

МРБ
Массовая
радио
библиотека
Выпуск 1292
Основана в 1947 году

Б. П. Хромой

ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

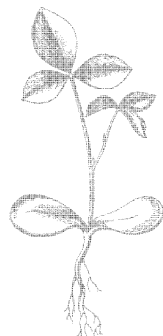
Горючая линия-Телеком



Б. П. Хромой

ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

**Москва
Горячая линия – Телеком
2020**



Scan AAW

УДК 006.9+621.3.081

ББК 30.10+31.22

Х94

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор *А. А. Гоголь*;
доктор техн. наук, профессор *Э. Л. Портнов*

Хромой Б. П.

Х94 Единицы измерения физических величин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2020. – 150 с.: ил. – (Массовая радиобиблиотека; Вып. 1292)

ISBN 978-5-9912-0792-8.

С научной, технической и исторической точек зрения рассмотрены основные существующие системы единиц измерения физических величин. С учетом того, что названия большинства из них выбраны в соответствии с фамилиями известных ученых, внесших существенный вклад в развитие мирового прогресса, большое внимание уделено историческим аспектам формирования систем единиц измерения на международном уровне.

Отдельная глава посвящена относительным единицам измерения – децибелам, поскольку логарифмический метод оценки измеряемых величин широко применяется на практике, особенно в технике связи.

Для широкого круга читателей.

ББК 30.10+31.22

Адрес издательства в Интернет www.techbook.ru

ISBN 978-5-9912-0792-8

© Б. П. Хромой, 2019, 2020

© Издательство «Горячая линия – Телеком», 2020

Глава 1

История создания метрической системы мер

Проблема измерений возникла еще в древности. Когда люди занимались скотоводством, возникла необходимость измерения расстояний. Освоение земледелия, развитие строительства, торговли привело к необходимости измерения длины предметов, площади, объемов, времени. Решение данных задач обеспечило развитие науки.

Измерение площади и объемов потребовало применения арифметики для выполнения операции перемножения, измерение площади окружности, треугольника потребовало применения геометрии. Сам термин греческого происхождения *геометрия* (*γεωμετρία*) образовался от двух слов: «гео» — Земля, «метрио» — измеряю. Недаром часто цитируется утверждение Д. И. Менделеева: «Наука начинается с тех пор, как начинают измерять». А чтобы измерять, стало необходимым применять единицы различных физических величин.

Самыми древними единицами были субъективные единицы. Так, например, моряки измеряли путь *трубками*, т. е. расстоянием, которое проходит судно за время, пока моряк выкурит трубку. В Испании похожей единицей была *сигара*. В Египте распространенной единицей длины был *стадий* — путь, проходимый мужчиной за время между первым лучом Солнца и появлением на небе всего солнечного диска, т. е. примерно за две минуты. У многих народов для определения расстояния использовалась единица длины *стрела* — дальность полета стрелы. Наши выражения «не подпускать на ружейный выстрел», позднее «на пушечный выстрел», напоминают о подобных единицах длины.

Древние римляне расстояния измеряли *шагами* или *двойными шагами* (шаг левой ногой, шаг правой). Тысяча двойных шагов составляла *милю* (лат. «милле» — тысяча). Малые предметы неудобно измерять шагами или стадиями. Для этого оказались пригодными встречающиеся у многих народов единицы, отождествляемые с названиями частей человеческого тела.

Локоть — расстояние от конца пальцев до локтевого сустава (рис. 1.1). На Руси долгое время в качестве единицы длины использовали *аршин* (примерно 71 см). Эта мера возникла при торговле с восточными странами (перс. «арш» — локоть).

Выражения «словно аршин проглотил», «мерить на свой аршин» и другие свидетельствуют о широком распространении этой едини-

цы длины. Для измерения меньших длин применяли *пядь* — расстояние между концами расставленных большого и указательного пальцев (рис. 1.2). Пядь или, как ее еще называли, *четверть* (18 см) составляла $1/4$ аршина, а $1/16$ доли аршина равнялся *вершок* (4,4 см).

В странах Западной Европы издавна применяли в качестве единиц длины *дюйм* (2,54 см) — длина сустава большого пальца (от голл. «дюйм» — большой палец, рис. 1.3), и *фут* (30 см) — средняя длина ступни человека (от англ. «фут» — ступня, рис. 1.4).

Локоть, вершок, пядь, сажень, дюйм, фут и т. д. очень удобны при измерениях, так как они всегда «под руками». Но единицы длины, соответствовавшие частям человеческого тела, обладали большим недостатком: у различных людей пальцы, ступни и т. п. имеют разную длину. Чтобы избавиться от произвола, в XIV в. субъективные единицы начинают заменять набором объективных единиц. Так, например, в 1324 г. в Англии был установлен *законный дюйм*, равный длине трех приставленных друг к другу ячменных зерен, вытянутых из средней части колоса. Фут определили как среднюю длину ступни



Рис. 1.1

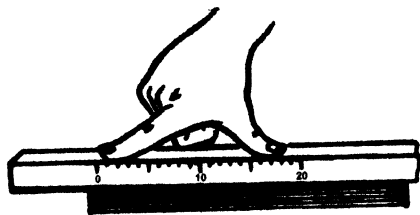


Рис. 1.2

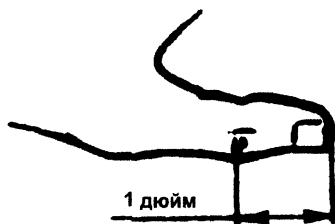


Рис. 1.3



Рис. 1.4

шестнадцати человек, выходящих из церкви, т. е. обмером случайных людей стремились получить более постоянное значение единицы — среднюю длину ступни.

Представляет интерес и проблема определения веса. Для этого использовались рычажные весы. Неизвестно, какой народ их изобрел, однако они были распространены во многих странах. Видимо, большую роль сыграла простота их использования.

При взвешивании на рычажных весах на одну чашку кладут взвешиваемое тело, на другую — гири. Гири подбирают так, чтобы установить равновесие. При этом уравниваются массы взвешиваемого предмета и гирь. Если уравновешенные весы перенести, например, на Луну, где вес предмета меньше, чем на Земле, в 6 раз, равновесие не нарушится, так как вес и предмета, и гирь на Луне уменьшился в одинаковое число раз, а масса осталась прежней. Следовательно, при взвешивании предмета на рычажных весах определяется его масса, а не вес.

Единицы массы, как и единицы длины, сначала устанавливались по природным образцам, чаще всего по массе какого-нибудь семени. Так, например, массу драгоценных камней определяли и до сих пор определяют в *каратах* (0,2 г) — это масса семени одного из видов бобов.

Позднее за единицу массы стали принимать массу воды, наполняющей сосуд определенной вместимости. Например, в Древнем Вавилоне за единицу массы принимали *талант* — массу воды, наполняющей такой сосуд, из которого вода равномерно вытекает через отверстие определенного размера в течение одного часа.

По массе зерен или воды готовили металлические гири разной массы и пользовались ими при взвешивании. Гири, служившие эталоном (образцом), хранились в храмах или правительственных учреждениях.

На Руси древнейшей единицей массы была *гривна* (409,5 г). Существует предположение, что эта единица ввезена к нам с Востока. Впоследствии она получила название *фунта*. Для определения больших масс использовался *пуд* (16,38 кг), а малых — *золотник* (12,8 г).

В России проблеме измерений уделялось большое внимание. В середине 30-х годов XVIII века самыми точными весами в России считались весы Петербургской таможни, на которых взвешивалось принимаемое золото и серебро. Было решено сделать в стране образцовые весы, скопировав их с таможенных весов, поместить их при Сенате и по ним производить поверку прочих весов. В конце 1736 г. Сенат принял решение об образовании Комиссии весов и мер во главе с главным директором Монетного правления

графом М. Г. Головкиным. В состав Комиссии входили придворный архитектор полковник П. М. Еропкин и ассессор¹ Юстиц-коллегии И. фон Гагемейстер. К выполнению работ Комиссия привлекла обер-кригскомиссара² П. Н. Крекшина, известного механика-изобретателя А. К. Нартова, а из Академии наук — профессора высшей математики Леонарда Эйлера, астронома и географа Иосифа (Жозефа) Николая Делиля, математика и физика Георга-Вольфганга Крафта, астронома Христиана-Николая Винсгейма.

Комиссия должна была создать образцовые меры — эталоны, установить отношение различных мер друг к другу и разработать проект организации поверочного дела в стране. Созданию образцовых мер должен был предшествовать либо выбор меры, которая могла бы явиться отправной, либо создание на основе каких-то данных новой единицы. Комиссия отдавала себе отчет, что, прежде чем реформировать меры в целом, необходимо найти твердые основания для определения величины той или другой единицы измерения и затем установить связь отдельных метрологических величин друг с другом. Это делало возможным восстановление тех или иных мер в случае их утраты, а также их поверку.

В начале своей деятельности Комиссия предполагала осуществить коренную реформу всей системы мер. Для этого необходимо было сажень привести в соответствие с градусными измерениями земной поверхности. Такая единица длины, как считала Комиссия, может быть восстановлена в случаях ее утраты. Меры длины должны были явиться связью между другими единицами измерения. Предполагалось также принять десятичный принцип деления единиц измерения, нашедший применение через 60 лет в метрической системе, как наиболее простой и удобный. Проект о десятичном построении мер был внесен Габерманом — шведом, состоявшим на русской службе и выполнявшим поручения Комиссии.

Однако в самом начале своей деятельности Комиссия столкнулась с непреодолимыми трудностями. Одной из них явилась необходимость установления системы мер длины, которой Комиссия придавала особое значение. Данные должна была представить Академия наук: ей вменялось связать систему мер длины с градусами земной поверхности. Академия наук эту работу не выполнила, а Комиссия самостоятельно не могла измерить градус, так как не располагала не только необходимыми денежными средствами, но и соответствующими спе-

¹ Ассессор — гражданский чин, занявший с 1722 г. место VIII класса Табели о рангах, соответствующий чину майора или капитана в армии.

² Кригскомиссар — категория должностных чиновников в русской армии, которые ведали снабжением войск.

циалистами. Не мог быть проведен и десятичный принцип деления, поскольку для этого нужно было русскую систему измерений подвергнуть существенной ломке. Осложнилось проведение десятичного построения мер и тем, что с инициатором его, шведом И. Габерманом, не была осуществлена договоренность о продолжении его службы в России, и в октябре 1737 г., т. е. еще в начале деятельности Комиссии, он «от российской службы был уволен».

Комиссии пришлось отказаться от первоначального проекта реформы мер и она стала усиленно искать образцы мер длины, наиболее удобные для принятия за основу. Такой отправной мерой послужила линейка, найденная среди вещей, принадлежавших Петру I и хранившихся в «Императорском кабинете» Кунсткамеры. На линейке был обозначен полуаршин. Ее-то Комиссия и решила взять за основу при определении величины аршина и сажени. По этой полуаршинной мере были изготовлены образцы мер длины — медный аршин и деревянная сажень. Затем эти меры длины послужили основанием для определения размеров единиц измерения сыпучих и жидких тел и единиц веса.

Таким образом, идея создания метрической системы мер и весов, возникшая впервые в России, не была реализована. Следует отметить, что неудавшаяся попытка была сделана в России в конце 30-х годов XVIII в., т. е. на 60 лет раньше введения десятичной системы во Франции.

В то время во Франции действовало большое количество единиц измерения. В стране их одновременно было около 800, но в разных местах одно и то же название имело разный смысл. Поэтому общее количество единиц было около 250 тысяч. Каждый дворянин имел право устанавливать в своих владениях свою систему измерений.

О системе мер на новых основаниях впервые заговорили еще в XVII в. Принцип установления системы мер, приемлемой для всех народов, был впервые выдвинут французскими учеными. Они полагали, что можно найти в природе такие основные единицы мер, которые послужат неизменными образцами «на все времена и для всех народов». Необходимо, чтобы новые эталоны были неизменны и их можно было бы восстановить в случае утери, чтобы единицы мер были связаны между собой и в основе их отношений друг к другу лежал десятичный принцип. Во второй половине XVII в. французский астроном Жан Пикар и датский астроном Оле Кристенсен Ремер предлагали принять за единицу длины длину маятника, отбивающего секунды. Однако вскоре было обнаружено, что длина секундного маятника (т. е. мера длины) зависит от широты места, в котором производится опыт. Поэтому в дальнейшем это предложение было несколько уточнено оговоркой о

широте. Аналогичное предложение было высказано несколько раньше польскими учеными Станиславом Пудловским и Титом Буратини.

В то же время астроном Мутон выдвинул предложение взять в качестве единицы длины величину, равную длине дуги в одну минуту земного меридиана, соответствующую длине морской мили. Мутону принадлежит и идея построения системы мер на десятичной основе.

Началом работы над метрической реформой следует считать 1790 г., когда Председатель Национального собрания Шарль Морис де Талейран-Перигор (впоследствии знаменитый дипломат и министр иностранных дел Директории, Наполеона и Людовика XVIII — Талейран), выступил в Национальном собрании с докладом о необходимости единства в области мер и представил проект метрической реформы. Талейран предлагал принять за единицу длины длину секундного маятника на широте 45° . При этом Талейран считал необходимым просить английский парламент принять участие в создании новой системы мер. В проекте Талейрана вопрос о системе мер получил международный характер. Национальное собрание 8 мая 1790 г. приняло декрет о реформе мер, утвержденный королем 22 августа. Декрет в основных чертах воспроизводил проект Талейрана и поручал Парижской академии наук выполнение подготовительных работ, необходимых для проведения реформы. Одна из комиссий Академии наук занялась вопросом о выборе естественных мер и предложила в качестве единицы длины взять одну сорокамиллионную долю четверти дуги парижского меридиана. Другая комиссия Академии рекомендовала десятичную систему деления этой естественной единицы измерения.

