли вокруг своей оси (солнечных суток). Однако сутки не постоянны, и Земля вращается совсем не равномерно. Например, с 1872 по 1903 г. средняя продолжительность суток увеличилась на 0,007 *сек*, а с 1903 по 1934 г. уменьшилась на 0,005 *сек*. Это уменьшение довольно существенное, и по солнечным суткам секунда может быть установлена с точностью —  $10^{-7}$ , не больше.

Совсем недавно с помощью так называемых атомных стандартов частоты английские физики установили, что и в течение года происходят сезонные изменения периода вращения нашей планеты. Движение Земли вокруг Солнца существенно более равномерно, поэтому за единицу времени сейчас принимают не солнечные сутки, а тропический год, т. е. время между двумя весенними равноденствиями, следующими одно за другим.

Длительность тропического года изменяется равномерно: он уменьшается примерно на 0,5 *сек* за столетие. В соответствии с этим определением основной природной единицы времени, «секунда есть  $1/31556925,9747$  части тропического года для 1900 г. января в 12 час. времени». Последняя оговорка о годе, когда отсчитана секунда, существенна — она учитывает изменение тропического года во времени.

Интересно отметить, что секунда с помощью тропического года определена очень точно (12 значащих цифр). Это примерно на два порядка (в 100 раз) точнее, чем могут дать современные атомные и молекулярные стандарты частоты.

В технике и особенно в научном эксперименте используют более мелкие единицы измерения времени: миллисекунда (одна тысячная), микросекунда (одна миллионная) и наносекунда (одна миллиардная) доля секунды. За одну наносекунду свет проходит расстояние в 30 *см*, оптический квантовый генератор на рубине успевает совершить по 50 000 полных колебаний. Таким образом, наносекунда — не такая уж маленькая величина. Для некоторых процессов это очень большой интервал времени. Например, некоторые долгоживущие элементарные частицы существуют всего  $10^{-18}$  *сек*, т. е. одну миллиардную долю от одной наносекунды.

Мы коротко коснулись описания третьей основной единицы — единицы времени. Почти в каждой стране есть своя служба времени, которая представляет собой систему учреждений, где секунду «лелеют и берегут». Эти учреждения посылают в эфир сигналы точного времени и некоторые точно известные радиочастоты, изменяющиеся во времени не более, чем на  $10^{-9}$  части.

Теперь после того, как мы познакомились с тремя основными единицами, можно перейти к описанию того, что такое система единиц.

## Что такое системы единиц?

Мы познакомились со способами хранения и воспроизведения трех «основных» единиц: единицы длины, единицы времени и единицы массы. Оказывается, что если ввести три таких основных единицы, то очень большое число физических величин можно выразить через них. Совокупность физических величин, для определения которых используется несколько основных единиц (соответственно введено несколько основных сталопов), называется системой единиц.

Естественно, что в выборе основных единиц существует известный произвол. И естественно, что каждая из систем единиц обладает какими-то преимуществами перед остальными (и недостатками тоже). Кроме того, некоторые системы единиц сложились чисто исторически (как, например, единицы в Англии), частично из соображений удобства (чтобы не переделывать многие учебники и справочники), частично из уважения к традициям, и сохраняются по сей день, хотя обладают очень большим числом недостатков. Поэтому сейчас известно около десятка различных систем единиц и их модификаций.

Это, естественно, затрудняет чтение научных работ и сравнение результатов; кроме того, это усложняет процесс обучения, особенно в высшей школе, так как одной системы единиц в принципе было бы вполне достаточно.

Перейдем теперь к конкретному описанию «процесса создания» системы единиц. Итак в нашем распоряжении имеются определения трех основных единиц: единицы длины (1 м), единицы массы (1 кг) и единицы времени (1 сек). Совсем нетрудно дать определение единицы скорости и единицы ускорения (изменения скорости за единицу времени). Для этого достаточно воспользоваться известными простыми формулами для скорости  $v$  и ускорения  $a$ :

$$v = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1} \quad \text{и} \quad a = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

Если в первой из этих формул положить  $s_2 - s_1 = 1$  м, а  $t_2 - t_1 = 1$  сек, то  $v = 1$  м/сек — это и есть новая единица физической величины — скорости.

Специального названия эта величина не имеет, иногда говорят «метр в секунду», «метр за секунду». Дробное обозначение [м/сек] называется размерностью. Такая размерность зависит от «сорта» физической величины. Она очень полезна



для контроля при расчетах, так как напоминает формулу, из которой соответствующая величина была получена. У многих единиц скорости в разных системах в размерности «сверху» стоит величина единица длины, а «снизу» (т. е. в знаменателе) единица времени (например, [см/сек], [км/час]).

Физики очень хорошо знают, что складывать и вычитать можно только величины **одинаковой** размерности. Например, можно сложить 1 см/сек и 1 км/час, для этого нужно только перевести км/час в см/сек (или наоборот), но никак нельзя складывать 1 км/час и 1 кг. Поэтому в особенно громоздких вычислениях удобно для проверки вычислять размерность определяемых величин. При таком способе контроля мало шансов «потерять» в процессе выкладок какую-нибудь величину.

Возвратимся теперь к формуле для ускорения. Точно, так же, как и в определении единицы скорости, в формуле для ускорения положим  $v_2 - v_1 = 1$  м/сек,  $t_2 - t_1 = 1$  сек и получим  $a = 1$  м/сек<sup>2</sup>. Словесное определение единицы ускорения: при ускорении, равном единице, скорость изменяется на один метр в секунду за секунду. Специального названия единица ускорения не имеет, так же как и единица скорости. Точность определения этих единиц такая же, как точность воспроизведения «наименее точной» из основных единиц, которые в них входят. В данном случае это точность воспроизведения эталона длины (как мы уже упоминали в предыдущих разделах, единицу времени секунду умеют «сохранять» лучше, чем единицу длины).

Теперь перейдем к определению одной из основных физических величин — единицы силы. В большом числе систем, в которых единица силы не является основной, для ее введения используют второй закон Ньютона. Этот закон утверждает, что ускорение, приобретаемое любым телом, прямо пропорционально силе и обратно пропорционально массе:

$$a = \kappa \frac{F}{m} \text{ или } F = \frac{1}{\kappa} am$$

В этих двух формулах  $\kappa$  — коэффициент пропорциональности. Его нужно вводить, так как, кроме прямой пропорциональной зависимости от силы и обратной от массы, закон Ньютона ничего не утверждает.

Однако если не связывать себя какой-то определенной величиной единицы силы, а выводить ее из этого закона, можно величину  $\kappa$  положить равной единице. Тогда достаточно принять  $a = 1$  м/сек<sup>2</sup>,  $m = 1$  кг, и мы получим новую единицу силы  $F = 1$  кгм/сек<sup>2</sup>.

Этой единице силы (полученной с помощью второго закона механики) можно дать такое определение: если на тело массой в 1 кг действует сила, которая сообщила ему ускорение в 1 м/сек<sup>2</sup>, то эта сила равна единице силы (в этой системе

единиц). Этой силе присвоили специальное название 1 ньютон в честь основателя классической механики Исаака Ньютона. Эта единица силы входит в состав международной системы единиц СИ.

Как мы видели, в этом определении единицы силы мы исходили из закона, взятого «у природы», и в определении предполагали закон абсолютно точным. Как мы увидим дальше, этот закон на самом деле носит приближенный характер, и поэтому в определении единицы силы приходится делать оговорки. Вышеприведенное определение одного ньютона по существу дает рецепт его воспроизведения и хранения. Для этого достаточно воспроизвести эталоны килограмма, метра и секунды и поставить «простейший» эксперимент, в котором килограмм массы ускоряется некоторой силой вдоль мерной линейки. Как только это ускорение достигнет  $1 \text{ м/сек}^2$ , можно утверждать, что сила равняется 1 ньютону. Эту единицу силы можно потом «запомнить» в пружинном силомере.

Кроме единицы силы в 1 ньютон, часто пользуются двумя другими единицами силы: 1 дина (1 *дн*) и 1 *кГ* силы (обозначается 1 *кгс* или 1 *кГ*). Одна дина в точности равна одной стотысячной доле ( $10^{-5}$ ) от ньютона. Ее определение по существу такое же, как и для 1 ньютона: если масса в 1 г движется с ускорением в 1 *см/сек*, то к массе приложена сила в 1 *дн*. 1 г массы в 1000 раз меньше килограмма, 1 *см* — в 100 раз меньше метра, поэтому дина в 100 тыс. раз меньше ньютона (в определении силы масса умножается на ускорение).

Другая единица силы, килограмм силы, очень часто используется в технике. По определению килограмм силы — это сила, с которой Земля притягивает к себе килограмм массы, расположенной на уровне моря на  $45^\circ$  северной широты.

Легко получить переводной множитель, позволяющий переходить от ньютонов к килограммам силы. Представим себе, что мы дали возможность свободно падать килограмму массы. В этом состоянии на него действует только одна сила — притяжение Земли, которая по определению равна килограмму силы. Из опыта хорошо известно, что в свободном падении у поверхности Земли ускорение будет равно  $9,8 \text{ м/сек}^2$ . Таким образом, килограмм силы сообщает килограмму массы ускорение  $9,8 \text{ м/сек}^2$ , а ньютон такому же килограмму массы сообщает ускорение  $1 \text{ м/сек}^2$ .

Так как, согласно второму закону механики, сила пропорциональна ускорению, то 1 *кГ* силы равен  $9,8$  ньютона.

После знакомства с единицами силы для завершения полного списка единиц, используемых в механике, остановимся на единицах работы и мощности.

Механическое определение работы  $A$  — это произведение силы на путь:

$$A = FS.$$

Используя это определение, можно получить известные единицы работы. Если  $F = 1$  ньютон, а  $S = 1$  м, то  $A = 1$  ньютон  $\times 1$  м =  $1$  кг  $\cdot$  м<sup>2</sup>/сек<sup>2</sup>. Эта единица носит название джоуля (в честь известного физика Джоуля). Если  $F = 1$  кг, а  $S = 1$  м, то  $A = 1$  кг  $\cdot$  1 м = 1 кгм (так и говорят — «килограммометр»). И, наконец, если  $F = 1$  дн, а  $S = 1$  см, то  $A = 1$  дн  $\cdot$  см<sup>2</sup>/сек<sup>2</sup>, эта единица называется эргом.

В международную систему СИ в качестве единицы работы входит джоуль. И, наконец, в качестве единиц мощности используют: 1 джоуль за 1 сек. ( $1$  кгм<sup>2</sup>/сек<sup>3</sup>), эта единица называется ваттом, 1 эрг за 1 сек ( $1$  гсм<sup>2</sup>/сек<sup>3</sup>) и один килограммометр за 1 сек ( $1$  кгм/сек). В технике часто используется 1 лошадиная сила (л. с.). Это единица мощности, равная по определению  $75$  кгм/сек.

Мы привели практически все основные единицы, используемые в механике для трех систем единиц. Как видно из приведенных рассуждений, знание законов физики позволяет, пользуясь небольшим числом основных («эталонированных») единиц, создать стройную систему единиц. О том, какую роль играют мировые постоянные в создании систем единиц (и о том, что такое мировые постоянные), об электрических и ядерных системах единиц мы расскажем в следующих разделах, а сейчас коротко остановимся на других единицах измерения энергии, которые наряду с механическими имеют довольно широкое применение.

Из учения о теплоте хорошо известно, что тепло  $Q$ , которое сообщается телу с массой  $m$ , изменяет его температуру  $T$ :

$$Q = mC (T_2 - T_1).$$

Чем большее количество тепла  $Q$  сообщено, тем больше изменение температуры, чем меньше масса при том же  $Q$ , тем на большую величину изменится температура. Для каждого вещества при этом играет роль особая характеристика — удельная теплоемкость  $C$ .

Со времен Цельсия температуру тела (степень нагретости) измеряли в градусах. Если взять за исходное определение единицы нагретости тела  $1^\circ$  (одна сотая доля от разницы температур кипящей и замерзающей воды), положить  $m = 1$  кг, выбрать определенное вещество и договориться, что для него  $C = 1$ , то мы получим определение единицы количества тепла. В качестве такого вещества физики избрали самое доступное — дистиллированную воду и получили определение одной килокалории. Это такое количество вещества, которое, будучи сообщено одному килограмму дистиллированной воды, нагревает его на  $1^\circ$ .

Килокалорию иногда называют большой калорией в отли-

чие от малой (или просто калории), которой 1 г воды нагревается на 1°. Некоторое время эта единица существовала независимо от единицы работы. Однако когда был открыт закон сохранения энергии, физикам стало ясно, что теплоту как один из видов энергии необходимо измерять в тех же единицах, что и работу. Поэтому пришлось устанавливать в специальных экспериментах величину переводных множителей, которые позволяют переходить от «механических» единиц к тепловым.

Так на опыте было установлено, что 1 килокалория эквивалентна 427 кГм, а один джоуль эквивалентен 0,24 малой калории. Для единообразия и простоты при научных исследованиях и в технике было бы вполне достаточно одной единицы — 1 джоуля.

Однако большое количество выполненных исследований, подробные таблицы и прецизионная методика тепловых измерений пока сохраняют такое положение. В калориях на грамм определяют очень часто теплотворную способность различных горючих материалов, иными словами, количество тепла, которое выделяется при полном сгорании 1 г горючего.

В таких же единицах выражают скрытую теплоту плавления и парообразования — это величины, которые характеризуют то тепло, которое нужно затратить, чтобы перевести 1 г выбранного вещества из твердого состояния в жидкое или из жидкого в газообразное соответственно при температуре плавления или кипения.

В заключение расскажем еще об одной величине, с помощью которой измеряют энергию, — температуре тела. Успехи в развитии молекулярно-кинетической теории привели физиков к выводу, что температура есть величина, пропорциональная средней кинетической энергии атомов или молекул тела.

А если так, то температуру можно измерять по выбору в джоулях, килограммометрах и эргах. Однако решено было сохранить «старые» градусы Цельсия (их определение потом немного подправили и теперь в честь известного английского физика называют градусами Кельвина).

Дело в том, что масса атомов и молекул и, соответственно, их энергия даже при очень высоких температурах весьма маленькая величина. Поэтому если пользоваться такими маленькими величинами, как эрг (один джоуль — это 10 млн. эргов), то пришлось бы использовать очень маленькие доли эрга. Однако переводной множитель, позволяющий переходить от эргов к градусам, хорошо известен; его часто называют постоянной Больцмана (также в честь известного физика), сделавшего очень много в области развития молекулярно-кинетической теории материи. Он равен  $1,38 \cdot 10^{-16}$  эрг/град, т. е. 1° эквивалентен  $1,4 \cdot 10^{-16}$  эрга. Нужно при этом отметить, что

для вычисления энергии молекул на этот множитель нужно умножить температуру в абсолютной шкале, т. е. отсчитываемую от абсолютного нуля ( $-273,2^{\circ}$ ).

После этого краткого знакомства со способами построения системы единиц в области механики и с единицами измерения энергии перейдем к так называемым мировым постоянным.

## Мировые постоянные и системы единиц

На примере механических величин мы познакомились со способом построения системы единиц. В нем все производные единицы выводятся с помощью трех основных единиц — единиц массы, длины и времени. Для вывода новых единиц используются известные законы физики или определения физических величин. Так было с единицей силы, так было и с единицами скорости, ускорения, работы.

Однако не все известные физикам законы описывают связь между основными единицами и новыми. Ученым известно большое количество закономерностей, облеченных в математическую форму, в которые входят только величины, известные с точки зрения системы физических единиц. В такие законы, как правило, входят некоторые числа, которые носят названия мировых постоянных, или мировых констант. Поясним смысл этих чисел (величин) на примере закона всемирного тяготения.

Закон всемирного тяготения утверждает, что два любых тела притягиваются друг к другу прямо пропорционально произведению масс этих тел и обратно пропорционально квадрату расстояния между ними. При этом размеры тел должны быть малы по сравнению с расстояниями между ними. Математическая запись этого закона имеет хорошо известный вид:

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} .$$

В этой форме записи закона всемирного тяготения мы обязаны были вставить коэффициент пропорциональности, так как закон утверждает только пропорциональную зависимость, а не равенство.

Закон всемирного тяготения — это опытный закон; он получен из наблюдений, а не является математическим следствием из более общих законов. Поэтому коэффициент пропорциональности, который носит название гравитационной постоянной, следует брать также из опыта. Обратим внимание на математическую запись закона. В него входят величины

$m$ ,  $r$  и  $F$ , для которых мы уже дали определение единиц. Поэтому, по необходимости,  $\gamma$  будет равна некоторой размерной величине.

Если бы мы положили  $\gamma=1$  и на основании закона всемирного тяготения ввели бы новую единицу силы, то тогда пришлось бы либо вводить переводные множители между этой новой единицей силы и уже известными (ньютоном, диной, килограммом силы), либо отбросить уже известные единицы силы. В последнем случае во второй закон механики  $F=am$  пришлось бы ввести коэффициент, аналогичный  $\gamma$ .

Эта процедура показалась физикам менее удобной, и было решено остановиться на первом варианте: брать единицу силы из второго закона механики и приписывать гравитационной постоянной некоторое определенное число. Что же это за число?

Если в законе всемирного тяготения положить  $m_1=m_2=1$  (пока не говорим, какой именно) и  $r=1$ , то  $F=\gamma$ . Иными словами, гравитационная постоянная—это сила, с которой две единичные массы притягиваются друг к другу, если их поместить на расстоянии, равном единице.

Из такого определения гравитационной постоянной, естественно, следует, что величина  $\gamma$  зависит от того, какие выбрать единичные  $m$  и  $r$ . Если положить  $m=1$  г и  $r=1$  см, то, согласно новейшим измерениям,  $\gamma=(6,670\pm 0,006)\cdot 10^{-8}$  см<sup>3</sup>/г · сек<sup>2</sup>.

Это означает, что две маленькие гирьки по грамму каждая притягиваются друг к другу с силой  $6,67\cdot 10^{-8}$  дн, если их расположить на расстоянии в 1 см. Напомним, что 1 дн. это сила, примерно равная весу 1 мг (т. е. силе притяжения одного миллиграмма массы к Земле). Таким образом, из-за малости гравитационной постоянной (а точнее из-за слабости гравитационного взаимодействия), мы и не замечаем в обычной жизни ничего, кроме тяготения к Земле. Два взрослых собеседника, сидящие за столом, притягиваются друг к другу с силой около 0,1 дн. Не всякие весы могли бы обнаружить такую силу. Довольно значительный вес тел, т. е. притяжение тел к Земле, вызван тем, что все тела на поверхности Земли имеют дело с ее огромной массой  $5,976\cdot 10^{27}$  г.

Если знать массу Земли и ее радиус, то по ускорению свободного падения на поверхности Земли можно найти и гравитационную постоянную. Действительно, сила, с которой тело с массой  $m$ , находящееся на поверхности Земли, притягивается по направлению к ее центру, равна:

$$F=\gamma \frac{mM}{R^2} .$$

Здесь  $M$  — масса Земли, а  $R$  — ее радиус.

С другой стороны, хорошо известно, что только под дейст-

вием веса  $F$  всякое тело вблизи поверхности Земли будет падать с ускорением  $g=980 \text{ см/сек}^2$  (здесь мы не учитываем влияния вращения Земли вокруг оси и ее несферичности). Поэтому на основании второго закона механики мы должны написать:

$$F=mg.$$

Сравнивая два выражения для силы, мы получим связь между ускорением свободного падения, массой Земли, радиусом Земли и гравитационной постоянной:

$$g=\gamma \frac{M}{R^2}.$$

Если подставить в это выражение  $R=6,37 \cdot 10^{+8} \text{ см}$ ,  $M=5,976 \cdot 10^{+27} \text{ г}$  и  $g=980 \text{ см/сек}^2$ , то получим, что  $\gamma=6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{г} \cdot \text{сек}^2$ .

На этом примере с гравитационной постоянной мы убедились, что мировые постоянные (мировые константы) тесно связаны с системами единиц физических величин. Однако мировые постоянные не только определяют через основные единицы; они могут также играть и более существенную роль при создании системы единиц. Для того чтобы иллюстрировать это положение, остановимся на двух мировых постоянных: постоянной Планка и скорости распространения электромагнитных сигналов.

К концу XIX в. у физиков накопилось довольно много трудностей, связанных с объяснением хорошо известных опытных фактов. Первым опытным фактом был фотоэффект—вырывание светом электронов из различных веществ (в этой области много и плодотворно работал известный русский ученый А. Г. Столетов). Физики обнаружили, что будет ли вырван электрон из данного вещества, или не будет, — это зависит лишь от длины волны света.

Некоторые вещества (например, медь) можно было, образно говоря, освещать хоть прожектором, но если в составе излучения сколь угодно мощного источника не было фиолетовых волн, то электроны не вырывались. А если поставить хотя бы слабенький источник фиолетового или ультрафиолетового излучения, сразу же появлялась заметная эмиссия электронов.

Таким образом, для каждого вещества была установлена длинноволновая (иногда ее называют красной) граница. Если длина волны электромагнитного излучения больше — вырывания нет, если меньше — электронная эмиссия есть.

Этот факт никак не мог быть объяснен на основании классических представлений о строении вещества. Точно так же физики не могли найти теоретического описания законов излучения нагретого черного тела. Излучение давало четкий

максимум мощности на определенной длине волны, которая зависела от температуры. Согласно классическим представлениям, максимума не должно было бы быть, а полная мощность излучения должна была быть бесконечной!

Разрешить эти противоречия удалось, только выйдя из рамок классических представлений о законах, управляющих веществом в микромире. Макс Планк предложил считать, что энергия на определенной частоте может быть передана только в виде одной или нескольких порций квантов, причем величина кванта должна быть пропорциональна частоте:

$$E = h\nu.$$

В этом выражении мы обозначили  $E$  — энергия кванта,  $\nu$  — частота, а  $h$  — коэффициент пропорциональности.

Это предположение Планка оказалось верным: на его основании удалось создать теорию, которая прекрасно описала законы фотоэффекта, законы излучения черного тела. Несколько позднее эта теория вошла в качестве составной части в так называемую квантовую механику — раздел физики, описывающий строение атомов и молекул.

Но вернемся к предположению Планка. Величина  $h$  коэффициента пропорциональности в формуле Планка должна была быть определена на основании опыта. Она оказалась довольно малой:  $h = 6,62494 \cdot 10^{-27}$  эрг·сек. Напомним, что  $1$  эрг =  $10^{-7}$  джоуля, а  $1$  джоуль, если его сообщить в виде тепловой энергии  $1$  г воды, нагреет его на  $0,24^\circ$ . В честь Планка величину  $h$  назвали постоянной Планка.

Обратимся теперь к необычайно важному, с точки зрения создания системы единиц, обстоятельству. На основании опытных данных нам хорошо известно, что

$$E = h\nu.$$

При этом естественно, что величина  $h$  зависит от выбора систем единиц. В левой части этого опытного закона стоит величина в единицах энергии, т. е. произведение единицы силы на путь. В правой части после коэффициента пропорциональности стоит частота, имеющая размерность  $1/\text{сек}$  (число полных периодов в единицу времени).

Если не ограничивать себя выбором основных единиц, то можно было бы положить  $h$  равной  $1$ , тогда энергия выражалась бы в новых единицах, обратных единице времени (например,  $1/\text{сек}$ ), а сила — в единицах, обратных произведению единицы времени на единицу пути (например,  $1/\text{сек} \cdot \text{см}$ ).

Иными словами, можно было бы использовать две основные единицы —  $1$  м и  $1$  сек и на основании закона Планка (опытного закона, «взятого от природы») получить как производные единицы силы и единицы энергии. А затем уже, используя второй закон механики, получить новую единицу мас-



сы. Но теперь она была бы уже производной, а не основной, т. е. для нее не было бы необходимости создавать и хранить эталоны и прототипы эталонов и т. д.

Таким образом, мы видим, что если в законе Планка положить  $h=1$ , то можно «сэкономить» на числе основных единиц и пользоваться только двумя. Естественно, что можно было бы оставить и «старые» граммы и сантиметры. Но тогда мы получили бы новую единицу времени, то есть так или иначе можно было бы уменьшить число основных единиц на одну.

Этим приемом не пользуются частично в силу сложности перестройки всей системы метрологических методов, а также в связи с тем, что тогда бы нам пришлось пользоваться в макроопытах необычно малыми единицами.

Как мы видели на этом примере, мировые постоянные играют весьма существенную роль в создании системы единиц физических величин.

Обратимся еще к одному примеру такого рода и еще к одной мировой постоянной — скорости распространения электромагнитных волн (включая радиоволны, световые, рентгеновские, гамма-излучение), которая является одной из фундаментальнейших величин в физике. Согласно многочисленным измерениям в вакууме, это постоянная величина.

Абсолютное значение скорости света измеряли несколько десятков раз разные физики в разных странах. Только за последние десять лет ее значение измерялось четырьмя разными группами физиков (независимо друг от друга). При этих измерениях, естественно, точность все более и более возрастала. Самые точные измерения к сегодняшнему дню удалось выполнить английскому физику Фруму. Согласно его результатам, скорость распространения электромагнитных волн равна  $299792,5 \pm 0,1$  км/сек.

Как видно из величины ошибки в  $0,1$  км/сек, точность измерений составляет  $3 \cdot 10^{-7}$  части от измеряемой величины. Иными словами, измерение всего лишь в три раза менее точно, чем эталон метра (напомним, что ошибка в определении эталона метра составляет  $0,12$  микрона, т. е. немного больше, чем  $10^{-7}$  части).

Для того чтобы представить себе, как было произведено такое точное измерение скорости света, вспомним одно простое физическое явление. Если бросить камень в пруд, то в тихую, безветренную погоду можно видеть, как по поверхности пруда будут разбегаться волны.

Если же кинуть одновременно два камня, то на поверхности воды можно увидеть в области между местами падения камней картину наложения двух фронтов распространяющихся волн. При этом в определенной области происходят интенсивные колебания, которые как бы «стоят» на месте. Наблюдатель не видит движения волн ни справа налево, ни слева

направо. Это явление (эту картину) обычно называют стоячей волной.

Такую стоячую волну можно получить, наблюдая наложение двух любых встречных волновых процессов, в частности наблюдая наложение и электромагнитных волн. Владальцы телевизоров часто сталкиваются с этим явлением, когда антенна принимает прямой сигнал от телевизионной башни и сигнал, отраженный от одного из соседних зданий. При этом изображение немного двоятся.

В стоячей волне расстояние между двумя точками с минимумом колебания в точности равно половине длины волны. Вместе с тем хорошо известно, что скорость распространения волны  $v$ , длина волны  $\lambda$  и частота  $\nu$  связаны очень простым соотношением  $v = \lambda \cdot \nu$ . Если знать точно частоту колебаний и измерить в стоячей волне величину  $\lambda$ , то можно определить и  $v$ . Именно к этому приему и прибег Фрум. В качестве источника электромагнитных колебаний он использовал генератор сантиметрового диапазона, частота которого поддерживалась постоянной с помощью атомного стандарта частоты.

Как мы уже говорили, точность определения и хранения единицы времени много выше, чем точность определения и хранения метра. Электромагнитные колебания от генератора поступили в две антенны, расположенные друг против друга. Между ними устанавливалась стоячая электромагнитная волна. Специальное устройство позволяло измерять расстояние между минимумами амплитуды колебаний и сравнивать это расстояние с прототипом эталона метра. Так измеряли длину волны, а по известной частоте вычисляли и скорость света.