Доклад Академии наук был представлен Национальному собранию, которое в декрете от 26 марта 1791 г. утвердило все его положения. Итак, декрет утвердил проект метрической реформы. Проект системы мер и весов был основан на трех принципах:

- система должна соответствовать десятичной шкале;
- все ее единицы будут опираться на единицу длины;
- эталон-матрица должен быть позаимствован у природы.

Национальное собрание 8 мая поддержало новую метрическую систему, отметив, что эта система должна быть стабильной, единой и простой, ее должны принять другие страны, включая Великобританию и США.

Академия предложила использовать основные единицы измерения, у которых доли представляли результат умножения и деления на степени 10. По предложению математика Лапласа основная единица длины была названа *метром* (по-гречески «мера»). Единицы, кратные метру, носили название декаметр (10 метров), гектометр (100

метров), километр (1000 метров), а его доли — дециметр (0,1 метра), сантиметр (0,01 метра) и миллиметр (0,001 метра). Таким образом была принята десятичная система.

С учетом второго принципа все остальные единицы должны были составлять логическую систему: единицы площади, объема, емкости (объем — для твердых тел, емкости — для жидких) и веса должны быть определены из основной единицы длины — метра. Было принято считать единицей площади ар, соответствующий квадрату со стороной, равной 10 метров. За единицу объема был принят кубический метр, эквивалентный количеству древесины, содержащейся в кубе с сторонами равными 1 метру. За единицу емкости был принят литр, равный количеству воды в кубе со стороной в 1 дециметр. За единицу веса был принят 1 грамм, равный количеству воды при температуре 4 °, уместенной в кубе со стороной 1 см.

Согласно третьему принципу величина метра не должна являться антропометрической единицей, т. е. не должна зависеть от размеров человека. Для этого надо было найти природный эквивалент. Сначала метр приравнивали длине маятника, полупериод качания которого составил 1 секунду. Однако это решение не оказалось удачным. Дело в том, что длина маятника зависела от географических координат места проведения эксперимента, поскольку сила земного тяготения на разных широтах различна. Выбор параллели, общей на международном уровне, не состоялся. Франция предлагала 45-ю параллель (проходящую через Францию), США — 38-ю параллель, Великобритания — параллель, проходящую через Лондон.

В результате обсуждений Комиссия мер и весов, которой руководил Лагранж, приняла другое решение. В основу было положено предложение астронома и моряка Жана Шарля де Бурда использовать в качестве метра длину, равную десятиmillionной части расстояния от Северного полюса до экватора. Новая единица длины являлась природной и универсальной, поскольку была связана с размерами земного шара.

В 1791 г. Национальное собрание постановило, что для определения длины метра достаточно измерить расстояние вдоль меридиана между городами Дюнкерк и Барселона.

Оба города лежат на парижском меридиане и находятся на уровне моря. Измерение было поручено двум академикам — астрономам Мешену и Деламбру. Мешен должен был измерить южную часть — от Барселоны до Родеза на Пиренеях. Деламбру досталась большая часть — от Родеза до Дюнкерка. В июне 1792 г. Мешен и Деламбр приступили к работе.

Но 1792 год был бурным годом в ходе революции. На этот год вы-

падает бегство Людовика XVI из Парижа и обострение политической борьбы. Несмотря на эти события, в Академии наук продолжались работы по созданию метрической системы. Поскольку было необходимо разработать ряд эталонов, было организовано несколько подразделений. Роль секретаря и казначея исполнял известный химик Антуан де Лавуазье. Следует отметить, что Лавуазье выступал за создание новой системы мер и весов еще в 1785 году. В рамках работы комиссии Лавуазье работал над эталоном грамма, который рассматривался как вес чистой воды, содержащейся в кубе с ребром, равным сотой части метра. Характерна его оценка разрабатываемой системы: «Никогда еще ничего столь же великого и простого, последовательного во всех частях, не вышло из рук человека, как десятичная метрическая система».

Несмотря на успехи Комиссии, одобренные президентом Академии наук и представленные в Национальный Конвент, положение Академии резко ухудшилось, поскольку революционная общественность рассматривала ее как остаток старого режима. Лавуазье бросил все силы на ее защиту, однако Академия была закрыта в 1793 г., а Лавуазье, как упорный ее защитник, был казнен 8 мая 1794 г. на площади Революции.

Однако Мешен и Деламбр, приступившие к работе по измерению меридиана в июне 1792 г., продолжили свою работу. Население, не понимая смысла и цели работы астрономов, подозрительно относилось к деятельности Деламбра, который работал на территории Франции. Мешену также пришлось испытывать трудности. В марте 1793 г. Конвент, т. е. верховный правительственный орган революционной Франции, объявил войну Испании, и Мешен стал испанским пленником, поскольку он проводил свою работу на территории Испании.

Однако измерения, проводимые Мешеном и Деламбром, в то время не были простой задачей. Дело было в неровности рельефа поверхности Земли. Для измерения использовался метод триангуляции. Сущность его заключается в тригонометрическом методе измерения расстояния между двумя точками на поверхности Земли. Основная проблема измерения расстояния заключалась в неровности поверхности (в наличии гор). Решение задачи заключалось в замене измерения расстояния измерением углов. Применение метода триангуляции поясняется рис. 1.5. При измерении расстояния между городами A и B , между которыми находится гора C , измеряются два угла CBH и CAH . Эти измерения можно было выполнить с помощью существовавших в то время угломерных оптических инструментов. Высота горы (расстояние CH на рис. 1.5) может быть определена с помощью барометра, т. е. высота определяется по разности давлений атмосферы у основа-

нии горы и на ее вершине. В соответствии с правилами тригонометрии тангенс угла CBH равен высоте CH , разделенной на расстояние BH , а тангенс угла CAH равен отношению CH к AH . Отсюда расстояние AB может быть определено из формулы

$$AB = AH + BH = \frac{CH}{\operatorname{tg}(CAH)} + \frac{CH}{\operatorname{tg}(CBH)}.$$

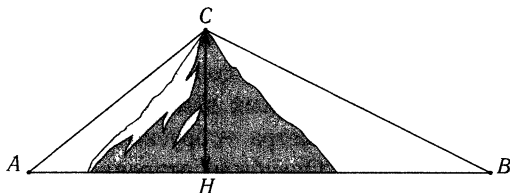


Рис. 1.5

Два астронома отправились в путь в 1792 году несмотря на то, что в стране бурлил революционный хаос: Делаббр — на север до Дюнкерка, а Мешен — к югу до Барселоны. Работа была весьма объемной. Дело том, что для точного определения размера угла применялись десятикратные измерения и усреднение их результатов. Для определения высоты CH было необходимо подняться с барометром на самую высокую точку рельефа.

Все трудности измерения четвертой части земного меридиана, проведенного во время утомительной экспедиции, подробно описал в своей книге французский математик Дени Гедж (1940–2010). Считалось, что для проведения измерений расстояния от Дюнкерка до Барселоны понадобится 10 лет. Работа по измерениям усложнялась политической ситуацией: Франция вела войну с половиной Европы, в частности с Нидерландами и Испанией. Делаббр закончил свои работы по измерения и трангуляции только 2 августа 1797 года. Однако его коллега Мешен был тяжело ранен в Испании, что задержало окончание его работы. Кроме того, из-за военного конфликта и ранения он вынужден был задержаться в Барселоне. Политическая обстановка также повлияла на качество проведенных им измерений. Из-за войны он не смог в качестве ориентира использовать барселонский замок Мунжуик, расположенный в зоне боевых действий, а ориентировался на другую точку, считая, что это не скажется на погрешности измерений. Однако такое отклонение вызвало погрешность, равную трем секундам дуги. Эта ошибка сказалась на результате вычислений и, следовательно, на длине метра. На проведение работ было затрачено шесть лет.

В 1798 г. после почти семи лет приключений Делаббр и Мешен представили результаты своих измерений в Институт Франции, ко-

торый определил точную длину метра. При этом Мешен умолчал об отклонении в измерении, но совесть не позволила ему оставить все как есть, и он решил провести часть своих измерений вторично. При повторной попытке Мешен погиб. Метр, определенный Делаμβром и Мешеном, оказался на 0,2 миллиметра короче современного. В повседневной практике того времени это не имело никакого значения, но эта погрешность является важной для современных технологий.

Семилетние измерительные работы в то время окончательно определили размеры метра. Однако до окончания работ Делаμβра и Мешена на основе предварительных данных в 1793 г. во Франции были изготовлены прототипы метра — бруски из латуни, отмерявшие один метр и весившие 1 кг. Они были отправлены в США. Что касается Великобритании, то она проявила открытую враждебность по отношению к проводимой реформе.

Через два года в 1795 г. во Франции разгорелся революционный террор. Однако несмотря на это по инициативе Карно было создано Бюро долгот. Это бюро проявило инициативу по продолжению работ по реформе мер и весов. 7 апреля 1795 г. во Франции метрическая система была принята на законодательном уровне. При этом было принято определение метра как доли земного меридиана и установлена номенклатура единиц. Также была введена новая денежная единица — франк, который имел эквивалент 5 граммов серебра. Тогда же состоялось и введение шкалы Цельсия, т.е. было решено использовать метрическую систему и для измерения температуры. По определению, один градус Цельсия представляет собой сотую долю температуры, необходимую для прохождения от точки замерзания воды до точки кипения.

В 1799 году по предложению Лапласа был проведен первый в истории международный конгресс, посвященный новой системе мер и весов. От имени Директории Талейран пригласил на участие в конгрессе все союзные и нейтральные державы. В конгрессе приняли участие девять стран, включая Нидерланды и Испанию. Они отправили в Париж нескольких своих ученых, которые должны были получить информацию о работах, выполненных во Франции и сообщить о них в своих странах. Францию представляли на конгрессе Лаплас, Лежандр, Делаμβр, Мешен. Они представили гостям эталоны метра и килограмма, отлитые из платины. Эти эталоны и сегодня хранятся в Парижской обсерватории, хотя метр в настоящее время определяется как путь, пройденный светом в вакууме в течение $1/299\,792\,458$ секунды.

Однако внедрение новых единиц во Франции столкнулось с трудностями: народ не понимал значения греческих и латинских префик-

сов «кило-» и «санти-». Была подключена пропаганда. В 1801 году был принят закон, запрещающий использование других систем измерения помимо метрической, но действовал этот закон только на бумаге. В 1812 году Франция вернулась к прежним традиционным единицам измерений. Метрическая система высмеивалась в литературе. Люди не понимали, зачем для того чтобы выпить стакан вина или отрезать кусок материи, необходимо измерять длину меридиана.

Отрицательное отношение к разработанной метрической системе имело место не только во Франции. В России в период с 1823 по 1826 год Н. И. Лобачевским был подготовлен к изданию учебник по геометрии. Учебник был осужден рецензентом (академиком Фуссом) за использование метрической системы мер и чрезмерный отход от Евклидовского канона. Учебник был издан только после смерти автора, которая произошла в 1845 году. Следует отметить, что Н. И. Лобачевский занимал видное положение в науке: был ректором университета в городе Казань и его работы имели успех за рубежом. Так, например, Гаусс рекомендовал избрать Лобачевского иностранным членом-корреспондентом Геттингенского королевского научного общества как «одного из превосходнейших математиков русского государства». Гаусс также начал изучать русский язык, чтобы ознакомиться с деталями открытий казанского геометра. Избрание Лобачевского состоялось в 1842 году и стало единственным прижизненным признанием научных заслуг Лобачевского.

Когда во второй половине 1860-х годов сочинения Лобачевского были уже повсеместно оценены по достоинству и переведены на все основные европейские языки, Казанский университет запросил 600 руб. на издание «Полного собрания сочинений по геометрии» Лобачевского. Осуществить этот проект удалось только спустя 16 лет (в 1883 г.). Таким образом, в России значительное число ученых не поняли научных заслуг Лобачевского и осудили его за использование метрической системы.

Однако, хотя метрическая система не была принята во Франции, завоевания Наполеона позволили ее распространить за пределами страны. В Нидерландах она была принята 1820 году, а в Бельгии — в 1830 году. Во Франции метрическая система была принята только в 1840 году, а Германии — в 1868 году. Что касается Великобритании и США, то они сохранили прежние единицы измерений. Можно считать, что гармонизация мер и весов явилась одним из важных достижений Французской революции. Метр стал даром французских ученых всем людям и на все времена. Признание метрической системы на международном уровне состоялось только в 1875 г.

С 1 марта по 20 мая 1875 года в Париже проходила диплома-

тическая конференция (фр. *Conférence diplomatique du mètre*) с участием полномочных представителей двадцати государств, завершившаяся подписанием Метрической конвенции в Зале Часов (фр. *Salon de l'Horloge*) здания Министерства иностранных дел Франции на набережной Кэ д'Орсе (фр. *Quai d'Orsay*). Конвенция была подписана полномочными представителями 17 стран от имени глав соответствующих государств. Со стороны России Конвенцию подписал советник посольства Григорий Окунев от имени императора Александра II.

Метрическая конвенция явилась первым международным соглашением по научной деятельности и создала условия для расширения и укрепления сотрудничества в деле унификации единиц измерений. Эта конвенция, а вскоре и создание Международного бюро мер и весов явились важными вехами на пути научно-технического прогресса.