Скорость света играет, как мы увидим дальше, очень большую роль в системах единиц для электрических величин. Она имеет и большое прикладное значение в радиолокации (особенно межпланетной) и в определении астрономических величин. Об этом будет рассказано немного дальше, а сейчас мы обратимся к разбору одного важного для метрологии обстоятельства.

Перепишем в другом виде выражение, связывающее длину волны  $\lambda$ , частоту  $\nu$  и скорость света (ее обычно обозначают  $c$ ): 
$$\lambda = \frac{c}{\nu} .$$

Нам известно, что  $c$  в вакууме — неизменная величина (по крайней мере с точностью, с которой позволяют измерять современные приборы). Если бы мы стали создавать новую систему единиц и в качестве первой основной единицы ввели бы единицу времени  $1 \text{ сек}$ , то, не вводя эталона длины, с помощью этого соотношения можно было бы получить новую единицу длины — производную от единицы времени. Действительно, так как единицу длины мы не вводили, то по определению мы могли бы положить  $c=1$  (точно так же, как мы

поступили с коэффициентом пропорциональности во втором законе механики, когда получали новую единицу 1 ньютон с помощью основных единиц — килограмма массы, метра и секунды).

Новое определение единицы длины было бы таким: это такая длина, которую электромагнитный сигнал проходит за 1 сек. Размерность этой новой единицы длины стала бы 1/сек (вместо метра). В такой новой системе единиц скорости были бы безразмерными. Однако единица длины была бы довольно большой: чуть меньше 300 000 км. Это немного меньше, чем среднее расстояние от Земли до Луны.

На этом примере мы видим, что с помощью мировой постоянной скорости света — можно «сэкономить» еще на одной основной единице. Таким образом, если учесть, что с помощью постоянной Планка также удастся сократить число основных единиц на одну, то можно создать систему единиц с одной основной, для которой необходим эталон. Все остальные единицы будут производными.

На этих двух примерах с постоянными  $h$  и  $c$  хорошо видно, что в создании системы единиц мировые постоянные играют большую роль. К таким приемам, о которых шла речь выше, при создании системы пока не прибегают. Частично это делается из соображений удобства (слишком большие или слишком маленькие получаются при этом «обычные» величины). Играет также роль и известная традиционная «привязанность» к килограмму, метру и секунде.

Эта «привязанность» закреплена огромным экспериментальным материалом, полученным и опубликованным физиками и бесчисленными справочными изданиями. Однако возможность сократить число единиц есть, и, быть может, все возрастающие требования к точности определения основных единиц приведут к тому, что будет оставлена только одна основная (наиболее точно определенная и легко воспроизводимая) единица.

К «свойствам» мировых постоянных мы вернемся еще раз несколько дальше, а сейчас обратимся к вопросу о том, насколько неизменными мы должны считать наши основные единицы.

## **В каких условиях изменяются единицы физических величин?**

На вопрос, содержащийся в заглавии этого раздела, можно искать ответа в двух направлениях. Первое направление: мы неудачно выбрали эталон единицы измерения. Он со временем изменится неконтролируемым образом (если сделано

несколько одинаковых эталонов, то не ясно, какой из них изменился больше, так как для экспериментатора они все равноправны). Так может происходить и с эталоном массы, и с секундой.

В эталоне массы может понемногу накапливаться масса «застывших» в нем элементарных частиц, из которых в основном состоят космические лучи. Благодаря этому эталон массы может, хотя и слабо, понемногу окисляться, а это приведет к тому, что в нем будет накапливаться присоединенный к атомам платины и иридия кислород. Секунда, представляющая часть тропического года, также может измениться. Для этого достаточно, чтобы масса Солнца при каком-то сильном взрыве существенно изменилась. Это повлечет за собой изменение периода обращения Земли вокруг Солнца, и в результате наш эталон — секунда — «испортится».

По-видимому, в дальнейшем определения эталона массы и длины будут изменены так же, как это сделано с эталоном длины — метром, определение которого сведено к числу длин волн излучения одной из линий криптона.

Мы не станем перегружать наш рассказ выкладками, иллюстрирующими эти два примера «старения» выбранных эталонов единиц физических величин. Ведь наша основная цель состоит в том, чтобы описать реальные физические условия, в которых любые единицы должны изменяться вне зависимости от способа их выбора. Это второе направление рассуждений, которое также дает ответ на поставленный в заголовке этого раздела вопрос.

Для того чтобы описать условия, в которых наблюдатель обнаружит изменения выбранных им эталонов, нам необходимо будет на некоторое время отвлечься от темы и ознакомиться с основным кругом идей, лежащих в основе так называемой специальной и общей теории относительности. Естественно, что знакомство с этими сложными теориями произойдет в самых общих чертах.

Мы начинаем с напоминания, что такое система отсчета. В любом физическом измерении, когда речь идет с том, что измерена какая-то величина (сила, скорость, масса и т. п.), следует, вообще говоря, добавлять, что измерение проведено в такой-то системе отсчета. Когда говорят, что измерена скорость какого-либо тела и путь, пройденный этим телом, имеется в виду, что заранее выбрана точка в пространстве, которая считается неподвижной и от которой и производится отсчет. Эта точка и жестко связанные с ней некоторые выбранные направления (оси координат) и называют системой отсчета (системой координат). Очень часто выбирается всем хорошо известная прямоугольная (декартова) система координат. При этом, естественно, способов выбора систем отсчета может быть сколь угодно много.

В выбранной системе отсчета в некоторых случаях измерения производятся очень удобно. Например, удобно измерять скорость тела, если оно движется мимо мерной линейки, начало которой принято за начало системы координат.

Но может встретиться случай, когда нужно будет производить измерения в системе координат, движущейся относительно нас.

Иными словами, будет две системы координат. В одной находимся мы, а вторая движется каким-то образом относительно нас. Нам нужно измерить какую-либо физическую величину (например, скорость тела) в движущейся системе координат.

Таким образом, в этом случае необходимо обмениваться информацией с наблюдателем (или прибором), движущимся во второй системе. При таком обмене, естественно, нас будет интересовать вопрос: а будут ли одинаковыми масштабы физических величин (т. е. единицы массы, длины и т. п.) в разных системах координат?

Еще со времени Галилео Галилея предполагалось естественным считать, что системы отсчета, движущиеся прямолинейно и равномерно друг относительно друга (так называемые инерциальные системы отсчета), равноправны. Иными словами, физические явления в этих системах координат должны протекать одинаково. При этом физики предполагали, что если расстояние от одного наблюдателя до какого-нибудь предмета равно  $x^1$ , то для другого наблюдателя, движущегося относительно первого со скоростью  $v$ , расстояние до этого же предмета будет через  $t$  секунд:

$$x^1 = x - vt.$$

При этом также считалось естественным, что время течет с одной и той же скоростью в обеих системах координат, т. е.:  $t = t^1$ .

Из этих двух простых аналитических выражений, связывающих координаты в разных системах отсчета, следовало, что масштабы физических величин (единицы) будут неизменными в разных системах отсчета. В конце XIX в., когда система уравнений Максвелла (уравнений электродинамики) стала общепризнанной, было обнаружено, что при замене переменных  $x$  и  $t$  на  $x^1$  и  $t^1$  по выписанному выше правилу, качественно изменяются законы электродинамики. Скорость света, например, которая входит в уравнения Максвелла, оказывалась разной в других системах координат. Причем это различие сказывалось лишь при очень больших скоростях  $v$  (скоростях относительного движения систем отсчета), при  $v$  близких к скорости света. Это означало, что равномерно движущиеся друг относительно друга системы координат неравноправны, т. е. существует такая (наиболее неподвижная или абсолютно

неподвижная) система координат, которой следовало бы отдать предпочтение.

Естественно было бы при этом предположить, что такая абсолютно неподвижная система координат должна быть связана со средой, в которой распространяются электромагнитные волны. Так рассуждали физики в конце XIX в. Этой среде даже дали специальное название — мировой эфир. Но эти рассуждения были основаны на предположении, что  $x^1 = x - vt$  и  $t^1 = t$ , и поэтому требовали опытной проверки. И такой опыт был поставлен. Точнее, опытов было несколько, и они повторялись со все возрастающей точностью (последнее повторение относится к 1964 г.).

Чтобы представить себе схему этого опыта, напомним сначала простое физическое явление. Представим себе какой-то источник звуковых колебаний, например детскую хлопушку, и двух наблюдателей. Первый наблюдатель имеет очень хорошие часы и находится рядом с хлопушкой. А второй, тоже с хорошими часами, которые предварительно сверили с первыми, может двигаться в любых направлениях с любой скоростью.

Пусть в начале опыта оба наблюдателя были неподвижны; между ними было 340 м спокойного воздуха. Скорость распространения звука в воздухе 340 м/сек. Это означает, что если первый наблюдатель хлопнул хлопушкой, то второй услышит хлопок через 1 сек. Теперь представим себе, что второй наблюдатель в момент хлопка начал двигаться навстречу первому со скоростью 340 м/сек; это значит, что его уши встретят сжатие и разрежение воздуха (звук от хлопка) вдвое раньше, т. е. за 0,5 сек.

В этом примере есть два наблюдателя (две системы отсчета) и среда (воздух), в которой распространяется сигнал. Среда может перемещаться независимо от наблюдателей (например, во время ветра), и результат эксперимента также будет отличным от случая, когда и воздух, и наблюдатели были неподвижны. Примерно такую же картину физики ожидали увидеть и при распространении световых сигналов от наблюдателя к наблюдателю. Правда, наблюдать эффект было бы значительно труднее, ведь скорость света почти в 100 тыс. раз больше скорости распространения звука в воздухе.

Способ преодоления экспериментальных трудностей был найден. Дело в том, что Земля движется вокруг Солнца со скоростью около 30 км/сек. Расчет показал, что если в случае со светом дело обстоит так же, как и со звуком, то в специальных оптических приборах — интерферометрах — можно будет наблюдать сдвиг стоячей оптической волны, которая образуется двумя световыми волнами, идущим друг навстречу другу. По имени первого физика, поставившего этот опыт, ему дали название — опыт Майкельсона. И самое интересное,

что ни в первоначальном варианте, ни в повторениях в опыте не наблюдался положительный эффект — иными словами, не было отмечено никакого движения Земли относительно мирового эфира.

Это означало, что неверна первоначальная гипотеза и что нет такой самой неподвижной системы координат. Эйнштейн развил эту мысль, придав ей совершенную математическую форму. Основываясь на результатах опыта Майкельсона, он предложил считать все равномерно движущиеся друг относительно друга системы координат равноправными. Под равноправием следовало понимать, что во всех равномерно и прямолинейно движущихся системах координат одинаковые физические явления протекают одинаково. Это означает, что и математическая форма законов физических явлений при переходе от одной системы координат к другой должна сохраняться.

В частности, должны были бы сохраняться и уравнения Максвелла. Такие уравнения, связывающие  $x^1$ ,  $t^1$  и  $x$  и  $t$ , были известны и до Эйнштейна. Но не ясно было, какой им приписывать смысл.

Теперь смысл стал ясным. Но из этих уравнений перехода от одной системы координат к другой вытекало, что с увеличением скорости сокращаются масштабы длины, замедляется ритм часов, увеличивается масса тел. Эти изменения, естественно, должны были коснуться любого эталона массы, длины или интервала времени, вне зависимости от способа их определения.

Нужно сказать сразу, что такие изменения с длинами тела, массами и временем протекания процессов должен был обнаружить наблюдатель в «неподвижной» системе координат, измеряя массу, длину или интервал времени в некоторой системе, быстро движущейся относительно него. Наблюдатель, которому пришлось бы двигаться вместе с этими массами, естественно, никаких изменений «у себя в системе отсчета» не обнаружил бы. Но это не значит, конечно, что «на самом деле масса не изменилась». Ибо, сказав так, мы бы отдали предпочтение какой-нибудь одной системе координат. А это противоречило бы результату опыта Майкельсона. Таким образом, изменения длины, времени и массы, которые предсказал Эйнштейн, это объективные изменения, а не следствие способа измерения.

Столь необычные для физиков XIX в. выводы теории Эйнштейна должны были экспериментально подтвердиться лишь при скоростях тел, достаточно близких к световым. Поэтому первые подтверждения специальной теории относительности Эйнштейна и появились в опытах с элементарными частицами. Было обнаружено, что у электронов, разогнанных до скоростей, близких к скорости света, существенно возрастает масса. При этом численное соответствие измеренного измене-

ния массы быстро движущегося электрона прекрасно совпало с предсказанием Эйнштейна. Также на элементарных частицах — мезонах было замечено изменение ритма времени. Мезоны живут недолго, но оказалось, что медленные (медленные относительно нас, «неподвижных» наблюдателей) мезоны живут меньше, чем быстрые. Таким образом, было подтверждено и изменение масштаба времени в быстро движущихся системах координат.

В настоящее время специальная теория относительности и базирующаяся на ней релятивистская механика стали по существу инженерными науками. На их основе конструируются и рассчитываются гиганты современной экспериментальной ядерной физики — ускорители элементарных частиц (самые длинные из уже созданных ускорителей имеют размеры в несколько километров). Таким образом, возвращаясь к нашей основной теме, мы видим: специальная теория относительности дает ответ на вопрос, как изменяются любые эталоны единиц в разных системах координат.

Нужно сказать, что в современных условиях, когда наука шагнула в космос, эти эффекты уже не так малы и не только в мире микрочастиц, но и для макроскопических объектов. Несложный подсчет показывает, что эталон 1 кг массы, если его поместить в межпланетную автоматическую станцию, изменится с точки зрения земного наблюдателя на несколько миллионных долей миллиграмма. А это величина вполне сравнимая с точностью определения эталона массы.

Мы коснулись вопроса об изменении масштабов физических величин при измерении в разных системах координат, движущихся друг относительно друга. А быть может, существуют условия, в которых и без движения эти масштабы, независимо от способа их определения, будут изменяться? Оказывается, возможны и такие условия.