После Первой мировой войны стандартизация стала все больше восприниматься как объективная экономическая необходимость. Россия, хотя и явилась одной из 17 стран мира, подписавших Метрическую конвенцию, держалась за старую русскую систему мер.

Метрическая система мер была допущена к применению в России (в необязательном порядке) законом от 4 июня 1899 г., проект которого был разработан Д. И. Менделеевым, и введена в качестве обязательной декретом Временного правительства от 30 апреля 1917 г.

1 сентября 1918 года Совет Народных Комиссаров РСФСР принял декрет «О введении международной метрической десятичной системы мер и весов». В декрете, в частности, было определено «принять за основу единицы длины метр, а за основу единицы веса (массы) килограмм. За образцы основных единиц метрической системы принять копию международного метра, носящую знак № 28, и копию международного килограмма, носящую знак № 12».

С 1 января 1919 всем учреждениям РСФСР было предписано ввести метрическую систему. Если же в силу технических трудностей применение новой системы было невозможно, разрешалось использовать старую систему с условием, что «окончательный переход к метрической системе должен быть закончен к 1 января 1922 г.» Народному комиссариату по просвещению предписывалось принять меры по ознакомлению учащихся школ с метрической системой, а также осуществлять популяризацию новой системы среди населения. С 1 января 1922 года предполагалось прекратить производство гирь русской системы, а с января 1923 года изъять их из продажи. Таким образом, к 1 января 1924 года предполагалось полностью завершить переход на метрическую систему измерений.

Для оперативного решения всех вопросов, связанных с введением и применением метрической системы, предписывалось создание

особой Межведомственной метрической комиссии, в которую входили представители Высшего совета народного хозяйства и различных комиссариатов (финансов, путей сообщения, по военным делам, земледелию, просвещению, продовольствию, почт и телеграфов). Однако комиссия, подчиненная Наркомату торговли и промышленности, не продемонстрировала свою компетентность в вопросах проведения реформы, поэтому 19 октября 1920 года она была передана в Научно-технический отдел ВСНХ.

Повсеместное введение метрической системы затрудняло тяжелое хозяйственное положение страны, вызванное гражданской войной. Реформа же предполагала необходимость значительных денежных и материальных затрат. Лишь с окончанием гражданской войны появилась реальная возможность для перемен.

К началу 1922 года стало очевидно, что Межведомственная метрическая комиссия не способна справиться со всеми поставленными задачами. В апреле 1922 года была создана Государственная контора по заготовке и продаже метрических мер и весов («Госметр»), занимающаяся вопросами изготовления и снабжения страны метрическими приборами.

Таким образом, в 1922 году обязанности всех метрологических учреждений строго разграничиваются. Руководящим органом по введению метрической системы становится Межведомственная метрическая комиссия, «Госмер» занимается производственной деятельностью, а научную поддержку и поверку мер и приборов осуществляет Главная палата мер и весов.

29 мая 1922 года декретом «Об отдалении срока введения метрической системы» был установлен новый срок — 1 января 1927 года. В этот период действительно были успешно осуществлены основные мероприятия. В повседневной практике было принято пользоваться как старыми, так и новыми мерами, обозначая их параллельно. Распоряжением от 16 апреля 1927 года такое двойное обозначение запрещалось, и все меры предписывалось указывать исключительно в соответствии с метрической системой.

Логическим продолжением этого процесса стало создание в 1953 году Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете министров СССР.

В 1946 году в Лондоне была основана Международная организация по стандартизации ИСО (ISO), в состав которой изначально вошли 33 страны. В настоящее время ISO — одна из самых крупных международных технических организаций. На сегодняшний день в ее состав входит 165 стран со своими национальными организациями по стандартизации. Россию представляет Федеральное агентство по

техническому регулированию и метрологии в качестве члена ИСО.

К настоящему времени метрическая система официально принята во всех государствах мира, кроме США, Либерии и Мьянмы (Бирмы). Последней страной из уже завершивших переход к метрической системе стала Ирландия (2005 г.). В Великобритании и Сент-Люсии процесс перехода к СИ до сих пор не закончен. В Антигуа и Гайане фактически этот переход далек от завершения. Китай, завершивший этот переход, тем не менее использует для метрических единиц древнекитайские названия. В США для использования в науке и изготовления научных приборов принята система СИ, для всех остальных областей — американский вариант английской системы единиц.

Несмотря на широкое распространение метрической системы в мире, в некоторых отраслях дело обстоит совершенно по-иному. Так, исторически сложилось, что в авиации (гражданской) и в морском деле применяется устаревшая система мер на основе футов и миль. В авиации метрическая система в чистом виде используется только в Китае, что иногда создает некоторое недопонимание между диспетчерами и пилотами.

17 ноября 2011 года в гражданской авиации Российской Федерации состоялся частичный переход к системе мер на основе футов. Таким образом, гражданская авиация России приближается к стандартам гражданской авиации стран Европы. Но в космической области, включая США (NASA), полностью произошел переход на метрическую систему.

В 1990-х годах широкое распространение компьютерной и бытовой техники из Азии, в которых отсутствовали инструкции и надписи на русском языке и других языках бывших соцстран, но имелись на английском, привело к оттеснению метрической системы в ряде направлений техники. Так, размеры компакт-дисков, дискет, жестких дисков, диагонали мониторов и телевизоров, матриц цифровых фотоаппаратов в России обычно указываются в дюймах, несмотря на то что оригинальный дизайн обычно выполнен в метрической системе. Например, диаметр CD и DVD — 120 мм. Самый популярный формат любительских фотоснимков 4R, известный в США как 4 × 6 дюймов, а в странах с метрической системой как 10 × 15 см, привязан к миллиметру и имеет размер 102 × 152 мм вместо 101,6 × 152,4 мм.

Интересен анализ причин использования в США старинных единиц измерений. В США принят целый ряд актов, утверждающих метрическую систему в качестве официальной системы мер и весов. Но все принятые акты носят для частного бизнеса и обычных жителей страны рекомендательный (а не обязательный) характер. А это значит, что у каждого американца есть право измерять размер привыч-

ными дюймами и взвешивать в знакомых с детства фунтах. И этим правом пользуются не только люди, но и крупные корпорации.

Вместо международной системы СИ в Соединенных Штатах применяется U.S. Customary System (Традиционная Система США). В нее входят более трехсот единиц измерения различных физических величин. Сложность состоит в том, что многие из этих единиц измерения называются одинаково, но при этом имеют разные размеры. В качестве примера можно привести единицу «тонна», которую мы приравниваем к тысяче килограмм. В США существует как минимум девять определений понятия «тонна»: короткая тонна (short ton), смещенная тонна (displacement ton), замороженная тонна (refrigeration ton), ядерная тонна (nuclear ton), грузовая (фрахтовая) тонна (freight ton), реестровая тонна (register ton), метрическая тонна (metric ton), ювелирная тонна (assay ton), топливная тонна или тонна в угольном эквиваленте (ton of coal equivalent).

И несмотря на все эти очевидные сложности, ни в бизнесе, ни в повседневной жизни США не используется простая, понятная и однозначная метрическая система. Причины тому кроются, как это часто бывает, в истории этой страны.

В 1865 году в США завершилась Гражданская война. Американцы обнаружили, что большинство стран Европы перешли на десятичную метрическую систему. И этот очевидный факт в Соединенных Штатах не могли больше игнорировать. В 1866 году Конгресс страны принял акт, согласно которому метрическая система становилась официальной для использования во всех контрактах, сделках и судебных процессах. Когда США получили независимость, в стране предпринимались попытки упорядочить систему измерения величин. Но проблема оказалась связанной с финансами. Томас Джефферсон, занимавший при Джордже Вашингтоне пост Госсекретаря США, одобритительно относился к десятичной системе. Но оказалось, что определить метрические единицы длины будет невозможно без отправки во Францию делегации. А это было делом дорогостоящим.

Девятью годами позже Франция собрала представителей ведущих стран мира, чтобы обсудить детали новой международной версии метрической системы. США получили приглашение и направили свою делегацию. Представители этих стран подписали международную конвенцию, основав Международное бюро мер и весов и Международный комитет мер и весов, в задачи которых входили рассмотрение и принятие изменений. Соглашение предусматривало создание во французском городе Серве близ Парижа специального зала, где следовало разместить эталоны метрических стандартов, в частности эталон метра. Это позволяло избежать сложностей в понимании раз-

личными народами того, что именно подразумевается под той или иной единицей измерения.

В 1890 году Соединенные Штаты получили копии международного эталона метра и международного эталона килограмма. Метрические единицы принимались в качестве фундаментального стандарта длины и массы в США. Ярд был определен как 3600/3937 метра, а фунт определялся как 0,4535924277 килограмма.

В 1959 году англоязычные страны внесли некоторые уточнения: 1 ярд приравнялся к 0,9144 метра, а 1 фунт к 0,4535923. То есть формально Соединенные Штаты уже 145 лет как приняли метрическую систему в качестве стандарта мер и весов и уже около 120 лет в этой стране следовало бы мерить все в метрах и килограммах. Но, как показывает практика, принятие решения еще не означает его воплощения в реальную жизнь.

Осознавая эти сложности, в 1988 году Конгресс внес изменения в Metric Conversion Act, согласно которым метрическая система стала считаться «предпочтительной системой мер и весов США для нужд торговли и коммерции». По состоянию на конец 1992 года от федеральных агентств требовалось использовать метрические единицы при измерении величин, имеющих отношение к закупкам, грантам и другим вопросам, имеющим отношение к бизнес-активности. Но эти предписания касались только государственных структур. Частный бизнес оставался волен пользоваться привычной системой измерения величин. Предпринимались попытки заинтересовать метрической системой малый бизнес, но большого прогресса отмечено не было.

На сегодня «метрифицировано» лишь около 30 % произведенной в США продукции. Фармацевтическую индустрию Соединенных Штатов называют «строго метрической», поскольку все характеристики фармацевтической продукции страны указываются исключительно в метрических единицах. На напитках присутствуют обозначения и в метрической и в традиционной для США системах величин. Эту индустрию считают «мягко метрической». Метрическая система используется в США также производителями пленки, инструментов и велосипедов. В остальном в США предпочитают измерять в древних дюймах и фунтах. И это касается даже такой молодой индустрии, как высокие технологии.

Что же мешает весьма развитой индустриально стране перейти на общепринятую на нашей планете систему мер и весов? Этому есть ряд причин. Одной из причин являются те затраты, которые пришлось бы понести экономике страны в случае перехода на систему СИ. Ведь пришлось бы переработать технические чертежи и инструкции к сложнейшему оборудованию. Это потребовало бы немалого тру-

да высокооплачиваемых специалистов, а следовательно, денег. Например, инженеры NASA сообщили, что перевод в единицы метрической системы чертежей космических шаттлов, программного обеспечения и документации обошлось бы в 370 миллионов долларов США, то есть примерно в половину стоимости обычного запуска космического шаттла.

Однако трудность перехода к метрической системе в США не следует объяснять только большой затратой финансов. Психологические факторы играют свою, и далеко не последнюю, роль в сдерживании процесса перехода страны на международную систему мер и весов. Упорный консерватизм американцев заставляет их сопротивляться возможному отказу от привычных с детства дюймов и фунтов. А особого смысла для себя лично в метрической системе средний американец просто не видит.

Глава 2

История измерения времени

2.1. Изобретение морского хронометра

Как отмечалось в главе 1, в древности возникла проблема измерений. Была необходимость измерения длины, площади, объемов, времени. Наиболее сложной задачей оказалось измерение времени. Ее решение оказало большое влияние на развитие науки.

Идея времени воспринимается человеком намного сложнее, чем идея пространства. Универсальные свойства времени — это длительность, неповторяемость, необратимость. Необычные свойства времени дали толчок развитию целого раздела философии. Проблема времени обсуждалась в трудах Аристотеля (384–322 до н. э.).

Понятие о течении времени подсказала древнему человеку периодическая смена дня и ночи, времен года. В связи с этим человек вначале научился производить оценку весьма длительных временных интервалов. Появилось летоисчисление (или календарь) — это система исчисления больших промежутков времени.

Первые часы — приборы для измерения текущего времени в единицах, меньших, чем одни сутки, были солнечными, основанными на суточном движении Солнца. Точная дата возникновения солнечных часов, которые в своем первоначальном виде имели форму обелиска, неизвестна.

В древности солнечные часы имели большое распространение. Высокие и стройные обелиски Древнего Египта были указателями солнечных часов. В Индии у паломников были посохи с вделанными в них миниатюрными солнечными часами. Многие ученые и изобретатели древнего мира занимались улучшением солнечных часов.

Солнечные часы состоят из предмета, дающего резкую и длинную тень, и циферблата, на котором нанесены деления, соответствующие часам и долям часа. Получение отсчета времени с помощью солнечных часов основано на том, что в течение дня тень, отбрасываемая предметами, освещенными Солнцем, все время изменяется. Для того чтобы сделать их пригодными для любого дня и месяца, циферблат солнечных часов делался в виде многих линий с делениями, из которых каждая предназначалась для определенного месяца.

Повышение точности путем создания сложных циферблатов, естественно, затрудняло и изготовление солнечных часов, и пользование ими. Решительный шаг в улучшении солнечных часов был

сделан тогда, когда астрономы поняли, какие выгоды представляет расположение указателя солнечных часов параллельно земной оси.