Изучение этого вопроса было начато тем же Эйнштейном. Нужно сказать, что теория подобных явлений (она называется общей теорией относительности) разрабатывается и по сей день, хотя основы ее были заложены Эйнштейном почти пятьдесят лет назад. Мы не будем касаться круга идей, лежащих в основе общей теории относительности (это увлекло бы нас очень далеко от нашей темы), а ограничимся одним выводом теории, который относительно недавно (в 1960 г.) был блестяще подтвержден на опыте.

Согласно общей теории относительности, гравитационное поле (т. е. область действия сил, подчиняющихся закону всемирного тяготения) изменяет единицы масштаба пространства. Физики говорят иначе — изменяет метрику пространства. В частности, в гравитационном поле часы (любые!), находящиеся в разных точках, должны идти по-разному. При этом, конечно, имеется в виду, что мы не будем для проверки этого



утверждения брать такие часы, период колебаний которых явно зависит от силы тяжести, как, например, у маятников.

Для двух одинаковых часов, находящихся в поле тяжести Земли, но на разных высотах, относительное изменение периода часов, согласно Эйнштейну, должно быть равно

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{gH}{c^2}.$$

В этой формуле  $g$  — ускорение свободного падения,  $H$  — разность высот,  $c$  — скорость света. Если подставить в эту формулу  $g=980$  см/сек<sup>2</sup>,  $H=10^3$  см (т. е. 10 м) и  $c=3 \cdot 10^{10}$  см/сек, то мы получим, что  $\frac{\Delta T}{T} = 10^{-15}$ . Иными словами, этот

эффект необычайно мал. Но для физиков не существует «пренебрежимо» малых величин (точнее, о таких величинах говорят, когда сравнивают «малые» с «очень малыми»). Для этого нужно было бы иметь генератор со стабильностью частоты по крайней мере не худшей, чем  $10^{-15}$ .

Но, как вы помните, «стабильность» секунды, определенная с помощью тропического года, составляет лишь 12 значащих цифр. Такой генератор был найден. Оказалось, что в определенных условиях радиоактивные изотопы испускают гамма-кванты именно с такой стабильностью частоты. А так как, по Эйнштейну, все равно, какие часы (эффект должен наблюдаться для всех видов часов), то в качестве часов и были использованы кристаллы с такими радиоактивными изотопами. Опыт был поставлен в 1960 г. американскими физиками Паундом и Ребкой. Расхождение с цифрой Эйнштейна в опыте не превышало 10% и лежало в пределах ошибок измерений. Так был экспериментально установлен один из фундаментальнейших для будущей метрологии фактов влияния гравитационного поля на масштабы времени.

Мы коснулись в этом разделе в основном принципиальных физических проблем, а не насущных задач метрологии. Повидимому, только в будущем, при измерениях существенно более точных, чем современные, будут при использовании эталонов учитывать эффекты, о которых здесь шла речь. Однако, как мы видим, современная физика уже подготовила «базу» для дальнейшего развития метрологии.

После этого отклонения «в завтра» современной метрологии мы вернемся к «обычным» и «повседневным» единицам — единицам электрических величин.

## Единицы электрических величин

Единицы электрических величин можно ввести, пользуясь основными единицами, так же, как это было сделано для еди-

ницы силы и работы. Напомним, как «выглядит» закон Кулона для силы взаимодействия электрических зарядов:

$$F = K \frac{q_1 q_2}{r^2} .$$

Эту формулу можно «описать» словами: два точечных электрических заряда притягиваются (или отталкиваются) друг к другу с силой, пропорциональной произведению зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. Притягиваются разноименные заряды, отталкиваются одноименные. Нужно сразу сказать, что в этой формулировке по существу предлагается способ определения величины количества электричества  $q$ .

Для того, чтобы это сделать, достаточно положить коэффициент пропорциональности  $K$  равным единице (ведь закон Кулона — опытный), считать, что  $F=1$ ,  $r=1$ . Тогда, если заряды равны, то  $q_1=q_2=1$ .

Величина единицы электрического заряда, определенная таким образом (и ее размерность), естественно, зависит от выбранных единиц силы и расстояния. Если воспользоваться системой единиц, в которой основными являются сантиметр, грамм массы и секунда (эта система называется СГС), то в этой системе единица силы  $1 \text{ дн} = 1 \text{ г} \cdot \text{см}/\text{сек}^2$ , равная  $10^{-5}$  части от 1 ньютона (единицы силы в системе СИ).

Если  $F=1 \text{ дн}$  и  $r=1 \text{ см}$ , то  $q=1 \text{ СГСЭ}$  ( $q$ ). Такое уж громоздкое обозначение придумали для этой единицы количества электричества! Смысл обозначения очень простой: к буквам СГС (т. е. сантиметр — грамм-секунда) добавили букву Э — первую от слова электростатический (ведь закон Кулона справедлив только для электростатических зарядов). А поставленная в скобках буква  $q$  обозначает, что это единица количества электрического заряда. Название единицы  $\text{С}^1\text{СЭ}$  ( $q$ ) такое: это абсолютная электростатическая единица количества электричества. К сожалению, специального названия (например, такого, как эрг, ньютон) для этой единицы не придумали. Размерность единицы СГСЭ ( $q$ ) такая:  $\text{см}^{3/2} \text{ г}^{1/2} \text{ сек}^{-1}$ .

Введением (с помощью закона Кулона) новой величины единицы электрического заряда мы расширяем «область» действия основных единиц любой системы и на электрические величины.

Естественно, что точность определения новых единиц такая же, как и у основных единиц. Такой способ введения, с точки зрения метрологической, наиболее «законен», поэтому и в длинном названии единицы количества электричества появилось название «абсолютная».

Как мы увидим дальше, существуют и другие электрические единицы, к которым добавляется прилагательные «меж-

дународный». Единица СГСЭ ( $q$ ) довольно маленькая: по определению два таких единичных одноименных заряда расталкиваются с силой в 1  $дн$ , а одна дина — это  $1/350$  часть от грамма-силы (т. е. веса грамма-массы). Из-за малости СГСЭ ( $q$ ) была введена другая величина — единица количества электричества, названная абсолютным кулоном.

По определению один абсолютный кулон равен  $3 \cdot 10^9$  СГСЭ ( $q$ ). В электростатике кулон — это огромная величина. Если предположить, что нам удалось бы в комнате накопить два одноименных заряда по одному кулону, то при расстоянии в 10 м между ними они бы расталкивались с силой  $F = \frac{3 \cdot 10^9 \cdot 3 \cdot 10^9}{(10^3)^2} дн \approx 10^{13} дн \approx 10^4 т$ , т. е. с силой, примерно

равной весу океанского лайнера. А вместе с тем через обычную электрическую лампочку каждую секунду проходит около одного кулона. Но дело в том, что в металлическом волоске лампы и в подводящих проводах, кроме «проходящих» кулонов, которые состоят из электронов, есть и «неподвижные» кулоны (положительные ионы). Общие заряды тех и других почти равны, так как обычное вещество электрически нейтрально.

Надо сказать, что в тех проводниках, в которых ток идет, полного равенства зарядов нет, иначе бы и не было электрического тока. Чтобы представить себе, какое огромное количество зарядов содержится в веществе, предположим, что нам удалось «позаимствовать» у каждого атома меди из кусочка массой в 1 г по одному электрону. Тогда окажется, что грамм меди приобретает электрический заряд в 150 кулонов!

Единица величины тока в системе СГСЭ, так же как и единица количества электричества, не имеет специального названия. Иногда ее обозначают СГСЭ ( $I$ ). Если по проводнику через его поперечное сечение проходит в 1 *сек* одна СГСЭ ( $q$ ) единица заряда, то говорят, что сила тока равна единице СГСЭ ( $I$ ) (одной абсолютной электростатической единице тока).

Точность определения этой новой единицы такая же, как и для основных единиц. Если по проводнику течет ток в  $3 \cdot 10^9$  раз больший, т. е. один кулон в секунду, то сила тока равна одному амперу (единица силы тока, названная так в честь французского физика Ампера). Это определение так называемого абсолютного ампера.

Но есть и другой ампер — международный. Физики давно заметили, что при прохождении электрического тока через растворы некоторых солей и кислот на электродах, погруженных в раствор, выделяется газ или металл. При этом количество выделившегося вещества всегда пропорционально величине электрического заряда, прошедшего через раствор.

Для удобства воспроизведения ампера в 1893 году на меж-

дународном конгрессе электриков в Чикаго было принято считать, что сила тока в один ампер выделяет из водного раствора азотнокислого серебра 0,001118 г серебра в секунду. Это и есть определение международного ампера.

Однако так же, как это было и с другими единицами, два разнородных определения ампера не могли существовать вместе сколь угодно долго. Этому мешала все возрастающая точность измерения электрических величин.

Сейчас хорошо известно, что международный ампер составляет 0,99985 абсолютного ампера. Такую же долю абсолютного кулона составляет и международный кулон. Абсолютный ампер входит в систему единиц СИ.

Градуировку высокоточных приборов, измеряющих силу тока, производят на так называемых ампервесах. На этих весах «взвешивается» сила притяжения между двумя катушками, через которые пропускают ток. Одну из катушек прикрепляют к одному из плеч весов, другую располагают под ней. Обе катушки включены последовательно.

Сила этого тока и определяется по силе притяжения между катушками, их геометрическим размерам и расстоянию между ними. Как мы увидим дальше, так можно проградуировать приборы в абсолютных амперах.

Подобные измерения сложны и требуют больших затрат времени и поэтому проводятся один раз за 10 лет.

Интересно отметить, что разница между измерениями за 10 лет составляет примерно четыре миллионные доли. С такой точностью примерно и умеют воспроизводить абсолютный ампер.

Остановимся коротко на единицах электрического потенциала. Как известно, работа  $A$  по перемещению электрического заряда величиной  $q$  не зависит от пути, по которому движется заряд, и пропорциональна величине заряда:

$$A = Vq.$$

Величина  $V$  называется разностью электрических потенциалов или напряжением. Если в некоторой системе единиц положить  $A$  и  $q$ , равными единице, то мы получим определение единицы электрического потенциала. Если  $A=1$  джоуль,  $q=1$  абсолютный кулон, то по определению  $V=1$  абсолютный вольт входит в международную систему единиц СИ. Это «тот самый» вольт, который так часто встречается в быту.

В системе СГСЭ можно положить  $A=1$  эрг и  $q=1$  СГСЭ ( $q$ ). Тогда  $V=1$ , СГСЭ ( $V$ ). Никаких специальных названий эта единица не имеет. Так же, как и единицу электрического заряда в системе СГСЭ, единицу СГСЭ ( $V$ ) называют абсолютной электростатической единицей потенциала. Легко подсчитать, как связаны абсолютный вольт и единица СГСЭ

(V). Для этого нужно в определении 1 абсолютного вольта перейти от джоулей к эргам (т. е. единицам работы в системе СГСЭ) и от кулонов к единицам СГСЭ ( $q$ ).

$$1 \text{ абсолютный вольт} = \frac{1 \text{ джоуль}}{1 \text{ кулон}} = \frac{10^7 \text{ эрг}}{3 \cdot 10^9 \text{ СГСЭ } (q)} = \frac{1}{300}$$

СГСЭ (V).

Как видно из этого простого подсчета, единица СГСЭ (V) точно в 300 раз больше 1 в. Теперь нетрудно ввести и абсолютный ом — единицу сопротивления. Как известно, для постоянного тока для очень большого числа проводников выполняется закон:

$$V = RI.$$

В словесной формулировке этот закон выглядит так: сила тока в проводнике прямо пропорциональна разности потенциалов на его концах. Коэффициент  $R$  называют сопротивлением этого проводника. Если  $V=1$  абсолютному вольту, а  $I$  — абсолютному амперу, то  $R=1$  абсолютному ому.

История с международным омом такая же, как и с абсолютным ампером. Во второй половине XIX в. было предложено считать, что столб ртути длиной 106,3 см при температуре 0° и сечением 1 мм<sup>2</sup> имеет сопротивление 1 ом. Это международный ом. Сейчас путем прецизионных измерений установлено, что международный ом немного больше абсолютного ома (на 49 стотысячных долей).

Мы познакомились с одним способом введения основных электрических единиц, применяемых при изучении физических явлений, в которых электрические величины постоянны или изменяются не слишком быстро.

Однако существует и другой способ введения единиц электрических величин. Дело в том, что, кроме сил, которые возникают между двумя неподвижными электрическими зарядами, есть силы, возникающие между движущимися зарядами. Например, хорошо известен закон взаимного притяжения между двумя параллельными проводниками, по которым текут одинаковые токи.

Эта сила пропорциональна произведению токов в проводах, их длине и обратно пропорциональна расстоянию между ними:

$$F = K \frac{2I_1 I_2 l}{r}.$$

Природа данной силы иная, эта сила возникает за счет появления магнитного поля токов. И закон Кулона, и закон Био и Савара, из которого следует только что выписанная

формула, оба эти законы — опытные, так сказать, взятые у природы. И если мы в первом законе положили коэффициент пропорциональности равным единице, то во втором законе мы этого сделать не можем, так как все единицы величин, входящие в формулу для протяжения токов, уже введены (ведь

$$I = \frac{q}{t}).$$

Возникает ситуация, подобная той, которая была в случае закона всемирного тяготения, и коэффициент  $K$ , оказывается, следует оставить и учитывать, что величина его и размерность зависят от выбора системы единиц.

Однако не нужно думать, что здесь нам необходимо вводить новую мировую постоянную. Если величину единицы силы тока определять «через единицу количества электричества, «взятую» из закона Кулона, то, согласно теории Максвелла, эта величина в точности должна равняться единице, поделенной на квадрат скорости света.

Этот теоретический вывод был проверен на опыте, получилась прекрасное совпадение величины скорости света, полученной из этого опыта и из прямых измерений. Однако в связи с тем, что в принципе затрат на выбор «первоначального» закона нет и нет оснований отдавать предпочтение закону Кулона перед законом Био и Савара, существует и другая система единиц (СГСМ), в которой коэффициент  $K$  приравнен единице, и таким образом получена новая единица силы тока. Буква  $M$  — начальная в слове магнитная. Очень нетрудно подсчитать, что один абсолютный ампер равен 0,1 СГСМ ( $I$ ).

Систем единиц, включающих электромагнитные единицы, существенно больше, чем те три, о которых мы говорили. Дело еще исторически осложнилось тем обстоятельством, что сильное у некоторых физиков желание упростить форму записи уравнений Максвелла привело к появлению формы записи законов Кулона и Био и Савара, в которые входят различные величины диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , магнитной проницаемости  $\mu$  и безразмерный множитель  $4\pi$ . Такие системы имеют единицы, несколько отличные от тех, о которых шла речь выше, и называются рационализированными.

В этом кратком обзоре единиц электрических величин мы хотели подчеркнуть лишь современный способ определения этих единиц, который аналогичен способу введения производных единиц механических величин. Нужно отметить, что ом, ампер, вольт — это только малое число из единиц электрических величин, которыми пользуются физики. Многим из единиц, о которых мы здесь не говорили, присвоены имена известных физиков: Эрстеда, Генри, Максвелла, Вебера, Гаусса, заложивших основы учения об электричестве.

## Новые разделы науки — новые единицы

С открытием новых закономерностей, новых явлений в науке появляются и новые единицы, новые мировые постоянные. После открытия Беккерелем естественной радиоактивности начался бурный процесс проникновения физики в микромир. Были открыты электрон, протон, нейтрон, измерены их массы, электрические заряды и магнитные свойства.

Затем появился целый ряд новых элементарных частиц, которые подверглись также тщательному изучению. В мире атомов и ядер такие крупные единицы, как килограмм и метр, оказались неудобными для практического использования. Поэтому специально для микромира были введены новые единицы. В качестве единицы длины используется один ангстрем, который по определению равен одной стомиллионной доле сантиметра.

Сравнение ангстрема с метром происходит, конечно, не непосредственно, а через длины волн оптического излучения какого-либо атома. Например, длина волны излучения в красноволновой части оптического диапазона составляет около 6000 ангстрем, эта же длина волны равна 0,6 микрона (микрон — миллионная доля метра). Так как длина эталонного метра известна только с точностью до 6-го знака, то определить длину какого-либо тела с размерами порядка метра с точностью до ангстрема мы, конечно, не можем. Но в этом и нет необходимости, так как ангстрем специально введен для определения размеров «тел» в микромире.

В качестве единицы массы для атомных и ядерных исследований взята  $\frac{1}{16}$  массы атома кислорода (точнее, изотопа кислорода  $O^{16}$ ), равная  $1,65976 \cdot 10^{-24}$  грамма массы.

Интересно отметить, что эта единица относится к так называемой физической шкале. Существует исторически сложившаяся химическая шкала масс. В ней в качестве единицы массы взята  $\frac{1}{16}$  от средней массы атомов природного кислорода, содержащего несколько разных изотопов. Поэтому эта (химическая) единица массы немного отличается от физической и равна  $1,66022 \cdot 10^{-24}$ . Такая неточность лежит целиком «на совести» у химиков.

Она не исправлена до сих пор потому, что в большом числе уже выполненных научных исследований используется иногда одна, иногда другая величина, и поэтому в справочниках самых последних изданий приводят и ту, и другую величину единицы.

Нужно отметить, что измерение массы в атомных и ядерных исследованиях, когда это касается отдельного атома или частицы, не производится непосредственно. Обычный способ

определения массы заряженной частицы состоит в определении угла отклонения такой частицы в электрическом или магнитном поле.

При одинаковых начальных скоростях и одном и том же электрическом заряде чем больше масса, тем меньше угол отклонения частиц. На этом принципе построены так называемые масс-спектрографы — приборы, производящие анализ по массам пучка элементарных частиц или ионизированных атомов.

С помощью масс-спектрографов можно отличать очень небольшие отклонения массы атомов. На основе такого способа определения масс созданы установки для разделения разных изотопов одного и того же элемента. Напомним, что изотопы — это атомы, обладающие в ядре одним и тем же числом протонов, но разным числом нейтронов. Если ионизировать пучок атомов природного урана и пропустить его в магнитном поле, то из-за разности масс изотопов можно отделить «грозный» изотоп  $U_{235}$  от сравнительно «мирного»  $U_{238}$ .

Вместе с изучением искусственной и естественной радиоактивности появились и новые единицы, характеризующие степень радиоактивности вещества и количество поглощенного каким-либо телом радиоактивного излучения.

В качестве единицы радиоактивности используют обычно 1 кюри (в честь известной семьи физиков Пьера и Мари Кюри). В веществе с радиоактивностью в 1 кюри каждую секунду происходит  $3,7 \cdot 10^{10}$  распадов ядер, при этом каждую секунду выделяется соответственно  $3,7 \cdot 10^{10}$  «штук»  $\beta$ -частиц (т. е. быстрых электронов) или  $3,7 \cdot 10^{10}$  «штук»  $\gamma$ -квантов. Такой радиоактивностью обладает примерно 1 г чистого радия.

Единица под названием 1 рентген (в честь физика Рентгена) введена для того, чтобы определить дозу облучения рентгеновскими или гамма-лучами живых организмов. Доза облучения пропорциональна продолжительности облучения и его интенсивности. Рентген определяется как доза рентгеновских или гамма-лучей, образующих в 1 см<sup>3</sup> сухого воздуха такое количество ионов, общий заряд которых (конечно, для ионов каждого знака) равен одной электростатической единице заряда.

Именно ионы, образовавшиеся после пролета гамма- или рентгеновского кванта, наносят особенный вред живым тканям. Физики совместно с биологами установили, что несколько десятков рентген уже опасны для здоровья и наследственности. Интересно отметить, что при медицинских обследованиях дозы облучения при флюорографии составляют лишь сотые доли рентгена.

Мы коснулись очень незначительного числа новых единиц, которые появились в связи с возникновением атомной и ядер-



ной физики. Общее их число составляет несколько десятков. По-видимому, в ближайшие годы можно в связи с развитием физики ядра ожидать открытия новых явлений, а вместе с новыми явлениями — новых единиц.

Остановимся еще ненадолго на одном специфическом сорте единиц атомной и ядерной физики — единицах измерения энергии. Как только физики обнаружили элементарные частицы и измерили заряды электрона и протона, почти сразу же стал вопрос о том, нельзя ли создать «пушки», разгоняющие элементарные частицы, и с помощью таких пушек разбивать ядра различных элементов? Так зародилась новая отрасль физики — физика ускорителей.

Современные ускорители имеют огромные размеры. Один из наиболее мощных действующих ускорителей, расположенный недалеко от Женевы, имеет в диаметре около 200 м. В каких же единицах измерять энергию электронов или протонов, разогнанных в таких машинах?

Величина работы (энергии) в 1 джоуль слишком велика, и поэтому физики предложили использовать существенно более маленькую — так называемый электронвольт. Эта единица энергии, которую приобретает электрон, пролетая разность электрических потенциалов в 1 в. Несколько электронвольт достаточно сообщить электрону, чтобы вырвать его из металла. Несколько электронвольт энергии нужно сообщить электрону, чтобы образовать ион (т. е. оторвать электрон от атома). Несколькими килоэлектронвольтами обладает электрон, попадающий на экран в наших телевизорах и заставляющий его светиться.

А в огромных ускорителях электронам и протонам сообщается энергия в единицы и десятки миллиардов электронвольт. Эти единицы часто называют мэвами. Например, ускоритель вблизи Женевы, о котором мы упоминали, сообщает протонам энергию в 30 Мэв. Для элементарной частицы это огромная энергия.

Протон с такой энергией способен разбить многие очень крепкие ядра. Он один может вызвать около миллиарда ионизаций атомов. А вместе с тем по сравнению с джоулем это маленькая величина: 30 Мэв соответствуют всего лишь  $4,8 \cdot 10^{-9}$  джоуля, т. е. меньше, чем половинка от одной миллиардной.

Такая величина энергии, если ее сообщить в виде тепла 1 мг воды, нагреет его лишь немногим более, чем на одну миллионную градуса. Однако то, что такой энергией обладает лишь одна-единственная элементарная частица, делает возможным осуществление самых необычных превращений, о которых только могли мечтать алхимики.

## Неизменны ли мировые постоянные?

О гравитационной постоянной, а также о постоянной Планка мы уже упоминали. Мировых постоянных, или, как иногда говорят, мировых констант в физике необычайно много (несколько десятков). Открытие нового (принципиально нового) явления обычно связано с необходимостью ввести новую константу.

Такие физические константы, как скорость света, постоянная тяготения, заряды и массы элементарных частиц, магнитный момент электрона и протона и многие другие, это предмет гордости физиков. За этими константами «ухаживают», их измеряют со все большей степенью точности (как мы увидим дальше, нередко это имеет и большое прикладное значение).

В случае, если разные авторы получают разные числа (конечно, в последних знаках величины константы), возникают горячие споры об ошибках в методике измерений. Так было, например, при измерении заряда электрона. Американские физики Дю-Монд и Коэн даже занялись тем, что статистически обрабатывают результаты измерений разных авторов, и тем из них, у которых результат сильно отличается от среднего, рекомендуют еще раз проверить и уточнить методику измерения.

Однако мировые постоянные — это не только гордость физиков, но и свидетельство известной слабости. Дело в том, что почти все мировые постоянные можно рассматривать как намек природы естествоиспытателю: «Здесь есть что-то, чего ты не знаешь».

Ведь действительно, откуда появляется гравитационная постоянная, почему масса электрона в 1840 раз меньше массы протона, а не 3000 раз и не в 2 раза? Эти вопросы немного проясняют проблему, над которой работает довольно много физиков-теоретиков. Как связать в единой теории существующие частные теории и получить связь логическую и математическую между известными из опыта мировыми константами? Или более простая задача: связать хотя бы часть мировых констант между собой так, чтобы некоторые из них необходимо было брать из опыта, а остальные получались бы расчетным путем.

Эта проблема даже в такой частной форме еще не имеет и намека на свое разрешение, и поэтому физики опять обратились к опыту. Нельзя ли, поставив некоторые эксперименты, выяснить хотя бы немного природу констант? Так сказать, узнать, «откуда они берутся».

Прежде чем рассказать о двух гипотезах и двух опытах, заметим, что великий физик этого столетия Альберт Эйн-

штейн — создатель теории относительности — не считал скорость света (одну из самых фундаментальных мировых постоянных) такой уж неизменной величиной. И хотя в его теории скорость света считается постоянной величиной, он сам полагал, что экспериментаторам следует посмотреть, а не будет ли она (т. е. скорость света) от чего-либо зависеть. Ну, например, от магнитного поля.

Теперь расскажем об одном еще не поставленном эксперименте и одной гипотезе, в которых неизменность одной из мировых постоянных — гравитационной постоянной подвергается сомнению. Гипотеза принадлежит известному английскому физическому лауреату Нобелевской премии Дираку. Она состоит в том, что гравитационное взаимодействие должно быть связано с распределением вещества во Вселенной.

Как известно, видимая часть Вселенной расширяется, следовательно, некоторое время назад плотность вещества во Вселенной вблизи нашей Галактики была больше. Возможно, что гравитационная постоянная была также больше. А сейчас она убывает.

Согласно теоретическим оценкам Дирака, существенные изменения должны происходить за время порядка одного миллиарда лет. Иными словами, за год мировая постоянная, согласно этой гипотезе, могла бы измениться на  $10^{-9} \div 10^{-10}$  своей величины. А как заметить такой эффект? Можно было бы взять хороший маятник и очень точно измерять его период сейчас, а затем через год. В формулу для периода колебаний маятника, как известно, входит ускорение свободного падения, а с ним и гравитационная постоянная.

Однако маятник из самых термостабильных материалов (т. е. материалов с малым коэффициентом теплового расширения) изменит свою длину на  $10^{-8}$  своей величины, если сохранять его температуру в течение года с точностью  $0,01^\circ$ . А это значит, что примерно на столько же изменится и период его колебаний.

Американские физики предложили другой вариант опыта. На высоту около 2000 миль над поверхностью Земли запускается искусственный спутник. В течение года производятся точные (с точностью до долей секунды) отсчеты периода обращения спутника. В формулу для периода обращения, так же как и для периода колебаний маятника, входит гравитационная постоянная. Если период обращения будет изменяться, будет изменяться и гравитационная постоянная. Естественно, что при этом эксперименте должно быть учтено и то затухание, которое вносит в движение спутника сильно разреженная часть атмосферы Земли.

Опыт пока только обсуждается. Однако сомнения в неизменности этой мировой константы уже есть, Гравитационная постоянная в течение длительного времени и по сегодняшний

день подвергается довольно пристрастному экспериментальному «допросу». Физиков еще 60 лет назад удивил тот факт, что масса, входящая в закон тяготения Ньютона и в законы механики, одна и та же. Встал вопрос: а с какой точностью можно считать, что для разных тел гравитационная постоянная одна и та же?

Сначала этот факт для золота, свинца, алюминия был проверен с точностью до  $10^{-9}$ . Затем были открыты радиоактивные изотопы, и они тоже подверглись проверке. Результат опыта был тот же: и для долгоживущих, и для короткоживущих изотопов гравитационная постоянная одна и та же.

Совсем недавно один из авторов эксперимента со спутником, о котором шла речь выше, профессор Принстонского университета (США) Дике, заново проверил неизменность гравитационной постоянной для разных тел. Он использовал все достижения современной радиоэлектроники и техники высокого вакуума. Прибор, в котором производились измерения, управлялся дистанционно. Измерения производились также дистанционно. Сам прибор, чтобы избежать влияния изменения температуры толчков и т. п., был помещен в глубокую шахту.