Когда указатель солнечных часов расположен параллельно земной оси, то его конец оказывается обращенным к полюсу мира, т. е. той точке небесного свода, которая при вращении Земли кажется неподвижной. Если при этом доска с циферблатом расположена перпендикулярно к указателю, то конец тени описывает на ней дугу окружности, а скорость движения тени оказывается постоянной. Вследствие равномерного движения тени часовые деления получают равными. Такие часы называются экваториальными.

В экваториальных солнечных часах (рис. 2.1) доска с циферблатом устанавливается наклонно к горизонту под углом $90^\circ - \varphi$, где φ — географическая широта данной местности. Например, при изготовлении экваториальных солнечных часов для Москвы, расположенной на географической широте $55^\circ 48'$, угол наклона доски к горизонту нужно выбрать равным $90^\circ - 55^\circ 48' = 34^\circ 12'$.

Достоинством экваториальных солнечных часов является то, что их циферблат годен для всех дней года, причем часовые деления расположены на равных расстояниях друг от друга. Недостатком этих часов является то, что в течение части года тень от указателя падает на их циферблат снизу, что затрудняет наблюдения.

Кроме экваториальных, применялись горизонтальные солнечные часы (рис. 2.2). Они состояли из горизонтально расположенной доски с нанесенным на нее циферблатом и указателя в виде треугольника. Острый угол этого треугольника делался равным географической широте данной местности, так что наклонная сторона треугольника получается параллельной земной оси. Треугольник-указатель устанавливается так, чтобы его плоскость была перпендикулярна к циферблату, а линия продолжения основания треугольника шла по направлению «север — юг».

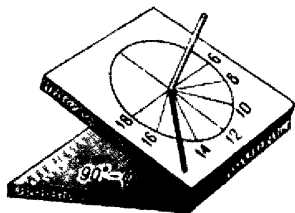


Рис. 2.1

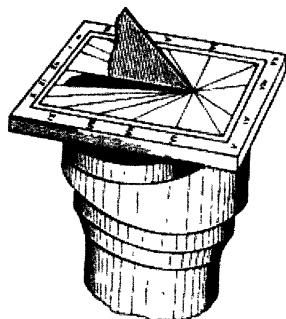


Рис. 2.2

В горизонтальных солнечных часах в течение дня скорость перемещения тени меняется. Поэтому на их циферблате часовые отметки расположены под разными, неравными углами. В горизонтальных солнечных часах, так же как и в экваториальных, циферблат годен для всех дней года, причем в течение всего года тень от указателя падает на их циферблат сверху.

Китайский император Кошу-Кинг возвел в 1278 г. указатель солнечных часов в 40 ступней высотой. Значительно превзошел его внук Тимура — знаменитый самаркандский астроном Улугбек, который, стремясь увеличить точность отсчета, в 1430 г. в Самарканде воздвиг солнечные часы высотой 175 ступней (около 50 м).

Внимание, уделяемое солнечным часам королями и вельможами, нередко заставляло строителей часов стремиться не только к тому, чтобы сделать их более точными, но и эффектными или забавными.

Мастер Руссо сделал оригинальный указатель времени: с помощью соответствующим образом установленного и направленного зажигательного стекла он добился того, что солнечный луч управлял пушкой, заставляя ее стрелять в определенное время.

Солнечные часы продолжали строить вплоть до XVI и даже XVII века. Несмотря на то, что ученые научились делать очень большие и совершенные солнечные часы, пользование ими было далеко не всегда удобным: они не действовали ночью и в пасмурную погоду, их трудно было брать с собой в путешествие или сражение. В этом отношении значительно более удобными были другие виды часов.

Клепсидра — древнейшие водяные часы. В дне сосуда с водой просверлена дырочка, куда вставлена трубочка маленького диаметра. Вода по ней медленно стекает и падает в другой сосуд, на стенки которого нанесены деления. Роль часовой стрелки выполняет уровень воды. Чем выше он поднимается, тем больше «наtekло» времени. Ктесибий (ок. 2–1 вв. до н. э.) — древнегреческий механик из Александрии изобрел водяные поплавковые часы.

Были изобретены песочные часы — простейший прибор для отсчета промежутков времени, состоящий из двух сосудов, соединенных узкой горловиной, один из которых частично заполнен песком. Время, за которое песок через горловину пересыпается в другой сосуд, может составлять от нескольких секунд до нескольких часов. Песочные часы могли работать в любое время суток и в любую погоду. Они обеспечивали погрешность измерения времени уже ± 15 –20 мин.

Решение задачи измерения времени оказало колоссальное влияние на развитие фундаментальных и технических наук и прежде всего астрономии. Известны 13 древних обсерваторий. Исследователей удивляет необычайно высокий уровень астрономических познаний в

глубокой древности, являющихся результатами тончайших и длительных астрономических наблюдений.

В дальнейшем развитие практической астрономии осуществлялось весьма интенсивно. Позднее были созданы обсерватории в Багдаде, Каире, Мараге (Наср-Эддин), Самарканде (Улуг-бег), в Севилье и пр. С начала XVI века в Европе начали возводиться обсерватории в Нюрнберге, в Касселе (1561). В XVI веке знаменитый астроном Тихо Браге все свое состояние употребил на постройку и инструменты для своей обсерватории Ураниборг на острове Вен, в проливе Эресунн. Первая правительственная обсерватория в Европе — т. наз. Круглая башня — была построена в 1637–1656 годах в Копенгагене.

Парижская обсерватория начала действовать в 1671 году, Гринвичская обсерватория открыта вслед за парижской в 1675 году. Далее были открыты обсерватории в городах Лейдене (1690), Берлине (1711), Болонье (1714), Утрехте (1726), Пизе (1730), Упсале (1739), Стокгольме (1746), Лунде (1753), Милане (1765), Оксфорде (1772), Эдинбурге (1776), Дублине (1783). К концу XVIII века в Европе действовало более 100 обсерваторий, а к началу XX века число их достигло 380.

В России первая астрономическая обсерватория была оборудована в 1692 г. (Холмогоры, близ Архангельска), вторая обсерватория появилась на Руси в 1701 г. в Москве при Навигацкой школе. Первая официальная обсерватория в России основана Петром I одновременно с Академией наук в 1725 г.

21 июня 1835 г. осуществилась закладка Пулковской обсерватории, а торжественное освящение оконченных зданий — 7 августа 1839 г. Строительство обсерватории обошлось в 2 100 500 руб.

Все перечисленные сведения, касающиеся древних и современных обсерваторий, свидетельствуют о чрезвычайно высоком интересе, проявляемом к астрономическим исследованиям во все исторические времена. Возникает вопрос: а почему? Астрономические исследования имели всегда большую актуальность для решения двух задач — картографии и навигации.

Задача навигации с древних времен была связана с мореплаванием. Для рационального и безопасного мореплавания необходимо иметь точную карту и возможность каким-либо путем измерять координаты нахождения судна, т. е. знать широту и долготу. Измерение широты не вызывало трудностей, поскольку для этого достаточно было с помощью угломерного прибора измерить максимальный угол положения Солнца.

Принцип определения долготы был известен еще Гиппарху: разность долгот двух пунктов соответствует разнице местных времен при

одновременном наблюдении момента какого-либо одного события в этих пунктах. Однако для измерения долготы недостаточно определения времени, когда имеет место максимальный угол положения Солнца. Этот угол меняется в течение года. Поэтому необходимо было иметь «альманах», отражающий зависимость угла положения Солнца от даты, а этот альманах составлялся сотрудниками обсерваторий на основе сложных измерений.

Таким образом, основные проблемы морской навигации были связаны с измерением времени. Проблема была актуальной, а главное, она имела экономическую основу, так как гибель судов приводила к большим потерям. Поэтому правители ряда стран предлагали солидные премии за решение этой проблемы.

В 1567 г. испанский король Филипп II назначил вознаграждение тому, кто сможет отыскать простой способ определения долготы в море. В 1598 г. Филипп III повторил обещание о вознаграждении. Солидные суммы предлагали Нидерланды, Португалия и Венеция.

Эта задача заинтересовала Гюйгенса, и он в 1655 г. занялся конструированием часов. Больше всего, как это видно из писем ученого, его интересовали именно морские часы, которые были бы способны хранить время в течение многих месяцев в любых климатических условиях и при любых движениях корабля.

Первым идею маятниковых часов высказал Галилей. Однако довести идею до реальной конструкции удалось лишь Гюйгенсу в 1658 г. Пригодились его работы по теории маятника: в изобретенных им часах пружина создавала силу, приводящую в движение систему колес часов, а маятник обеспечивал равномерность их хода. Работая над часами, Гюйгенс добивался точной изохронности колебаний маятника и создания опорно-анкерного спуска, благодаря которому маятник получает периодические толчки, которые не дают ему остановиться из-за трения и сопротивления воздуха. Под изохронностью понимают независимость периода колебаний от амплитуды колебаний маятника. Это имело важное значение, поскольку нестабильность амплитуды, возникающая при постепенном уменьшении действия заводной пружины, вызывала временные отклонения.

В 1662–1677 гг. «хранители времени» Гюйгенса прошли испытания на море. Часы на судах прикрепляли к столбу и закрывали специальным футляром. Позже, чтобы уменьшить влияние качки, Гюйгенс предложил подвешивать часы в кардановые кольца.

В 1668 г. часы Гюйгенса, выдержав два шторма и морское сражение, позволили определить разность долгот между Тулоном и Критом с ошибкой в 100 километров. Это был несомненный прогресс для того уровня навигации. Однако положительные результаты часто сменяли

неудачи. Гюйгенс, тщательно проанализировав результаты всех испытаний, пришел к выводу, что маятник, несмотря на все принятые меры, в условиях корабля «работает» беспорядочно и недостаточно надежен. Даже небольшое изменение длины маятника, например, из-за повышения или понижения температуры, значительно влияло на точность хода часов.

Поэтому в 1674 г. он отказался от него и предложил в качестве регулятора хода использовать балансир — маховое колесо, совершающее с помощью пружины колебательные движения около положения равновесия. Это был значительный шаг вперед. Но прошло еще целых 100 лет, прежде чем удалось изготовить морской хронометр, удовлетворяющий требованиям мореплавателей.

Однако Гюйгенсу мы обязаны не только приспособлением маятника к часам, но и развитием основ его теории, в частности определением формулы его движения. Опубликованная в 1673 г. книга ученого «Маятниковые часы» принадлежит к числу самых замечательных трудов по механике, написанных в XVII в. Не случайно ее ставили в один ряд со знаменитыми «Началами» Ньютона. Этот труд Гюйгенса сыграл большую роль в развитии радиотехники, которая построена на теории колебаний.

Хотя маятниковые часы не позволяли в полной мере решить проблему навигации на море, они получили широкое распространение в качестве башенных часов во многих странах, в том числе и в России, а также в виде домашних часов. Башенные часы Биг-Бен в Лондоне обеспечивали измерение времени с погрешностью, не превышающей 1 секунды за сутки.

Несмотря на успехи в деле совершенствования маятниковых часов проблема навигации оставалась нерешенной. Конец XVII — начало XVIII в. ознаменовались рядом крупных морских катастроф. В 1691 г. у берегов Англии село на мель несколько военных кораблей, принявших в районе Плимута мыс Доуман за мыс Берри-хид. В 1694 г. из-за ошибки в расчете своего местоположения в Гибралтарском проливе села на мель эскадра Уилера. Наиболее трагичной была гибель ряда кораблей английской эскадры адмирала Клаудисли Шовела, унесшая около 2000 человеческих жизней, в том числе и самого адмирала.

Из-за гибели большого числа людей вопрос определения долготы стал предметом частых дебатов в английском парламенте, по его решению была создана специальная комиссия, в которую вошли такие выдающиеся ученые, как И. Ньютон, Э. Галлей, Д. Флемстид. 17 июня 1714 г. представленный комиссией билль был одобрен парламентом, а 1 августа 1714 г. подписан королевой Англии Анной. Согласно это-

му закону, автору или авторам, предложившим проект, позволяющий определять долготу с точностью не менее 1° или 60 морских миль, была обещана крупная премия в 10 тысяч фунтов стерлингов; 15 тысяч фунтов стерлингов — если будет обеспечена точность не хуже 40 миль; и 20 тысяч — 30 миль (20 тысяч фунтов стерлингов XVII в. эквивалентно почти полумиллиону нынешних). При этом в законе о долготе была сделана существенная оговорка, что предложенный метод должен быть обязательно «проверен и оценен с точки зрения его практичности и полезности на море».

Примеру Англии последовала Франция. В 1716 г. регентом Филиппом, герцогом Орлеанским, за определение долготы был учрежден приз, присуждаемый Французской Академией наук. Принятый закон о долготе и назначенные призы явились хорошим стимулом для активизации работ по обеспечению безопасности плавания. Однако ни одно из поступивших в Совет предложений до 1737 г. полностью одобрено не было.

Премия в соответствии с законом о долготе в общей сумме 22 500 фунтов стерлингов была вручена лишь в середине 70-х гг. XVIII в. восьмидесятилетнему механику Джону Гаррисону, или, как его еще прозвали, Джону Долготе, за создание высокоточных часов-хронометров (от греч. «хронос» — время и «метрос» — измерение), которые позволили наконец решить эту проблему веков.

Джон Гаррисон, сын сельского плотника из Уэкфильда в Йоркшире, в молодости увлекался часами и добился в этом неплохих результатов: конструкции созданных им часов отличались точным и стабильным ходом. В 1730 г., находясь в Лондоне, он впервые узнал о назначенном парламентом призе и о том, что один из путей решения долготной проблемы лежит в области создания точного «хранителя времени». Задача показалась ему по силам, и он приступил к работе. Гаррисон начал с решения тех вопросов, которые вставали еще перед Гюйгенсом: надо было снизить до минимума зависимость хода часов от изменения температуры, влажности, качки и хода корабля.