В результате этих опытов, занявших много месяцев, был получен результат: если гравитационная постоянная и различна у различных тел, то не больше чем на  $(2 \div 3) 10^{-11}$  части. Даже для неподготовленного читателя эта чудовищная точность должна показаться большой.

В этом разделе мы очень коротко остановились на вопросах, связанных с мировыми постоянными (а поэтому и с системами единиц), которые относятся, так сказать, к переднему краю физической науки. Эти вопросы пока еще далеки от разрешения, и сегодня метрологическая наука опирается на мировые постоянные как на незыблемое основание. Дальнейшее развитие физики должно выявить «степень незыблемости» этого основания.

## Астрономические единицы

В астрономии, в разделе науки, который очень тесно связан с физикой, есть свои специфические единицы. Эти единицы являются производными от метрических, но многие из них существенно больше — в соответствии с космическими масштабами объектов, которыми занимается астрономия.

Одна из важных задач в астрономии — определение расстояний от Земли до различных небесных объектов. В пределах солнечной системы используются «обычные» единицы — тысячи и миллионы километров.

За пределами нашей планетной системы для измерения длины используется другая величина — световой год. Световой год — это расстояние, которое проходит электромагнитное излучение (в частности, видимый свет) за время, равное одному году. Как видно из определения, эта единица длины производная: в нее входит произведение мировой постоянной — скорости света и числа, кратного основной единице времени во многих системах (в том числе и в СИ) — секунде. Эта единица очень большая, округленно она равна  $9,5 \cdot 10^{17}$  см.

Один из основных способов определения расстояния в астрономии подобен обычному (земному) способу, применяемому в оптических дальномерах. Для определения расстояния до какого-либо объекта на Земле можно воспользоваться такой процедурой: нужно измерить расстояние между двумя точками (это расстояние называют базой), затем с помощью какого-либо оптического инструмента (например, бинокля или оптической трубы) измерить углы между направлением на интересующий нас объект и базой, помещая трубу в концы базы.

В результате таких измерений в нашем распоряжении окажется треугольник, основание которого и есть выбранная база, а за расстояние до объекта можно взять одну из сторон базы. Все элементы треугольника можно рассчитать, так как нам известны стороны и два угла. Эта операция и проделывается в оптическом дальномере.

Как видно из этого объяснения, точность отсчета расстояния прямо пропорциональна точности, с которой мы измеряем базу. В астрономии проделывают точно такую же процедуру. В качестве базы используют расстояние между двумя противоположными положениями Земли на солнечной орбите. Все расстояния до различных космических объектов определяются с той же точностью, с какой определено среднее расстояние от Земли до Солнца. Эта величина называется астрономической единицей.

До последнего времени (до 1959 г.) астрономическая единица была определена астрономами довольно грубо. По измерениям разных ученых, ее величина лежала где-то между 149 400 тыс. км и 149 700 тыс. км. Иными словами, точно были известны три значащие цифры. В 1957 г. наша планета вступила в эпоху освоения космического пространства. И одной из первых претензий ученых, создающих космические корабли, было требование точности определения астрономической единицы. Действительно, представим себе, что мы отправляем автоматическую межпланетную станцию к Марсу и знаем положение Марса только с точностью до третьего знака. Это значит, что при среднем расстоянии между орбитами Марса и Земли в 100 млн. км ошибка могла бы быть около 300 тыс. км, т. е. фотографировать Марс пришлось бы при-

мерно, с расстояния, равного расстоянию между Землей и Луной.

И вот с 1959 по 1962 г. в трех странах (СССР, Англия и США), независимо друг от друга, был поставлен грандиозный метрологический эксперимент. Для определения среднего расстояния до Солнца нужно было найти расстояние между Землей и одной из ближайших к нам планет в определенный момент времени.

Это расстояние определили радиолокационным способом, т. е. было точно измерено время движения электромагнитной волны от Земли до одной из планет и обратно на Землю.

В результате умножения этого времени на скорость света была получена очень точная величина расстояния между Землей и одной из планет. Затем уже расчетным путем было найдено и среднее расстояние между Землей и Солнцем. Оно оказалось равным 149 599 300 км, с наибольшей возможной ошибкой в 2 тыс. км. Иными словами, точность прежнего измерения астрономов была превышена в 1000 раз!

Радиолокационному «збмеру» подверглись Венера, Меркурий и Марс. Интересно отметить, что результаты независимых измерений разных ученых, ставивших свои опыты в разных странах, совпали с очень хорошей степенью точности. Чтобы оценить те огромные трудности, которые пришлось преодолеть ученым, поставившим этот метрологический эксперимент, приведем несколько цифр.

Известно, что мощность радиолокационного сигнала, отраженного от далекого объекта, убывает обратно пропорционально четвертой степени расстояния. Учитывая расстояние до Венеры и ее размеры, нетрудно подсчитать, что радиофизикам, создававшим такой планетный радиолокатор, необходимо было поднять его «эффективность» примерно в  $10^8$ — $10^9$  раз по сравнению с самолетным радиолокатором, действующим на несколько десятков километров.

Мощность передатчика, использовавшегося советскими радиофизиками из Института радиотехники и электроники АН СССР в 1961 г., составляла 250 млн. вт на единицу телесного угла. Это примерно в 1000 раз больше, чем у наиболее мощных радиолокаторов, использовавшихся во время второй мировой войны.

В приемнике радиолокатора был использован мазер — высокочувствительный квантовый усилитель, обладающий очень низким уровнем собственных шумов. Общая чувствительность приемника была такой, что можно было обнаружить при 5 мин. времени наблюдения сигнал мощностью  $10^{-23}$  вт на квадратный метр площади антенны радиолокатора. Чтобы оценить всю сложность проделанного эксперимента, укажем некоторые «экзотические» технические данные радиолокаторов:

1. Стабильность частоты в радиолокаторе была не хуже, чем  $10^{-9}$ . Часы, имеющие такую стабильность, за сутки должны уходить вперед или отставать не более чем на одну десятитысячную секунды.

2. Поправка на эффект Допплера (изменение частоты сигнала при отражении его от движущегося объекта), вводимая в приемник для учета относительного движения Земли и Венеры и равная  $65 \text{ кгц}$  (при рабочей частоте  $700 \text{ млн. гц}$ ), имела ошибку меньше  $1 \text{ гц}$ .

Коллектив советских физиков, успешно выполнивших этот эксперимент под руководством академика В. А. Котельникова, был удостоен Ленинской премии за 1964 г.

В качестве других астрономических единиц астрономы часто используют массу Солнца как меру для сравнения с массами других звезд, период обращения нашей Галактики и доли его (например, галактическая минута). Эти единицы были введены в основном из соображений удобства.

## С какой точностью можно измерить изменение длины, массы, силы?

В предыдущих разделах мы рассказали о точности воспроизведения эталонов длины, массы, времени. Естественно, что величина ошибки в определении одного из эталонов будет и величиной ошибки при измерении (т. е. сравнении с эталоном или его долями) любого другого тела.

Например, при измерении длины тела размером в несколько метров, «прикладывая» эталон метра к этому телу, определим размеры тела не точнее, чем мы знаем длину эталона метра. Как вы помните, длина эталона метра определена с точностью до  $0,12 \text{ микрона}$ . Таким образом, если придется «прикладывать» эталон 3 раза (тело имеет размеры около  $3 \text{ м}$ ), то ошибки в измерении будут складываться и общая максимальная ошибка будет около  $0,36 \text{ микрона}$ . Это так называемая абсолютная погрешность отсчета.

Важно при этом отметить, что относительная погрешность отсчета при этом будет такой же, как у эталона. Иными словами, отношение ошибки в определении длины к длине тела будет такое же, как относительная неточность в определении эталона метра, т. е. примерно одна десятимиллионная.

Читатель, конечно, понимает, что при таких высокоточных измерениях имеется в виду не «прикладывание» эталонов метра, а очень сложная процедура сравнения эталона метра (или его долей) на специальном и, конечно, очень сложном устройстве. Естественно, что при сравнении возможно будут внесены

и добавочные погрешности, так что указанная точность представляет собой предел при абсолютном измерении длины.

Когда говорят, что нам удалось произвести абсолютное измерение длины, то при этом имеется в виду, что известны все целые и дробные части эталона, которые «уложились» в данном теле.

Например, длина тела равна  $2,04365175 \text{ м} \pm 0,00000025 \text{ м}$ . Таким образом, при абсолютном измерении нужно знать все цифры, описывающие длину тела. Однако такое условие нужно не всегда. Представим себе, что мы измеряем изменение размеров тела при нагревании. У самых стабильных по отношению к изменению температуры веществ (у сплава эльнивар, у некоторых типов керамик) коэффициент температурного расширения имеет порядок  $10^{-7}$  1/град.

Это значит, что тело с таким коэффициентом теплового расширения, если его нагреть на  $1^\circ$ , удлинится на  $10^{-7}$  части. Если тело имеет длину около метра и мы его нагрели на  $0;1^\circ$  (такую величину легко можно измерить обычными градусниками), то длина его увеличится на 0,01 микрона. Это в 10 раз меньше, чем ошибка в определении длины метра.

Тем не менее подобное тепловое расширение можно заметить. Дело в том, что при таком измерении нас будет интересовать не «полный набор» цифр, характеризующий длину тела до нагревания и после, а только изменение длины. Однако такие измерения уже нельзя производить с помощью оптических отсчетных устройств, так как 0,001 микрона — это величина существенно меньшая, чем длина световой волны, и поэтому в оптическом микроскопе ее различить нельзя.

Измерения обычно производят с помощью специальных радиотехнических устройств. Здесь радиотехника приходит на помощь метрологии. Некоторые из таких устройств работают примерно так: представим себе, что в нашем распоряжении имеются два ламповых генератора ультракоротковолнового диапазона. Один из них генерирует частоту  $10^{+7}$  гц, а другой  $10^{+7}$  гц + 100 гц.

Напомним, что герц (обозначается гц) — это единица частоты, одно полное колебание за секунду; соответственно 100 гц — 100 полных колебаний за секунду и т. д.

Если электрические напряжения от этих двух генераторов подключить к специальной радиолампе (она так и называется — смесительная), то в определенном режиме данной лампы в ней пойдет ток с частотой, равной разности частот наших двух генераторов, т. е. 100 гц. Если в анодную цепь лампы включить микрофон, то мы услышим звуковые колебания с частотой 100 гц.

Радиотехники хорошо знают, что частота генератора сильно зависит от величины электрической емкости, входящей в контур генератора. Например, если емкость изменить на 2%,



то частота изменится на 1%. Величина же электрической емкости, в свою очередь, обратно пропорциональна расстоянию между пластинами конденсатора. Предположим, что расстояние между пластинами было  $2 \cdot 10^{-2}$  см (примерно толщина двух сложенных вместе бритв), а зазор изменился на  $2 \cdot 10^{-4}$  части, т. е. пластины сдвинулись на  $4 \cdot 10^{-6}$  см, или, что то же самое, на 0,04 микрона!

Так как емкость изменилась на  $4 \cdot 10^{-4}$  части, то частота одного генератора изменится на  $2 \cdot 10^{-4}$  части, т. е. на 2000 гц. А обычным частотомером нетрудно различить изменение частоты в 2 гц, т. е. изменение расстояния между пластинами в 1000 раз меньшее.

Если теперь присоединить одну из пластин емкости одного из генераторов к телу, тепловое расширение которого мы исследуем, то, измеряя изменение разностной частоты (иногда говорят — частоты биений), можно измерять изменение длины, много меньшее, чем 0,01 микрона.

Нужно при этом отметить, что радиотехническое устройство, о котором шла речь, описано в самых общих чертах, и для того, чтобы оно работало так, как здесь было описано, приходится прибегать к целому ряду «ухищрений».

Как мы видели из приведенных примеров, при измерении изменения длины можно различать существенно меньшие «добавки» к размерам тела, чем точность, с которой определен эталон метра. Все эти рассуждения, конечно, полностью относятся и к измерениям других величин.

Мы коротко остановимся на одной отрасли измерений, где «культура» определения малых изменений особенно высока.

Если бы Земля не вращалась, имела бы форму шара (а не была слегка сплюснутой у полюсов) и была бы сплошь однородной, то ускорение силы тяжести во всех точках земной поверхности было бы одним и тем же. Однако вращение, отклонение от шарообразности и, что особенно важно, неоднородность структуры земного шара приводят к тому, что ускорение свободного падения на поверхности Земли различно.

На вращение, высоту над уровнем моря и сплюснутость можно ввести поправку. Таким образом, если в нашем распоряжении имеется высокоточный прибор, позволяющий измерять силу тяжести, то с учетом поправок, о которых только что шла речь, можно получить необычайно важную информацию о плотности слоев Земли, близко расположенных к прибору. Если слои более плотные, чем некоторое среднее число, то прибор покажет большую силу тяжести, если менее плотные — меньшую. Такие приборы называются гравиметрами.

Гравиметры находят очень широкое применение в геофизической разведке. Знание средней плотности слоев на несколько километров вглубь вблизи гравиметра (заметьте, что при этом не нужно дорогостоящего бурения) — очень ценная

для геолога информация. Современные гравиметры являются весьма совершенными приборами. Они портативны, просты и надежны в эксплуатации.

Эти свойства им необходимы, так как геологи их используют подчас в условиях, очень далеких от лабораторных. Гравиметр представляет собой своего рода образец прибора, измеряющего изменение величины. Самые лучшие гравиметры измеряют изменения ускорения силы тяжести в восьмом знаке!

Интересно, что все эти измерения изменения ускорения обычно относят к ускорению силы тяжести в Потсдаме (в ГДР, недалеко от Берлина), где произведено наиболее точное абсолютное измерение ускорения свободного падения. Гравиметры переносные обычно сверяют со стационарными до и после геологического похода. Это делают для того, чтобы учесть возможное изменение «нуля» прибора.

В последнее время интерес к гравиметрическим измерениям резко возрос в связи с запуском в космос искусственных спутников. Дело в том, что траектория спутника определяется ускорением силы тяжести в разных точках его орбиты. А так как сила тяжести в разных точках земной поверхности различная, то и траектория, и время обращения спутника будут немного изменяться.