Гаррисон закончил работу над первым хронометром в 1735 г. и представил его в Совет по долготе. Конструкция его была весьма необычна. Вместо маятника Гаррисон применил балансирующее колесо, конструкция которого показана на рис. 2.3. Балансирующее колесо приводится в действие зубчатым колесом, которое вращается под действием заводной пружины. Через качающийся спусковой механизм энергия передается на балансирующее колесо, которое поворачивается, преодолевая сопротивления пружины. Далее за счет перемещения зубчатого колеса качающееся устройство снимает усилие с балансного колеса и под действием пружины оно возвращается в исходное

положение. Таким образом, балансное колесо вращается периодически по часовой или против часовой стрелки.

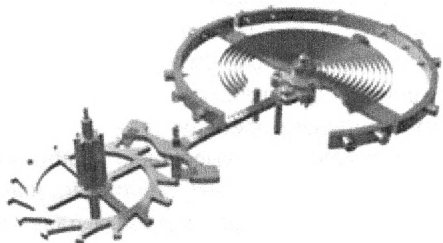


Рис. 2.3

Гаррисон заменил маятник двумя большими балансирами, которые качались во встречных направлениях, вследствие чего влияние движения корабля на один балансир компенсировалось другим. Сами балансиры были составными, выполнены из различных материалов для температурной компенсации. Для указания времени были предусмотрены четыре циферблата — для секунд, минут, часов и суток. Хронометр был весьма громоздок и весил более 30 кг, хотя многие детали его были изготовлены из дерева.

После испытания хронометра, которые показали неплохие результаты, Гаррисон продолжил работу по его совершенствованию. В 1739 г. был изготовлен второй образец хронометра. Его работа не удовлетворила Гаррисона, но натолкнула на ряд новых идей, и он приступил к изготовлению третьего варианта хронометра, на что ушло 19 лет. В 1761 г. начались испытания, которые показали высокие качества хронометра. Пока шла подготовка к испытаниям, Гаррисон подготовил четвертый вариант хронометра. Испытания показали хорошие результаты. За 81 день плавания хронометр накопил ошибку всего 5 секунд. На пути в Англию ошибка в координатах по прибытии в Портсмут составила всего 16 миль.

Однако окончательное решение по принятию хронометра и выплате вознаграждения в соответствии с биллем от 1714 г. было принято лишь после того, как Гаррисон открыл секреты его изготовления и часовой мастер Леркум Кендэлл сделал с него копию. Эту модель Кендэлл и три других, изготовленных Дж. Арнольдом, по рекомендации Совета взял в свое второе плавание капитан Дж. Кук. По свидетельству Дж. Кука, за время трехлетнего плавания хронометр, изготовленный Кендэллом, зарекомендовал себя великолепно.

Часы, сделанные Гаррисоном, являлись опытными образцами и поэтому стоили очень дорого. Эти часы служили образцом для молодых мастеров, конструирующих хронометры, достаточно дешевые,

чтобы быть по средствам каждому штурману. В те далекие дни мастер Джон Арнольд пользовался большим уважением. Вместе со своим сыном Арнольд изготавливал хронометры такого качества, что они в течение 50 лет широко применялись на кораблях всего мира. Проблема долготы, таким образом, была наконец решена.

Достоинства хронометров, или, как их еще называли, «долготных часов», были быстро оценены мореплавателями, но внедрялись они на кораблях медленно, так как лишь высококвалифицированные механики могли их изготовить, да и то в небольших количествах. И стоили они очень дорого. Тем не менее, все крупные плавания второй половины XVIII в. совершались уже с хронометрами. Ими пользовались Дж. Кук, Ж. Лаперуз, Д. Антрекасто.

Массовое производство хронометров для навигации было освоено в странах Западной Европы лишь к концу XVIII — началу XIX в.

В России были свои выдающиеся мастера по созданию высокоточных часов. Среди них механик Российской академии наук И. П. Кулибин (1735–1818), Т. И. Волосков (1729–1806), Л. Ф. Собакин (1746–1818) и др. Собакин создал астрономические часы, которые по своей сложности не имели равных. Но это были, конечно, стенные часы большого размера. Морских хронометров русские мастера в то время не изготавливали, и их закупали у иностранных фирм, в основном у английских.

Шесть таких хронометров были установлены на шлюпах «Надежда» и «Нева», совершивших в 1803–1806 гг. кругосветное плавание под командованием И. Ф. Крузенштерна и Ю. Ф. Лисянского. С помощью хронометров определяли долготу Ф. Ф. Беллинсгаузен и М. П. Лазарев во время экспедиции в Антарктиду в 1820 г. на шлюпах «Восток» и «Мирный». Так, в своем дневнике М. П. Лазарев отмечал: «Были на Таити для поверения своих хронометров, которые оказались верны, а потому и заключить можем, что открытия наши положены на карты с довольною точностью».

Закупавшиеся у иностранных фирм хронометры тщательно проверяли в Кронштадтской Морской обсерватории, организованной в 1856 г., и затем отправляли их на корабли. Здесь же проводили исследования по постоянству их хода, чувствительности к изменению температуры, влажности и т. п.

В 1849 г. на Выставке российских мануфактурных изделий в качестве экспоната уже был представлен морской хронометр, изготовленный русским мастером А. Ф. Рогиным. С 1865 г. хронометры начала выпускать расположенная в Петербурге мастерская Августа Эриксона. Изделия этой мастерской получили высокую оценку на ряде промышленных выставок и среди моряков. Они почти вытеснили

хронометры, покупаемые за границей. Эта мастерская обслуживала нужды военно-морского флота до 1902 г., когда появилась вторая мастерская Карла Эриксона — однофамильца Августа. Зависимость от импорта с открытием этой мастерской была сведена к минимуму.

Заканчивая историю изобретения и совершенствования морского хронометра, следует отметить, что в основу его конструкции, решившей вопросы измерения долготы в морских условиях, был положен не маятниковый, а балансирующий механизм, в котором вместо маятника применялось колесо «маховик», колебания которого осуществлялись под воздействием спиральной пружины и анкера.

Эта конструкция, на которую не влияют внешние механические воздействия, в дальнейшем стала использоваться в широко распространенных наручных часах. Таким образом, работы по созданию морского хронометра попутно решили весьма актуальную бытовую проблему и на протяжении многих лет эти часы, производимые многочисленными фирмами в миллионных количествах, были основными «измерителями времени» в быту. Что касается хронометра Гаррисона, то за прошедшие 250 лет его конструкция мало изменилась (изменилась технология изготовления и применяемые материалы).

2.2. Электрические часы

В 1880 г. Н.Тесла начал работы по исследованию переменного тока. Применительно к вопросам измерения времени следует отметить изобретенный им электромеханический генератор и основанные на его принципе работы электрические часы. Им же были начаты работы по исследованию высокочастотных колебаний, положивших начало развитию радиотехники.

Следует отметить, что работы по созданию механических часов и хронометров оказали свое влияние на развитие радиотехники, поскольку разработанная теория колебаний в механических устройствах была применена к электрическому колебательному контуру. Что касается радиотехники, то она повлияла на развитие часов и хронометров в результате исследования свойств кварца и создания на его основе высокостабильного кварцевого генератора.

Пьезоэлектрический эффект был впервые открыт братьями Жаком и Пьером Кюри в 1880 г. Первые стабильные по частоте кварцевые резонаторы были разработаны в 1920–30-х годах. Начиная с 1926 года кварцевые резонаторы на радиостанциях использовались в качестве задающих несущую частоту элементов. В то же время резко возросло количество компаний, начавших выпускать кварцевые резонаторы; только до 1939 г. в США было выпущено более 100 000 ед.

Одним из самых популярных видов резонаторов стали резона-

торы, применяемые в часовых схемах. Резонансная частота часовых резонаторов 32 768 Гц, поделенная на 15-разрядном двоичном счетчике, дает интервал времени в 1 секунду.

Первые кварцевые хронометры были построены на ламповых схемах. Начиная с 60-х годов прошлого столетия в ряде стран (Швейцария, Франция, США) велись работы по созданию малогабаритных кварцевых хронометров взамен кварцевых часов, построенных на ламповых схемах. Габариты и вес кварцевых часов удалось довести до таких минимальных размеров, что они стали выполнять функции переносных приборов времени. Особое значение имели успехи, достигнутые в развитии технологии микроминиатюризации радиоаппаратуры в полупроводниковой технике, в частности в области новых полупроводниковых приборов на туннельных диодах

Шаговые электродвигатели в часовой технике заменили в электромеханических и электронно-механических приборах времени работу анкерных и храповых спусков для передачи импульсов на стрелку часов или на индикаторное устройство. Эти функции стал выполнять шаговый двигатель. В этом случае исполнительное устройство не имеет кинематической связи с кварцевым осциллятором, и потому последний не расходует кинетической энергии для приведения в действие исполнительного механизма. Колебания осциллятора становятся более свободными, а ход часов — более точным и стабильным. Вращение выходного вала в этом электродвигателе носит дискретный (шаговый) характер.

Электронный блок кварцевых часов состоит из двух частей. Одна часть, генератор, вырабатывает электрические колебания, которые стабилизируются кварцевым кристаллом на его резонансной частоте. Таким образом, мы имеем генератор электрических колебаний, причем частота этих колебаний очень стабильна. Остается эти равномерные колебания превратить в равномерное же движение стрелок. Генератор вырабатывает 32 768 электрических колебаний в секунду. Это примерно в 10 000 раз больше, чем число колебаний баланса в обыкновенных часах. Ни одно механическое устройство не может работать с такой скоростью. Поэтому другая часть электронной схемы, называемая делителем, преобразует эти колебания в импульсы частотой 1 Гц. Эти импульсы подаются на обмотку шагового электродвигателя. Двигатель состоит из статора, неподвижно закрепленной на нем катушки с обмоткой и ротора — постоянного магнита, насаженного на ось. При прохождении через катушку электрического импульса возникает магнитное поле, которое поворачивает ротор на пол-оборота. Ротор через систему шестерен вращает стрелки.

Начиная с 60-х годов прошлого века малогабаритные кварцевые

хронометры начали выпускаться в разных странах, притом не только радиотехническими фирмами, но и традиционными часовыми фирмами, занятыми изготовлением механических хронометров.

Отметим основное достижение, связанное с внедрением кварцевых хронометров: погрешность в специально спроектированных хронометрах не превышает 0,3 секунд/месяц. Таким образом, кварцевые хронометры произвели революцию в области навигации, поскольку их точность оказалась на порядок выше точности их механических предшественников при существенно меньшей стоимости. В настоящее время ряд фирм выпускает ручные кварцевые часы.

Все это оказалось возможным благодаря развитию радиотехники, для которой и была создана элементная база, используемая в кварцевых часах.

2.3. Атомные часы

Отметки точного времени, связанные с вращением Земли, служили основной единицей практически во всех системах единиц до тех пор, пока не встала проблема определения единицы времени с относительной погрешностью не хуже 10^{-10} . По этой причине XII Генеральная конференция по мерам и весам поручила Международному комитету по мерам и весам установить некую молекулярную или атомную частоту, которая должна с 1967 г. стать определением единицы времени в системе СИ. Это означало переход от воспроизведения единицы времени к воспроизведению частоты какого-либо стабильного во времени периодического процесса, поскольку величина обратная частоте — период, имеет размерность времени.

С 1967 года международная система единиц СИ определяет одну секунду как 9 192 631 770 периодов электромагнитного излучения, возникающего при переходе между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133. Согласно этому определению, атом цезия-133 является стандартом для измерений времени и частоты. Точность определения секунды определяет точность определения других основных единиц, таких как, например, вольт или метр, содержащих секунду в своем определении.

Принцип действия атомных часов заключается в формировании с помощью кварцевого резонатора синусоидального колебания с частотой близкой к 9,1926 ГГц. Эти колебания подаются в вакуумную камеру. В вакуумную камеру из нагревателя подается испарившийся металлический цезий. С помощью частотно-фазового компаратора осуществляется сравнение частот генератора и колебаний атомов цезия. При появлении разницы в фазе и частоте колебаний схема обратной связи подстраивает частоту кварцевого генератора до требу-

емого значения, повышая тем самым точность частоты генерируемого сигнала и его стабильность.

На основе изложенных выше принципов формирования высокостабильного синусоидального сигнала построен Государственный первичный эталон времени и частоты РФ. Он находится во Всероссийском научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ), п. Менделеево Московской области. Государственный первичный эталон обеспечивает воспроизведение единицы времени (и частоты) со средним квадратическим отклонением результата измерений, не превышающим $(3...5) \cdot 10^{-15}$ на интервалах времени 1–3 месяца.

Достигнутая в настоящее время высокая точность эталонирования времени нужна прежде всего для научных и специальных целей (космическая навигация, радионавигация, связь и др.). Для морской астронавигации требования существенно ниже. Так, для астронавигационных измерений всемирное время достаточно знать с точностью от десятых до сотых долей секунды. Для повседневной деятельности показания судовых морских часов не должны отличаться от точного времени более чем на 0,25 минут.

Подводя итог, можно заключить, что возникающая в связи с морской навигацией проблема точного измерения времени в настоящее время решена. Следует отметить, при реализации атомного эталона времени использовался опыт генерации и подстройки частоты, накопленный в технике связи.

Решение задачи создания атомных часов привело к изменению структуры системы измерительных единиц.

Глава 3

Единицы измерения физических величин

3.1. Общий подход к выбору единиц измерения физических величин

Прогресс в обеспечении единства и точности измерений был реализован путем выбора единиц, не связанных с веществами или объектами, и разработки систем единиц измерений. Это вызвано тем, что передать размер единицы какой-либо величины (т. е. изготовить копию меры) гораздо проще, чем изготовить повторно саму меру.

Важным моментом при разработке системы единиц является выбор количества единиц физических величин, их отнесение к основным или производным, а также образование дольных и кратных единиц.

По мере совершенствования физики появилась проблема измерения новых классов физических величин. Так, например, при развитии теории электричества встал вопрос о выборе единиц электромагнитных величин. При анализе атомных и молекулярных структур появилась необходимость систем единиц, в которых основными являются величины, определяемые размерами атома и процессами, происходящими в атоме.

При рассмотрении вопроса о формировании системы единиц измерения физических величин используются следующие понятия.

Величина — свойство объекта, явления или процесса, которое может быть различимо качественно и определено количественно.

Внесистемная единица величины — единица величины, не входящая в принятую систему единиц.

Единица величины — фиксированное значение величины, которое принято за единицу такой величины и применяется для количественного выражения однородных с ней величин.

Когерентная единица величины — производная единица величины, которая представляет собой произведение основных единиц, возведенных в степень, с коэффициентом пропорциональности, равным 1.

Логарифмическая единица величины — логарифм безразмерного отношения величины к одноименной величине, принимаемой за исходную.

Международная система единиц (СИ) — система единиц, основанная на Международной системе величин.

Основная величина — величина, условно принятая в качестве независимой от других величин Международной системы величин.

Основная единица СИ — единица основной величины в Международной системе единиц (СИ).

Относительная величина — безразмерное отношение величины к одноименной величине, принимаемой за исходную.

Производная величина — величина, определенная через основные величины системы.

Производная единица СИ — единица производной величины Международной системы единиц (СИ).

Система единиц величин СИ — совокупность основных и производных единиц СИ, их десятичных кратных и дольных единиц, а также правил их использования.

3.2. Воспроизведение и передача размера единиц физических величин. Эталоны и образцовые средства измерения

После выбора основных единиц системы единиц и выбора производных единиц возникает проблема создания эталонов единиц физической величины и специальной измерительной аппаратуры для проверки рабочих средств измерений, получивших название образцовых средств измерений.

Для обеспечения единства измерений необходима тождественность единиц, в которых должны быть прогнандуированы все существующие средства измерений одной и той же физической величины. Это достигается путем точного воспроизведения и хранения в специализированных учреждениях установленных единиц физических величин и передачи их размеров применяемым средствам измерения с помощью эталонов.

Эталон — средство измерений (или комплекс средств измерений), предназначенное для воспроизведения и хранения единицы физической величины (кратных либо дольных значений единицы этой величины) с целью передачи ее размера другим средствам измерений данной физической величины. Классификация, назначение и общие требования к созданию, хранению и применению эталонов устанавливает ГОСТ 8.057-80 «ГСИ. Эталоны единиц физических величин. Основные положения». В соответствии с данным ГОСТ-ом эталон должен обладать взаимосвязанными свойствами: воспроизводимостью, неизменностью и сличаемостью.

Воспроизводимость — возможность воспроизведения единицы физической величины (на основе ее теоретического определения) с наименьшей погрешностью для существующего уровня развития измерительной техники. Это достигается постоянным исследованием эталона в целях определения систематических погрешностей и их ис-

ключения путем введения соответствующих поправок.

Неизменность — свойство эталона удерживать неизменным размер воспроизводимой им единицы в течение длительного интервала времени; при этом все изменения, зависящие от внешних условий, должны быть строго определенными функциями величин, доступных точному измерению. Реализация этих требований привела к идее создания «естественных» эталонов различных величин, основанных на физических постоянных.

Сличаемость — возможность обеспечения сличения нижестоящих по поверочной схеме, в первую очередь вторичных эталонов, с наивысшей точностью для существующего уровня развития техники измерения. Это свойство предполагает, что эталоны по своему устройству и действию не вносят каких-либо искажений в результаты сличений и сами не претерпевают изменений при проведении сличения.

По своему метрологическому назначению эталоны делятся на первичные, специальные и вторичные.

Первичный эталон обеспечивает воспроизведение и хранение единицы физической величины с наивысшей в стране (по сравнению с другими эталонами той же величины) точностью. Первичные эталоны — это уникальные средства измерений, которые представляют собой сложнейшие измерительные комплексы, созданные с учетом новейших достижений науки и техники. Первичные эталоны составляют основу государственной системы обеспечения единства измерений.

Специальный эталон обеспечивает воспроизведение единицы физической величины в особых условиях, в которых прямая передача размера единицы от первичного эталона с требуемой точностью не осуществима, и для этих условий он заменяет первичный эталон.

Первичный или специальный эталон, официально утвержденные в качестве исходного для страны, называются *государственным эталоном*. Его утверждение проводит главный метрологический орган страны — Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Государственные эталоны создаются, хранятся и применяются центральными метрологическими научными институтами страны. В состав государственных эталонов включаются средства измерения, с помощью которых хранят и воспроизводят размер единицы физической величины с точностью, которая должна соответствовать уровню лучших мировых достижений и удовлетворять потребностям науки и техники, а также средства измерения, с помощью которых контролируют условия измерений и неизменность воспроизводимого или хранимого размера единицы и осуществляют передачу размера единицы. Государственные эталоны России периодически сличаются с государственными эталонами других стран. Например, эталон мет-

ра и килограмма сличают один раз в 25 лет, эталон света — один раз в три года.

Вторичные эталоны являются частью подчиненных средств хранения единиц и передачи их размеров, создаются и утверждаются в тех случаях, когда это необходимо для организации поверочных работ, а также для обеспечения сохранности и наименьшего износа государственного эталона.

Вторичные эталоны по своему метрологическому назначению подразделяются на эталоны-копии, эталоны сравнения и эталоны-свидетели.

Эталон-копия предназначен для передачи размера единицы рабочим эталонам. Эталон-копия представляет собой копию государственного эталона только по метрологическому назначению, поэтому он всегда является его физической копией.

Эталон сравнения применяется для сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличаемы друг с другом.

Эталон-свидетель предназначен для проверки сохранности и неизменности государственного эталона и замены его в случае порчи или утраты.

Рабочий эталон применяется для передачи размера единицы от эталона-копии образцовым средствам измерения и в отдельных случаях — наиболее точным рабочим средствам измерений.

Эталоны, как правило, предназначены для воспроизведения размера единицы физической величины. Кроме эталонов в отечественной метрологии единицы физических величин воспроизводятся на установках высшей точности (УВТ) и на исходных образцовых средствах измерений (ИОСИ).

Эталоны должны воспроизводить единицы физических величин в соответствии с принятой системой. Таких систем несколько. Наиболее распространенной является система СИ. Она появилась в результате поисков оптимального варианта международной системы единиц в 1948 г. IX Генеральная конференция по мерам и весам на основе опроса стран-членов Метрической конвенции приняла вариант, в котором предлагалось в качестве основных единиц принять метр, килограмм массы и секунду. Килограмм-силу и связанные с ней производные единицы предлагалось исключить из рассмотрения. Окончательное решение на основании результатов опроса 21 страны было сформулировано на X Генеральной конференции по мерам и весам в 1954 г.

Согласно резолюции в качестве основных единиц практической системы для международных сношений было решено принять:

- единицу длины — метр;
- единицу массы — килограмм;
- единицу времени — секунду;
- единицу силы тока — ампер;
- единицу термодинамической температуры — градус Кельвина;
- единицу силы света — свечу.

Позднее по настоянию химиков международная система была дополнена седьмой основной единицей количества вещества — моле.

В дальнейшем международная система СИ, или в английской транскрипции SI (System International), несколько уточнялась, например, единица температуры получила название «кельвин» вместо «градус Кельвина», система эталонов электрических единиц была переориентирована с ампера на вольт, поскольку был создан эталон разности потенциалов на основе квантового эффекта — эффекта Джозефсона, который позволил уменьшить погрешность воспроизведения единицы разности потенциалов — вольта — более чем на порядок. В 1983 г. на XVIII Генеральной конференции по мерам и весам было принято новое определение метра. По новому определению метр представляет собой расстояние, проходимое светом за $1/299\,792\,5$ долю секунды. Такое определение, точнее переопределение, понадобилось в связи с внедрением в эталонную технику лазеров. Следует сразу указать, что размер единицы, в данном случае метра, не изменяется. Изменяются только методы и средства ее воспроизведения, отличающиеся меньшей погрешностью (большей точностью).

3.3. Формулы размерности

Формулой размерности называется математическое выражение, показывающее, во сколько раз изменится производная единица при определенных изменениях основных единиц. Если с изменением основной единицы в n раз производная единица изменяется в n^p раз, то говорят, что данная производная единица обладает размерностью p относительно основной единицы. Например, размерность площади или объема для тех систем единиц, где основной является единица длины, может быть определена из формул $S=L^2$ и $V=L^3$. Здесь S — площадь, V — объем, L — единица длины. Как следует из приведенных формул, размерность площади равна двум, размерность объема — трем.

В более сложных случаях, если единица некоторой величины A имеет размерность p , q и r относительно единиц длины, массы и времени, то формула размерности записывается в виде $[A]=L^p M^q T^r$. Здесь символы L , M и T представляют собой обобщенные обозначения единиц длины, массы и силы без конкретного указания размера

единиц. Это означает, что если каждую из основных единиц увеличить в 10 раз, то производная единица увеличивается в 10^{pqr} раз.

Может оказаться, что размер производной единицы не зависит ни от одной из основных единиц. В этом случае говорят, что производная единица безразмерна или обладает нулевой размерностью. При любом выборе основных единиц формула размерности представляет собой одночлен, составленный из символов основных единиц, причем эти степени могут быть положительными, отрицательными, целыми или дробными.

При образовании производных единиц пользуются следующими правилами:

- если числовое значение величины C равно произведению числовых значений величин A и B , то размерность C равна произведению размерностей A и B , т. е. $[C] = [A] \cdot [B]$;
- если числовое значение величины C равно отношению числовых значений A и B , то размерность C равна отношению размерностей A и B , т. е. $[C] = [A]/[B]$;
- если числовое значение величины C равно степени n числового значения величины A , то размерность C равна степени n размерности A , т. е. $[C] = [A]^n$.

3.4. Шкалы

При изучении основ метрологии приходится постоянно сталкиваться с термином «шкала». Чаще всего это термин ассоциируется со стрелочным измерительным прибором и его шкалой, с помощью которой осуществляется считывание показаний. В действительности термин «шкала» имеет более общее значение, смысл которого будет раскрыт далее.

При рассмотрении термина «шкала» необходимо обращаться к официальным документам, относящимся к Государственной системе обеспечения единства измерений. Таким документом являются Рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 83-2007 «ГСИ. Шкалы измерений. Термины и определения». В основу этого документа были положены материалы, разработанные Всероссийским научно-исследовательским институтом физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ) Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии. В 2007 г. рекомендации были приняты Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 31 от 8 июня 2007 г.). В его состав вошли Казахстан, Кыргызстан, Молдова, Российская Федерация, Таджикистан, Туркменистан, Узбекистан.

Приказом Федерального агентства по техническому регулирова-

нию и метрологии от 29 ноября 2007 г. № 37-ст рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 83-2007 введены в действие в качестве рекомендаций по метрологии Российской Федерации с 1 августа 2008 г.

3.4.1. Основные положения

Измерению подлежат различные проявления свойств тел, веществ, явлений, процессов. Некоторые свойства при этом проявляются количественно (длина, масса, температура и т. п.), а другие — качественно. Примером может служить цвет. Не имеет, например, смысла утверждение, что «красный цвет больше или меньше зеленого». Многообразие (количественное или качественное) проявлений любого свойства образуют множества, отображение элементов которых на упорядоченные множества чисел или, в более общем случае, на систему условных знаков образуют шкалы измерения этих свойств. Такими системами знаков являются, например, множество обозначений (названий) цветов, совокупность классификационных символов или понятий, множество баллов оценки состояний объекта, множество действительных чисел и т. д. Элементы множеств, проявления свойств находятся в определенных логических соотношениях между собой. Такими соотношениями могут быть «эквивалентность» (равенство) или «сходство» (близость) этих элементов, их количественная различимость («больше», «меньше»), допустимость выполнения определенных математических операций сложения, вычитания, умножения, деления с элементами множеств и т. д. Эти особенности элементов множеств, проявления свойств определяют типы (особенности соответствующих им шкал измерений).

Шкала (измерений) — отображение множества различных проявлений количественного или качественного свойства на принятое по соглашению упорядоченное множество чисел или другую систему логически связанных знаков (обозначений).

Термин «шкала» в метрологической практике имеет, по крайней мере, два различных значения. Во-первых, шкалой, или точнее шкалой измерений, как уже отмечалось, называют принятый по соглашению порядок определения и обозначения всевозможных проявлений (значений) конкретного свойства (величины). Во-вторых, шкалой называют отсчетные устройства аналоговых средств измерений.

Остановимся на термине «проявление количественного или качественного свойства». Когда исследуется конкретный объект, осуществляется оценка какого либо его свойства. Это конкретное свойство объекта проявляется в процессе исследования. Например, длину объекта можно оценить в шагах. При этом проявляется характерное

свойство данного объекта — длина. Если воспользоваться рулеткой, то можно оценить длину в метрах, т.е. получить количественное значение конкретного свойства объекта. Но объекты имеют разные длины. Поэтому мы имеем дело не с одним проявлением свойства, а с множеством проявлений, оценивая которые мы получим множество чисел. Поскольку мы пользуемся измерительным прибором, мы получаем упорядоченное множество чисел. Поскольку метр — единица, принятая по соглашению, то мы можем этот термин отнести к упорядоченному множеству чисел.