Особенно это существенно в отношении спутников, летающих вблизи земной поверхности. Ведь 300 км — это очень небольшая доля от радиуса Земли (6400 км). Поэтому сейчас интенсивно разрабатываются так называемые морские гравиметры, позволяющие производить измерения с кораблей (четыре пятых земной поверхности — моря и океаны).

До сих пор разговор шел об измерениях, которые производятся в земных условиях. Точности астрономических измерений иные, чем на Земле, в лабораторных условиях, и это естественно, так как в распоряжении астрономов имеются лишь оптическое излучение, приходящее на Землю из космоса.

Тем не менее и у астрономов точности отсчетов весьма велики. Например, угловые расстояния между далеко разнесенными звездами измеряются с точностью до десятой доли угловой секунды, а между близко расположенными звездами — до сотых долей угловой секунды!

Мы рассказали о приборах, которые позволяют измерять очень малые изменения физических величин. Естественно, что речь шла о таких измерениях, когда до какого-то момента времени изменения не было (например, тело не было нагрето), а затем изменение произошло (тело нагрели, и оно удлинилось). Таким образом, речь шла об однократных измерениях изменения физической величины. С такими же приборами можно наблюдать и медленные, и не слишком быстрые изменения физической величины. Например, можно проследить, как изменяется во времени длина тела из-за неконтро-

лируемых изменений длины. Такой «дрейф» длины нетрудно записать на ленте самописца.

Если мы имеем дело с однократным измерением изменения длины (или какой-либо другой величины), то мы «разглядим» на такой ленте ступеньку изменения лишь в том случае, если ее величина больше, чем беспорядочные изменения, которые также фиксирует самописец.

Теперь зададим себе вопрос: ну, а если изменение можно повторить 2 раза, несколько раз по определенному закону, нельзя ли такое переменное изменение физической величины различить более точно? Оказывается, можно, и точность при этом возрастает на много порядков. Чтобы рассказать о специфике таких измерений и о пределах, которые определяют точность измерения переменных физических величин, нам необходимо будет в самых общих чертах познакомиться со статистической теорией обнаружения и с теорией флуктуации.

Что же такое статистическая теория обнаружения?

Представьте себе, что вы подбрасываете монету и подсчитываете число выпадания «орла» и «решки». Пусть после 20 подбрасываний «орел» выпал 8 раз, а «решка» — 12. На первый взгляд, если обе стороны монеты равноправны (т. е. нет смещения центра тяжести в какую-нибудь сторону) и вероятность выпадания каждой стороны равна половине, полученный результат (8 и 12) не вызывает особого удивления.

Стороны могут быть равноправны. Но могут и не быть. Давайте повторим процедуру 2000 раз. Если бы мы получили после такого числа повторения 968 раз «решки» и 1032 «орла», многие бы сказали (опираясь на интуицию, конечно), что стороны монеты равноправны.

Ну, а если 800 и 1200? Вопрос об обнаружении такой разницы и есть один из типичных вопросов статистической теории обнаружения.

Эта наука точно скажет, в каких пределах при заданной достоверности ответа лежит отклонение среднего числа «орлов» и «решек» от 0,5. Если отклонение больше, эта теория скажет, какой вероятности следует дать предпочтение для «орла» и для «решки» (например, 0,4 и 0,6). Отсюда можно высказать суждение об однородности монеты. Чем больше число подбрасываний (испытаний) будет сделано, тем точнее будет ответ. Мы сказали выше: «с заданной степенью достоверности». Это выражение означает, что теория дает ответ с некоторой ошибкой.

Вероятность ошибиться при этом выбирается самим экспериментатором. Для пояснения приведем пример статистического вывода: вероятность выпадания «орла», если судить по результатам данных измерений, равна  $0,41 \pm 0,06$ , с достоверностью 0,95. Это означает, что по данным наших «подбрасываний» можно утверждать, что истинная вероятность (т. е.

та, которую мы узнали бы при бесконечном числе измерений) лежит в пределах от 0,47 до 0,35, при этом достоверность этого утверждения 95%, а вероятность ошибиться — 5%. Можно, конечно, изменить уровень достоверности и взять, например, 0,99. Тогда пределы будут несколько шире:  $0,41 \pm 0,08$ .

Математический аппарат статистической теории обнаружения очень удобно применять для измерения переменных физических величин.

Представим себе, что мы неоднократно измеряем некоторую физическую величину и из-за помех (об их физической природе мы поговорим немного позже) получаем значения 9,2; 5,9; 5,3; 8,0; 10,5 и т. д. Рецепт «обработки» таких результатов измерений известен уже давно. Результат после 100 подобных измерений может выглядеть так: физическая величина (в некоторых единицах) равна  $9,7 \pm 0,7$ , с достоверностью 0,95. Из этой записи видно, что мы могли бы, дважды повторяя такие серии измерений, различить разницу между двумя подобными физическими величинами в 0,7 с достоверностью 0,95.

Интересно отметить, что приведенные выше цифры взяты из эксперимента Паунда и Ребки, о котором шла речь выше.

Из приведенных примеров ясно, что многократное повторение измерений дает возможность резко повысить их точность. Статистическая теория обнаружений дает строгие рецепты обработки результатов наблюдений, записанных не только в виде цифр, но и в виде записи на ленте самописца.

При этом, конечно, речь идет о выделении из помех (говорят также из шумов, из флюктуаций) переменной величины. Чем точнее известен закон изменения этой величины, тем легче ее выделять, тем меньше будет погрешность. Например, легче всего выделять синусоидальное изменение какою-либо физической величины при точно известных частоте и фазе этого синусоидального изменения.

Статистическая теория обнаружения дает оптимальные (т. е. наилучшие из всех возможных) способы обработки. Причем, конечно, эту обработку результатов наблюдений можно возложить на электронную машину, она это сделает быстрее человека. Так было при первом опыте американских физиков с радиолокацией Венеры. Записанные на ленту отраженные сигналы не были видны «невооруженным глазом» на фоне помех, и их пришлось выделять путем статистического анализа длительное время (несколько месяцев).

Как мы видим, в точность измерения переменной физической величины вошел новый параметр — время. Чем больше затрачено времени, тем точнее измерения.

Сейчас мы коротко расскажем об одном характерном примере измерения переменной величины — переменной длины. Опыт, о котором идет речь, был поставлен около 10 лет назад советским физиком И. Л. Бернштейном.

Представьте себе интерферометр (такой же, как в опыте Майкельсона). В нем, как мы уже говорили, устанавливается стоячая оптическая волна. Если немного сдвинуть одно из зеркал, то сдвинется и волна. Фотоэлемент, поставленный в этот прибор, позволяет фиксировать переменные изменения смещения с амплитудой в  $10^{-11}$  см! Это очень малая величина.

Заметим, что размеры атома — около  $10^{-8}$  см, т. е. измеряются смещения в одну тысячную атомных размеров.

Конечно, при этом измеряются изменения смещения зеркала в целом и только на определенной частоте (заранее известный закон изменения), а не отдельные колебания атомов, которые колеблются независимо и с совсем другими частотами.

Несколько слов о том, что же мешает измерять малые смещения, малые силы, малые изменения массы и т. п. Если удастся избавиться от всяких «неприятностей», связанных с неконтролируемыми изменениями температуры, дрожью стен и основания лаборатории и т. п., то останется самый «страшный» враг физика-экспериментатора — тепловые флюктуации.

Дело в том, что если мы хотим измерить, например, малую переменную, действующую на какое-то тело, то нам будут мешать случайные толчки атомов и молекул, окружающих это тело. Хаотическое движение атомов и молекул и есть то состояние нагретости тела, которое мы можем оценить на ощупь или измерить специальным прибором. Чем выше температура, тем сильнее тепловое движение атомов и молекул. И только при абсолютном нуле тепловые движения прекращаются.

Вернемся к случаю, когда мы хотим обнаружить переменное воздействие малой силы на некоторую массу. Тогда, чтобы уменьшить тепловые толчки, нужно возможно лучше освободить эту массу от связи с окружающими телами и тем самым ослабить тепловые толчки. Для этого в современных опытах тело подвешивают на очень тонкой нити из вольфрама или кварца (толщиной в несколько микрон) и помещают в вакуум.

Строгая теория тепловых флюктуаций рекомендует уменьшать коэффициент трения элементов, связывающих массу, на которую действует сила, с окружающими телами. Поэтому чем длиннее подвес, тем меньше коэффициент трения, тем меньше сила, которую можно измерить.

В опытах, поставленных в 1960 г., американскому физiku Дике удалось измерять переменную силу в  $10^{-9}$  дн, действовавшую на массу в несколько граммов. Напомним, что 1 г массы притягивается к Земле с силой примерно 980 дн.

Об этих опытах мы говорили, когда речь шла о гравитационной постоянной. Конечно, такую потрясающе малую даже для искушенных экспериментаторов величину силы, кото-

рую можно различить, удастся достигнуть лишь при длительном (многочасовом) выделении (статистической обработке) сигнала из шумов. При этом используется и то, что сила изменяется по синусоидальному закону с известной частотой и фазой, так что нужно измерить величину амплитуды силы.

В этом разделе мы привели несколько примеров, которые демонстрируют всю мощь современной экспериментальной техники в области измерения переменных механических величин. При измерении переменных электрических величин достигнуты еще большие успехи. О них мы сейчас и расскажем.

## **С какой точностью можно измерить изменение электрических величин?**

При измерении весьма малых переменных величин тока, напряжения, мощности зафиксировать сколь угодно малые значения этих величин «мешают» причины, весьма сходные с теми, о которых мы говорили только что. Чтобы познакомиться с природой электрических флуктуаций, нужно представить себе механизм прохождения тока через проводники и через электровакуумные приборы.

Металлический проводник, с точки зрения современных представлений о строении твердого тела, представляет собой один кристалл или много тесно прилегающих друг к другу кристаллов (поликристаллическая структура). Правильную геометрическую форму кристалла образуют положительные ионы атомов этого металла. Каждый ион — это атом, потерявший один или два электрона (так называемые электроны проводимости или свободные электроны).

В обычном состоянии, т. е. когда металлический проводник имеет температуру, отличную от абсолютного нуля, и ионы, и свободные электроны совершают хаотическое (беспорядочное) движение. Оно тем интенсивнее, чем выше температура тела. При этом ионы колеблются около своих положений равновесия (так что форма кристалла сохраняется), а электроны могут двигаться во всех направлениях по всему объему проводника. Электроны, естественно, сталкиваются с ионами и обмениваются с ними энергией так, что энергия одного электрона сохраняется постоянной только от столкновения до столкновения.

Если наложить извне на металл электрическое поле, то в хаотическом тепловом движении электронов появится небольшой «порядок»: они начнут дрейфовать в направлении приложенного электрического поля. Ионы же стронуться с места не смогут, так как их удерживают около положения равновесия очень сильные внутрикристаллические силы.

В разделе об электрических единицах уже отмечалось, что количество электрических зарядов в веществе огромно, поэтому даже самый сильный электрический ток — это лишь очень небольшой «дрейф» на фоне интенсивного беспорядочного движения свободных электронов.

В полупроводниках картина движения электрического тока в общих чертах та же, что и в металлах. Однако полупроводникам присущи некоторые добавочные «сложности», на которых мы здесь останавливаться не будем. Вернемся к беспорядочному движению электронов в металлическом проводнике.

На концах проводника напряжение будет равно нулю лишь в том случае, если все электроны будут равномерно распределены по объему проводника. Из-за теплового движения то один, то другой электрон, а то и несколько сразу оказываются то на правом, то на левом конце проводника сверх средней нормы электронов. В результате между концами проводника возникает беспорядочное переменное напряжение. Чем выше температура, тем больше это напряжение. Лишь при абсолютном нуле, когда все виды теплового движения «стихают», это флюктуационное напряжение станет равным нулю.

Представим себе, что «пачка» электронов «забежала» на один из концов проводника. На этом конце избыток отрицательных зарядов, а на другом — положительных (из-за недостачи электронов). В результате внутри проводника возникнет электрическое поле, которое будет стараться возвратиться назад ушедшую со своего места пачку электронов. Чем больше длина проводника, т. е. чем больше его сопротивление, тем медленнее произойдет возврат электронов. А это значит, что для больших сопротивлений величина переменного напряжения будет больше.

Такое напряжение на проводнике называют часто тепловыми флюктуациями или тепловыми шумами. Оно состоит из самых разнообразных частот — от самых низких инфразвуковых вплоть до частот, соответствующих электромагнитным волнам длиной в доли сантиметра. Строгая математическая теория этих шумов известна физикам уже несколько десятков лет, и сейчас можно очень точно рассчитать среднеквадратичное значение напряжения на концах проводника с известным сопротивлением и температурой. Например, если сопротивление равно  $1000 \text{ ом}$ , то при комнатной температуре в полосе частот в  $1 \text{ гц}$  среднеквадратичное значение напряжения на концах проводника будет равно  $4 \cdot 10^{-9} \text{ в}$ . Если же взять полосу частот в  $1 \text{ мгц}$ , то среднее квадратичное напряжение увеличится до  $4 \cdot 10^{-6} \text{ в}$ . Нетрудно подсчитать, что в первом случае среднеквадратичное значение теплового тока в этом проводнике составит  $4 \cdot 10^{-12} \text{ а}$ .

Именно эти флюктуации и мешают измерять в тех же

условиях падение напряжения меньше, чем  $4 \cdot 10^{-9}$  в, или переменный ток меньше, чем  $4 \cdot 10^{-12}$  а. Мы подчеркиваем, что эти флуктуации мешают, а не «не дают возможности». Дело в том, что в случае электрических шумов можно, как и в случае механических шумов, использовать статистическую теорию обнаружения.