Теперь о проявлении «качественного свойства». Имеются проявления, которые не представляется возможным оценить количественно. Поэтому в определении шкалы имеется дополнение «или другую систему логически связанных знаков (обозначений)». Смысл этого дополнения заключается в том, что некоторые явления природы, ощущения органов чувств человека невозможно оценить с помощью чисел. Например, восприятие запаха человеком. Запах может быть еле уловимым, средней интенсивности или очень сильным. Можно построить своеобразную шкалу и каждой градации интенсивности запаха присвоить свой знак (обозначение). Естественно, что эти знаки оказываются логически связанными между собой.

В соответствии с логической структурой проявления свойств в теории измерений различают пять основных типов шкал измерений: *наименований, порядка, разностей* (интервалов), *отношений* и *абсолютные шкалы*. Каждый тип шкалы обладает определенными признаками, основные из которых рассматриваются ниже.

3.4.2. Шкала наименований

Шкала наименований — шкала измерений качественного свойства, характеризующаяся только соотношениями эквивалентности или отличиями проявлений этого свойства. Примерами систем знаков, образующих шкалы измерений, являются множество баллов оценки свойств объектов, множество обозначений (названий) цвета, множество названий состояния объекта, совокупность классификационных символов или понятий.

В этой шкале числа используются лишь как метки, т.е. лишь для различения объектов. В шкале наименований «измерены», например, номера телефонов, автомашин, паспортов, студенческих билетов. Номера страховых свидетельств государственного пенсионного страхования, медицинского страхования, индивидуальный номер налогоплательщика измерены по шкале наименований. Пол людей тоже измерен по шкале наименований, результат измерения принимает два значения — мужской, женский. Раса, национальность, цвет глаз, волос —

номинальные признаки. Номера букв в алфавите — тоже измерения в шкале наименований. Бессмысленно складывать или умножать номера телефонов, сравнивать буквы и говорить, например, что буква «А» больше буквы «Д». Единственное, для чего годятся измерения по шкале наименований, — это различать объекты. Во многих случаях только это от них и требуется.

Поскольку данные шкалы характеризуются только отношениями эквивалентности, то в них отсутствуют понятия нуля, «больше» или «меньше» и единицы измерения.

3.4.3. Шкала порядка

Шкала порядка — шкала измерений количественного свойства (величины), характеризующаяся соотношениями эквивалентности и порядка по возрастанию (убыванию) различных проявлений свойства.

В порядковой шкале (она еще называется шкалой рангов) числа используются не только для различения объектов, но и для установления порядка между объектами. Простейшим примером являются оценки знаний учащихся. В средней школе применяются оценки 2, 3, 4, 5, а в высшей школе ровно тот же смысл выражается словесно — «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично». Этим подчеркивается «нечисловой» характер оценок знаний учащихся. В порядковой шкале допустимыми являются все строго возрастающие преобразования.

Оценки экспертов можно считать измеренными с помощью порядковой шкалы. Почему мнения экспертов естественно выражать именно в порядковой шкале? Как показали многочисленные опыты, человек более правильно (и с меньшими затруднениями) отвечает на вопросы качественного, например сравнительного, характера, чем количественного. Так, ему легче сказать, какой человек больше ростом, чем сказать, на сколько сантиметров он выше.

В различных областях человеческой деятельности применяется много других видов порядковых шкал. Так, например, в минералогии используется шкала Мооса, по которому минералы классифицируются согласно критерию твердости. А именно: тальк имеет балл 1, гипс — 2, кальций — 3, флюорит — 4, апатит — 5, ортоклаз — 6, кварц — 7, топаз — 8, корунд — 9, алмаз — 10. Минерал с большим номером является более твердым, чем минерал с меньшим номером, при нажатии царапает его.

Порядковыми шкалами в географии являются бофортава шкала ветров («штиль», «слабый ветер», «умеренный ветер» и т. д.), шкала силы землетрясений. Очевидно, нельзя утверждать, что землетрясение в 2 балла (лампа качнулась под потолком) ровно в 5 раз слабее,

чем землетрясение в 10 баллов (полное разрушение всего на поверхности Земли).

В медицине порядковыми шкалами являются шкала стадий гипертонической болезни (по Мясникову), шкала степеней сердечной недостаточности (по Стражеско – Василенко – Лангу), шкала степени выраженности коронарной недостаточности (по Фогельсону) и т. д. Все эти шкалы построены по схеме: заболевание не обнаружено; первая стадия заболевания; вторая стадия; третья стадия. Иногда выделяют стадии 1а, 1б и др. Каждая стадия имеет свойственную только ей медицинскую характеристику. При описании групп инвалидности числа используются в противоположном порядке: самая тяжелая — первая группа инвалидности, затем — вторая, самая легкая — третья.

Номера домов также измерены в порядковой шкале — они показывают, в каком порядке стоят дома вдоль улицы. Номера томов в собрании сочинений писателя или номера дел в архиве предприятия обычно связаны с хронологическим порядком их создания.

При оценке качества продукции и услуг, в т. наз. квалиметрии (буквальный перевод: измерение качества) также популярны порядковые шкалы, а именно: единица продукции оценивается как годная или не годная. При более тщательном анализе используется шкала с тремя градациями: есть значительные дефекты; присутствуют только незначительные дефекты; нет дефектов. Иногда применяют четыре градации: имеются критические дефекты (делающие невозможным использование); есть значительные дефекты; присутствуют только незначительные дефекты; нет дефектов. Аналогичный смысл имеет сортность продукции: высший сорт, первый сорт, второй сорт.

Определение значения величин при помощи шкал порядка нельзя считать измерением, так как на этих шкалах не могут быть введены единицы измерения. Операцию по приписыванию числа требуемой величине следует считать оценением. Оценивание по шкалам порядка является неоднозначным и весьма условным.

Отличительные признаки шкал порядка:

- неприменимость в них понятий «единица измерений» и «размерность»;
- обязательность наличия нуля;
- допустимость любых монотонных преобразований;
- недопустимость изменения спецификаций, описывающих конкретные шкалы.

Расстановка размеров в порядке возрастания или убывания называется *ранжированием*. По шкале порядка можно определить, какой параметр больше, какой меньше, однако нельзя определить насколько. Для удобства оценок с помощью шкалы порядка могут быть со-

зданы реперные точки. Примером могут служить оценки с помощью реперных точек силы ветра, силы землетрясения. Каждой реперной точке ставится в соответствие некоторое количество баллов. По шкале порядка нельзя получить данные, позволяющие производить их математическую обработку. Баллы, которыми оцениваются явления, нельзя складывать и вычитать.

3.4.4. Шкала разностей (интервалов)

Шкала разностей (интервалов) — шкала измерений количественного свойства (величины), характеризующаяся соотношениями эквивалентности, порядка, суммирования интервалов различных проявлений свойства.

Если взять две реперные точки на шкале порядка и интервал между ними разделить на равные части, то получится шкала разностей (интервалов). При этом одной реперной точке присваивается значение ноль.

Отличительные признаки шкал разностей:

- наличие устанавливаемых по соглашению нуля и единицы измерений;
- применимость понятия «размерность»;
- допустимость линейных преобразований;
- допустимость изменения спецификаций, описывающих конкретные шкалы.

Примером шкалы интервалов является температурная шкала Цельсия. За нулевую точку в этой шкале принята температура таяния льда. Второй реперной точкой является температура кипения воды. Весь большой интервал разделен на 100 равных частей — малых интервалов (градусов). Шкала интервалов более информативна, чем шкала порядка. Используя шкалу интервалов, можно производить такие математические действия, как сложение и вычитание. Действительно, по шкале времени интервалы можно суммировать или вычитать и сравнивать, во сколько раз один интервал больше другого. В шкале разностей есть естественная единица измерения, но нет естественного начала отсчета. На современном уровне знаний естественное начало отсчета времени указать нельзя, т. к. дату сотворения мира различные авторы рассчитывают по-разному.

3.4.5. Шкала отношений

Шкала отношений — шкала измерений количественного свойства (величины), характеризующаяся соотношениями эквивалентности, порядка, пропорциональности (допускающими в ряде случаев операцию суммирования) различных проявлений свойства.

В шкалах отношений существует однозначный естественный критерий нулевого количественного проявления свойства и единица измерений. С формальной точки зрения, шкала отношений является шкалой интервалов с естественным началом отсчета. К значениям, полученным по этой шкале, применимы все арифметические действия, что имеет важное значение при измерении физических величин, применимо понятие «размерность», допустимы масштабные преобразования.

К категории шкалы отношений можно отнести температурную шкалу Кельвина. В ней за нуль принят абсолютный нуль температуры, при котором прекращается температурное движение молекул. Второй реперной точкой служит температура таяния льда. Интервал по шкале Цельсия между этими двумя реперными точками составляет $273,16^{\circ}\text{C}$. По этой причине интервал делится по шкале Кельвина на 273,16 частей, каждая из которых соответствует градусу по шкале Цельсия. Это упрощает переход от одной шкалы к другой.

Шкала отношений является самой информативной шкалой. Используя эту шкалу, можно производить такие математические действия, как сложение, вычитание, умножение и деление.

Шкалы отношений, в которых не имеет смысла операция суммирования, называют «пропорциональными шкалами отношений» (1-го рода), а шкалы, в которых эта операция имеет смысл, называют «аддитивными шкалами отношений» (2-го рода). Например, шкала термодинамических температур — пропорциональная, шкала масс — аддитивная.

3.4.6. Абсолютная шкала

Абсолютная шкала — шкала отношений (пропорциональная или аддитивная) безразмерной величины.

Под абсолютными понимают шкалы, обладающие всеми признаками шкал отношений, но дополнительно имеющие естественное однозначное определение единицы измерения и не зависящие от принятой системы единиц измерения. Такие шкалы соответствуют относительным величинам — коэффициенту усиления, ослабления и др. Для образования многих производных единиц в системе СИ используются безразмерные и счетные единицы абсолютных шкал. Отметим, что шкалы наименований и порядка называют *неметрическими* (концептуальными), а шкалы интервалов и отношений — *метрическими* (материальными). Абсолютные и метрические шкалы относятся к разряду линейных. Практическая реализация шкал измерений осуществляется путем стандартизации как самих шкал и единиц измерений, так и, в необходимых случаях, способов и условий их однозначного воспроизведения.

Отличительные признаки абсолютных шкал:

- наличие естественных (не зависящих от принятой системы единиц) нуля и арифметической единицы измерений;
- допустимость только тождественных преобразований;
- допустимость изменения спецификаций, описывающих конкретные шкалы.

Результаты измерений в абсолютных шкалах могут быть выражены не только в арифметических единицах, но и в процентах, промилле, битах, байтах, децибелах. Единицы абсолютных шкал могут быть применены в сочетании с единицами размерных величин. Например: скорость передачи информации в битах в секунду.

Разновидностью абсолютных шкал являются дискретные (счетные) шкалы, в которых результат измерения выражается числом частиц, квантов или других объектов, эквивалентных по проявлению измеряемого свойства. Например, шкалы для электрического заряда ядер атомов, числа квантов (в фотохимии), количества информации. Иногда за единицу измерений (со специальным названием) в таких шкалах принимают какое-то определенное число частиц (квантов), например, один моль — число частиц, равное числу Авогадро.

Абсолютная ограниченная шкала — абсолютная шкала, диапазон значений которой находится в пределах от нуля до единицы (или некоторого предельного значения по спецификации шкалы).

Логарифмическая шкала — шкала измерений, получаемая логарифмическим преобразованием измеряемой величины. Для построения логарифмических шкал обычно используются системы десятичных или натуральных логарифмов, а также система логарифмов с основанием два.

Логарифмическая шкала разностей — логарифмическая шкала, получаемая логарифмическим преобразованием величины, описываемой шкалой отношений или интервалов в шкале разностей, т.е. шкала, определяемая зависимостью $L = \log(X/X_0)$, где X — текущее, а X_0 — принятое по соглашению опорное (исходное) значение преобразуемой величины. Выбор опорного значения X_0 определяет нулевую точку логарифмической шкалы разностей.

Логарифмическая абсолютная шкала — логарифмическая шкала, получаемая логарифмическим преобразованием $L = \log X$ безразмерной величины X , описываемой абсолютной шкалой. Другое наименование этой разновидности шкалы — логарифмическая шкала с плавающим нулем.

Биофизическая шкала — шкала измерений свойства физического фактора (стимула), модифицированная таким образом, чтобы по результатам измерений этого свойства можно было прогнозировать

уровень или характер реакции биологического объекта на воздействие этого фактора.

Одномерная шкала — шкала измерений свойства объекта, которая характеризуется одним параметром, а результаты измерений в которой выражаются одним числом или знаком (обозначением).

Многомерная шкала — шкала измерений свойства объекта, которая характеризуется двумя или более параметрами, и результаты измерений в которой выражаются двумя или более числами или знаками (обозначениями). Некоторые свойства в принципе невозможно описать одним параметром. Например, импеданс и комплексный коэффициент отражения описываются двумя параметрами, образующими двухмерные шкалы; цвет описывается тремя координатами в моделях цветовых пространств, образующих трехмерные шкалы.