Как мы уже знаем, согласно этой теории, при многократном повторении измерения (т. е. при большей затрате времени) можно измерить меньшие значения напряжения. В рассматриваемом примере с тепловыми шумами сопротивления 1000 ом при комнатной температуре можно различить электрическое переменное напряжение  $4 \cdot 10^{-10}$  в, если его частота не изменяется в пределах 1 гц и если затратить на выделение время в 100 сек. Как видно из этого примера, важно, чтобы «искомый» сигнал был узкополосным, т. е. состоял из частот, лежащих в узкой полосе. В таком случае ему мешают лишь те шумы, которые лежат в той же полосе, а чем уже выбранная полоса, тем меньше уровень шумов.

Ну, а если затратить время на выделение большее, например  $10^{+6}$  сек (немного более 10 суток)? Тогда мы сможем выделить переменный сигнал с амплитудой  $4 \cdot 10^{-12}$  в. Как видно из приведенных цифровых примеров, хотя принципиального предела и нет, но существует реальный практический предел обнаруженных электрических величин. Например, переменное напряжение в  $4 \cdot 10^{-20}$  в в полосе частот 1 гц на сопротивлении 1000 ом даже при температуре жидкого гелия ( $4^\circ$  по шкале Кельвина,  $-269^\circ$  по шкале Цельсия) пришлось бы выделять  $10^{22}$  сек. Напомним, что время жизни человека примерно  $3 \cdot 10^{+9}$  сек.

Мы рассказали лишь об одном «сорт» причин, мешающих измерять малые переменные электрические величины. Кроме тепловых шумов, о которых мы уже говорили, существуют еще так называемые дробовые шумы. Дело в том, что электрический заряд дискретен — нельзя передать от одного проводника другому заряд меньший, чем заряд одного электрона [ $(4,80 \cdot 10^{-10}$  СГСЭ ( $q$ )). Хотя это и малая величина, но при измерении малых переменных токов и напряжений дискретность зарядов сказывается весьма заметно.

Особенно заметны дробовые шумы в электронных лампах, применяемых для усиления слабых сигналов. Электроны, покидающие раскаленный катод, в таких лампах вылетают в значительной мере независимо друг от друга. В результате в электрической цепи, в которую включена электронная лампа, переменный ток состоит из маленьких ступенек. Высота каждой ступеньки равна заряду электрона.

В течение последних 20 лет радиофизики ведут мощное развернутое наступление на шумы всех возможных сортов. Примерно лет двадцать назад стало ясно, что приемники на



электронных лампах не годятся для усиления очень слабых сигналов.

Лампы обладают очень большим сопротивлением; следовательно, большие сопротивления, которые приходилось включать последовательно с лампами, давали большие тепловые шумы. Кроме того, лампы добавляли к полезному сигналу и большой дробовой шум. От раскаленного катода (около  $800^\circ$ ) лампы избавиться не могут, так как иначе не будет эмиссии электронов. Таким образом, нужно было избавиться от самой лампы, заменив ее принципиально новым элементом, позволяющим усиливать слабые сигналы и имеющим очень малый уровень собственных шумов.

Такой усилитель был создан. Этот усилитель — близкий родственник атомным стандартам частоты, о которых мы уже говорили. Он обладает необычайно малым уровнем собственных шумов<sup>1</sup>. Основная его часть — кристалл рубина, помещенный в магнитное поле и охлажденный до гелиевых температур. Если облучать этот кристалл электромагнитным излучением некоторой выбранной частоты, то он оказывается способным усиливать радиосигналы на другой (тоже вполне определенной) частоте. При этом, как легко сообразить, нет дробовых шумов совсем (нет катода и анода), а тепловые флуктуации очень небольшие, так как кристалл охлажден до температуры жидкого гелия. В результате с помощью такого усилителя можно обнаруживать рекордно малые уровни мощности электрических сигналов.

Такой усилитель был использован советскими радиофизиками при радиолокации Венеры (об этом эксперименте мы рассказывали в разделе об астрономических единицах). Планетный радиолокатор мог обнаружить сигнал мощностью  $10^{-23}$  вт, приходящийся на  $1 \text{ м}^2$  площади приемной антенны. При этом время выделения составляло несколько минут. Чтобы представить себе, что такое  $10^{-23}$  вт на  $1 \text{ м}^2$ , вообразите, что на Венере (это дальше, чем 40 млн. км) кто-то зажжет электрическую лампочку мощностью в 15 вт. Вот тогда на квадратный метр земной поверхности будет приходиться  $10^{-23}$  вт.

Однако созданием квантовых малошумящих усилителей не ограничиваются успехи современной радиоэлектроники. Созданы и другие типы усилителей, не использующие электронных ламп. Они «шумят» немного больше, чем усилители на кристаллах рубина, но зато не требуют для охлаждения жидкого гелия.

Мы остановились на основных типах шумов, присутствующих в радиоаппаратуре. Однако различных источников шумов

---

<sup>1</sup> Подробнее о таких усилителях см. в нашей серии книгу И. Артемьева «Радиофизика в нашей жизни», № 1—2. М., Изд-во «Знание», 1964.

становится много больше, когда исследователь вынужден выйти из лаборатории и ставить опыты, в которых есть приемник с антенной и передатчик. Оказывается, что в определенных диапазонах длин волн очень сильно шумит тропосфера (т. е. испускает радиоволны с беспорядочно изменяющейся амплитудой и частотой). Не менее сильно шумят и поверхность Земли и некоторые источники в космосе (например, наше Солнце).

Интересно отметить, что в некоторых экспериментах антенны космических радиоприемников очень тщательно «охраняют» от Земли. Оказывается, что в сантиметровом диапазоне длин волн отдельные «места» космоса излучают радиоволны (или лучше говорить радиошумы) в сотни раз слабее — менее мощные, чем поверхность нашей планеты. Поэтому диаграммы направленности антенн и «охраняют» от Земли: антенна не должна захватывать радиошумы от поверхности нашей планеты. Радиошумы из космоса приносят и известную пользу: они несут дополнительную информацию о строении Вселенной.

Сейчас существует отдельная, бурно развивающаяся отрасль астрономии — радиоастрономия, занимающаяся исследованием источников космических радиосумов.

Мы рассказали о различных видах помех, которые мешают измерять малые переменные электрические токи, напряжения. Наш рассказ будет не полным, если не упомянуть об одном случае измерения однократных электрических сигналов.

Представим себе обычную электронную лампу с двумя электродами: катодом и анодом. В раскаленном состоянии катод окружен облачком электронов. Если анод соединить с катодом (т. е. не подавать, как это обычно делается, положительного потенциала на анод), то и в этом случае по замкнутой цепи пойдет небольшой ток. Дело в том, что в электронном облачке вблизи катода электроны обладают различными энергиями. Самые быстрые из них могут совсем оторваться от катода и долететь до анода. Этот процесс сразу же прекратился бы, если бы анод не был подсоединен к катоду (в этом случае катод, потерявший несколько электронов, зарядился бы положительно и не «отпускал» от себя следующие порции электронов).

Энергии этих быстрых тепловых электронов составляют единицы и доли электронвольт. Электронвольты — это энергия, которую приобретает один электрон, пройдя разность потенциалов в 1 в (эта энергия равна  $1,6 \cdot 10^{-12}$  эрг). Среди таких электронов очень мало обладающих энергией в  $3 \div 4$  электронвольт и совсем нет с энергией в 10—15 электронвольт. Это означает, что если мы зарядим анод отрицательно по отношению к катоду (например до минус 20 в), так сразу прекратится.

Теперь представим себе, что в лампе откуда-то около катода появился электрон с энергией в 100 электронвольт. Несмотря на отрицательный потенциал анода (минус 20 в), этот энергичный электрон, если скорость его направлена к аноду, все же доберется до него. Такой единичный (и именно потому, что он единичный) электрон может быть замечен на фоне тепловых шумов.

Такие единичные электроны с большой энергией (и не только электроны, но и другие заряженные частицы) «легко получить» в ядерных реакциях. Для их обнаружения применяются специальные приборы (так называемые счетчики), которые не обращают внимания на тепловые электроны, а считают именно единичные с большой энергией (существенно большей, чем средняя тепловая). Можно сказать, что в таких устройствах считают каждый элементарный зарядик отдельно.



На этом мы и закончим наш рассказ об единицах физических величин и эталонах, системах единиц и измерениях малых переменных величин. Мы надеемся, что из этого краткого рассказа читатель поймет, что современные способы хранения и воспроизведения эталонов физических величин, а также вопросы создания систем единиц теснейшим образом связаны с новейшими достижениями физики.

# Интересно, полезно знать

Что существуют весы, позволяющие измерять вес вашей подписи на бумаге, вес отдельной буквы и даже одной точки.

Что международная шкала температур довольно сильно изменилась: температура  $3500^{\circ}$  в 1927 г. сейчас соответствует температуре  $3471^{\circ}$ .

Что, кроме обозначений кило и мега, физики используют еще и новые — гига и тера, которые означают величину, более крупную, соответственно  $10^9$  и  $10^{12}$  раз. Например, видимый свет имеет частоту в несколько сотен терагерц (один герц — это один полный период колебания за секунду).

Что экваториальный радиус Земли измерен с точностью до двухсот метров.

Что плотность воды (масса одной кубической единицы) вблизи нуля по Цельсию измерена с точностью до 5-го знака.

Что при изменении температуры воды на  $1^{\circ}$  «вверх» или «вниз» от  $4^{\circ}$  по шкале Цельсия приводит к уменьшению плотности на 3 стотысячные части.

Что упругие свойства (модуль Юнга) самого мягкого металла — свинца и самых твердых сортов стали различаются меньше чем в 15 раз.

Что осмий и иридий — элементы, обладающие в твердом состоянии наибольшей плотностью ( $22,4 \text{ г/см}^3$ ).

Что при взрывах некоторых звезд полная энергия излучения составляет величину  $10^{45}$  больших калорий.

Что некоторые линии излучения возбужденных ядер обладают стабильностью частоты на порядок больший, чем у водородного лазера (эффект Мессбауэра, открытый в 1958 г.).

Что при точном взвешивании тел с разной плотностью всегда вводится поправка на выталкивающую силу воздуха.

## СОВЕТУЕМ ПРОЧИТАТЬ

- Беклемишев А. В.** Меры и единицы физических величин. Физматгиз, 1963.
- Бурдун Г. Д.** Единицы физических величин. Изд. 2-е, Стандартгиз, 1962.
- Маликов С. Ф.** Введение в технику измерений. Машгиз, 1952.
- Маликов С. Ф.** Основы метрологии. Изд-во Комитета по делам мер и измерений приборов, 1949.
- Сена Л. А.** Единицы измерения физических величин. Изд. 3-е. Гостехиздат, 1951.

## О ЧЕМ РАССКАЗЫВАЕТСЯ В ЭТОЙ КНИЖКЕ

Немного истории . . . . .	3
Для чего нужны эталоны? Эталон длины. Как сохранить метр? . . . . .	5
Эталон массы . . . . .	9
Равномерно ли вращается Земля? Как сохранить секунду? . . . . .	12
Что такое системы единиц? . . . . .	15
Мировые постоянные и системы единиц . . . . .	20
В каких условиях изменяются единицы физических величин? . . . . .	26
Единицы электрических величин . . . . .	32
Новые разделы науки — новые единицы . . . . .	38
Неизменны ли мировые постоянные? . . . . .	41
Астрономические единицы . . . . .	43
С какой точностью можно измерить изменение длины, массы, силы? . . . . .	46
С какой точностью можно измерить изменение электрических величин? . . . . .	53
П р и л о ж е н и е: «Интересно, полезно знать» . . . . .	59

**ВЛАДИМИР БОРИСОВИЧ БОРИСОВ**

Редактор *И. Б. Шустова*  
Художеств. редактор *Т. И. Добровольнова*  
Техн. редактор *М. Т. Перегудова*  
Корректор *З. П. Баранова*  
Обложка *В. К. Михайлова*

Сдано в набор 16/VII 1964 г. Подписано к печати 22/VIII 1964 г. Изд. № 239.  
Формат бум. 60 × 90<sup>1/16</sup>. Бум. л. 2,0. Печ. л. 4,0. Уч.-изд. л. 3,68.  
А 03239. Цена 12 коп. Тираж 13 900 экз. Заказ 2570.

Опубликовано тем. план 1964 г. № 297.  
Издательство «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

Типография изд-ва «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

**ДЛЯ ВСЕХ,  
КТО ХОЧЕТ БОЛЬШЕ ЗНАТЬ,  
КТО ЖЕЛАЕТ ЗАНИМАТЬСЯ  
СИСТЕМАТИЧЕСКИ,**

**кто слушает лекции в народных университетах  
естественнонаучных знаний,  
издательство «Знание» продолжает выпускать  
в серии «Народный университет» книги  
по естественным наукам**

**В 1965 ГОДУ ПОДПИСЧИКИ ПОЛУЧАТ  
СЛЕДУЮЩИЕ КНИГИ:**

- «Металлохимия»
- «Периодический закон как основной закон химии»
- «Синтетические каучуки»
- «Физико-химические свойства полимеров»
- «Химическая термодинамика» (основные положения)
- «Основы термодинамики и статистической физики»
- «Излучение и вещество»
- «Тайнопись жизни»

и другие по вопросам физики, биологии, геологии, всего  
12 книг за год.

Авторами книг выступают видные советские ученые — ака-  
демики, профессора, кандидаты наук.

Объем каждой книги в среднем — 5 л.

**ПОДПИСНАЯ ЦЕНА**

на год	— 1 руб. 80 коп.
на полугодие	— 90 коп.
на квартал	— 45 коп.

Подписка будет приниматься всеми отделениями «Союз-  
печати» и общественными распространителями печати.

Не забудьте подписаться на 1965 год!

*ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»*



**ДОРОГИЕ ЧИТАТЕЛИ!**

*Отзывы об этой книге просим присылать по адресу:*

*Москва, центр, Новая площадь,  
д. 3/4, издательство «Знание», редакция «Народный университет».*