Многомерные шкалы могут быть образованы сочетанием шкал различных типов. Часто в многомерных шкалах устанавливается пространственная или абстрактная система специальных координат, например, для измерения векторов скоростей, ускорений, для геодезических координат.

3.4.7. Элементы шкал измерений

Ноль шкалы — начальная точка шкал порядка (некоторых), интервалов, отношений и абсолютных. Различают естественный и условный нули шкал.

Естественный ноль шкалы — это ноль шкалы, соответствующий бесконечно малому количественному проявлению измеряемого.

Условный ноль шкалы — ноль шкалы разностей (интервалов) или шкалы порядка, которому по соглашению присвоено нулевое значение измеряемого свойства (величины). Шкала может простирается по обе стороны условного нуля. Например, в наиболее распространенной календарной шкале за условный ноль принято событие — Рождество Христово. Поэтому общепринято обозначение даты некоторого события «... н. э. (нашей эры)» или «... до н. э.».

Точка шкалы — одно отдельное число или знак (обозначение) из спецификации шкалы измерений.

Класс эквивалентности — подмножество проявлений измеряемого свойства, принятых условно неразличимыми в шкале измерений этого свойства.

Диапазон шкалы измерений — пределы изменений измеряемого свойства, охватываемые данной конкретной реализацией шкалы.

3.5. Основные единицы системы СИ

В систему СИ включено семь основных единиц физических величин. Эти единицы и их обозначения приведены в табл. 3.1.

Кроме основных, приняты еще так называемые дополнительные единицы (табл. 3.2).

Единица радиан (рад) введена для измерения плоского угла, а стерадиан (ср) — для телесного угла. Радиан — угол между двумя радиусами круга, вырезающих на окружности дугу, длина которой равна радиусу. В градусном исчислении радиан равен $57^{\circ} 17' 44,8''$. Стерадиан — телесный угол с вершиной, расположенной в центре сферы, который вырезает на поверхности сферы площадь, равную квадрату радиуса сферы.

3.5.1. Единица длины системы СИ — метр

Определение метра в системе СИ на протяжении времени ее существования изменялось.

Первое определение метра было дано в 1791 г. при установлении метрической системы мер. Метр был определен как одна десятиллионная часть четверти Парижского меридиана. В 1799 г. на основе измерений части дуги Парижского меридиана был изготовлен эталон метра в виде платиновой концевой меры, переданный на хранение в Национальный Архив Франции и получивший название «метра Архива». Метр Архива представляет собой платиновую линейку шириной

Таблица 3.1. Основные единицы СИ

Наименование величины	Размер- ность	Наименование единицы	Обозначение	
			международное	русское
Длина	L	метр	m	м
Масса	M	килограмм	kg	кг
Время	T	секунда	s	с
Сила электри- ческого тока	I	ампер	A	А
Термодинамическая температура	K	кельвин	K	К
Количество вещества	N	моль	mol	моль
Сила света	J	кандела	cd	кд

Таблица 3.2. Дополнительные единицы СИ

Наименование величины	Наименование единицы	Обозначение	
		международное	русское
Плоский угол	радиан	rad	рад
Телесный угол	стерадиан	sr	ср

около 25 мм, толщиной около 4 мм с расстоянием между концами, равным одному метру.

Созданная по инициативе Российской академии наук Международная комиссия по прототипам метрической системы в 1872 г. приняла рекомендацию об отказе от «естественного» эталона метра и о принятии в качестве исходной меры длины метра Архива. Такая рекомендация была обоснована тем, что при более точном измерении длины меридиана могли получиться другие значения. В 1875 г. по решению Международной дипломатической конференции по метру, на которой была подписана Метрическая конвенция, были изготовлены из наиболее стойкого в то время сплава платины с иридием 31 шт. штриховых эталонов метра. Из них метр №6 оказался при 0 °С, равным метру Архива, и в дальнейшем был утвержден в качестве международного прототипа метра. Он представляет собой платиноиридиевый брусок длиной 103 см, имеющий Х-образное сечение. На расстоянии по одному сантиметру от его краев нанесены штрихи, интервал между которыми и соответствует одному метру.

Переход определения метра от десятиллионной части четверти земного меридиана к международному платиноиридиевому прототипу означал собой потерю значения метра как «естественной» меры, взятой из природы, и переход к условной мере.

Развитие физики в конце XIX в. привело к возможности возвращения к естественному эталону единицы длины. Вторая Генеральная конференция по мерам и весам в 1895 г. приняла решение «естественным свидетелем прототипа метра считать отношение метра к длинам световых волн». Дальнейшие научные исследования в разных странах привели к выводу о возможности установления естественного эталона длины в виде метра, выраженного в длинах световых волн. Было предложено в качестве эталонного излучения применить красную линию кадмия. В 1927 г. Седьмая конференция по мерам и весам узаконила численное соотношение между метром и длиной световой волны. Метр был принят равным 1 553 164,13 длин волн красной линии кадмия, излучаемых в определенных условиях. В СССР использовался источник излучения с изотопом кадмия ^{114}Cd .

Физические принципы применения эталонного источника излучения для выражения метра в длинах световых волн заключается в следующем.

Возбужденный атом излучает квант света с частотой $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$, где h — постоянная Планка, E_1 и E_2 — возможные значения энергии атома, называемые уровнями энергии. При распространении этого излучения в вакууме со скоростью c длина волны λ будет рав-

на $\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{E_2 - E_1}$. Таким образом, теоретически длина волны любого излучения атома, являясь константой, может служить для точного определения единицы длины.

Дальнейшие научные исследования привели к целесообразности перехода на новое определение метра. За эталон метра был принят метр, равный 1 650 763,73 длин световых волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86. Этот эталон был принят и использовался в СССР (ГОСТы 7664-61 и 9867-61) до 1983 г.

В 1983 году на XVII Генеральной конференции мер и весов в качестве эталона единицы длины утвержден *метр* — длина пути, проходимого светом в вакууме за $1/299\,792\,458$ долю секунды.

Такое переопределение оказалось целесообразным не только в связи с внедрением в эталонную технику лазеров, но объединением в одном эталоне воспроизведения размера трех физических величин: длины, времени и частоты.

Частоты, на которых было предложено реализовать эталон метра, приведены в табл. 3.3. В первой графе таблицы указан тип лазера, т. е. рабочее вещество, и тип наполнения поглощающей ячейки.

Длины волн источников излучения в табл. 3.3 даны для вакуума. В воздухе необходимо учитывать показатель преломления воздуха, в результате влияния которого длина волны в воздухе равна $\lambda_{\text{воздух}} = \frac{\lambda_{\text{вакуум}}}{n}$.

Таблица 3.3

Лазер	Частота, МГц	Длина волны, мкм	Погрешность воспроизведения
Гелий-неоновый с ячейкой с метаном	88 376 181,608	3,392 231 397 0	$1,3 \cdot 10^{-10}$
Гелий-неоновый с йодной ячейкой	437 612 214,8	0,632 991 398 1	$1,1 \cdot 10^{-9}$
Гелий-неоновый с йодной ячейкой	489 880 355,1	0,611 970 769 8	$1 \cdot 10^{-9}$
Гелий-неоновый на Па гармонике	520 206 808,61	0,576 294 760 27	$6 \cdot 10^{-10}$
Аргоновый с йодной ячейкой	582 490 603,6	0,516 473 466 2	$1,3 \cdot 10^{-9}$

3.5.2. Единица времени системы СИ — секунда

Как отмечалось в главе 2, исторические аспекты проблемы измерения времени с давних пор связывались с движением Земли вокруг своей оси и с движением Земли вокруг Солнца. Древние астрономы определяли единицу времени как часть дня, т. е. время от восхода до заката Солнца разбивалось на 12 частей (час), затем на 60 частей (минута) и еще на 60 частей (секунда). Но ось вращения Земли наклонена на $23,5^\circ$ к нормали к плоскости орбиты, поэтому на разных широтах и в разное время года единица времени получалась разная.

В дальнейшем единицу времени стали связывать с продолжительностью суток, которые уже разбивались на время $t = 24 \times 60 \times 60 = 86\,400$ секунд. Однако здесь возник ряд трудностей. Было установлено, что продолжительность суток в разное время года разная, поскольку Земля движется вокруг Солнца по эллиптической орбите. Это приводит к тому, что длительность суток в июне на 16 с отличается от длительности суток в декабре.

Кроме того, год, т. е. период обращения Земли вокруг Солнца, может определяться по-разному. В метрологической практике использовались три разных определения года.

Тропический год — число средних солнечных суток, прошедших от одного весеннего равноденствия до другого. Продолжительность тропического года превышает целое число дней (365) примерно на $1/4$ суток. Поэтому каждый четвертый год становится високосным, т. е. к нему добавляют 366-й день.

Сидерический год — промежуток времени, через который Земля при движении вокруг Солнца возвращается в прежнее положение относительно неподвижных звезд.

Аномалистический год — промежуток времени, между двумя последовательными прохождением Земли через перигелий.

Отметки точного времени, связанные с вращением Земли, служили основной единицей практически во всех системах единиц до тех пор, пока не встала проблема определения единицы времени с относительной погрешностью не хуже 10^{-10} . Кроме того, нужен был способ воспроизведения единицы времени, который позволял бы это сделать за промежуток времени, меньший, чем год. По этой причине XII Генеральная конференция по мерам и весам поручила Международному комитету по мерам и весам установить некую молекулярную или атомную частоту, которая должна с 1967 г. стать определением единицы времени в системе СИ. Это означало переход от воспроизведения единицы времени к воспроизведению частоты какого-либо стабильного во времени периодического процесса. Напомним, что об-

ратная частоте величина — период — имеет размерность времени.

Принятое решение устанавливало единицу времени: 1 секунда равна продолжительности $9,192\,631\,770 \cdot 10^9$ колебаний излучения при квантовом переходе между линиями сверхтонкой структуры атома цезия ^{133}Cs , соответствующих переходу $[F=4; m_F=0]$, $[F=3; m_F=0]$ основного состояния $^2S_{1/2}$.

Смысл данного определения единицы времени состоит в том, что расстояние между подуровнями, указанными в определении, составляет частоту $\nu_0 = 9,192\,631\,770$ ГГц. Если на ячейку или атомный пучок, содержащие свободные атомы цезия, воздействовать электромагнитным полем с частотой ν_0 , то будет наблюдаться поглощение энергии поля за счет переходов атомов из состояния с $F=3$ в состояние с $F=4$ в соответствии с диаграммой на рис. 3.1.

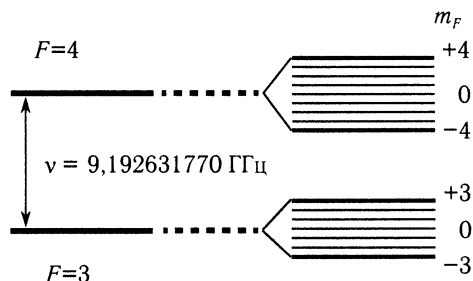


Рис. 3.1

Эталон единицы времени в соответствии с определением был реализован на установке для наблюдения резонанса в атомном цезиевом пучке, схема которой дана на рис. 3.2.

Принцип действия установки для наблюдения резонанса в цезиевом пучке и воспроизведения единицы частоты — герца — состоял в следующем.

1. В специальном нагревателе испарялся металлический цезий, и его атомный пучок распространялся через диафрагмы в вакуумную камеру.
2. На пути пучок попадал в магнитное неоднородное поле, в котором он расширялся и фокусировался на промежуточной щели D.
3. Щель D помещалась внутрь резонатора СВЧ, на который подавался переменный сигнал, близкий к 9,1926 ГГц.
4. За резонатором располагалась еще одна система магнитов, которая фокусировала атомный пучок на детекторе.
5. Изменяя плавно частоту подводимой к резонатору энергии, добивались резкого сигнала с детектора, соответствующего частоте резонанса в цезии.

Именно эта частота и соответствовала $9,192\,631\,770 \cdot 10^9$ Гц, и зафиксировав ее точно, можно было воспроизвести единицу времени, т. к. $t = 1/\nu$.

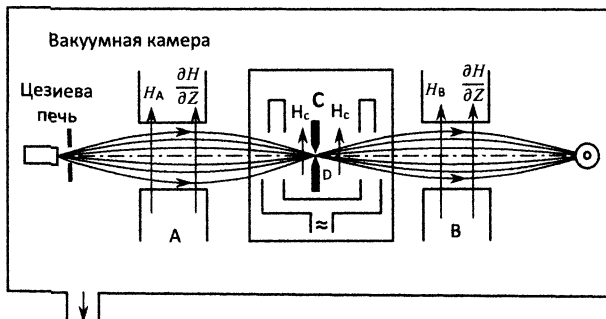


Рис. 3.2

Сопоставление диапазона длин волн и частот, воспроизводимых на эталоне метра и на эталоне герца, показывает, что оптические измерения на длине волн 0,6 мкм и радиочастотные измерения отличаются по частоте на четыре порядка: 10^{14} Гц для оптического диапазона и 10^{10} Гц для радиочастотного. По этой причине при объединении эталонов метра, герца и секунды кроме установок с интерферометром и с цезиевыми часами необходимо было создать специальный измерительный комплекс, позволяющий сопоставить без потери точности оптические и радиочастотные измерения. Этот комплекс в метрологии получил название «радиочастотный мост». Принцип, положенный в его основу, состоит в том, что умножение частоты колебаний какого-либо процесса может быть реализовано практически без потери точности. Появляется возможность последовательным удвоением, учетверением и т. д. частоты, воспроизведенной на цезиевых часах, вплотную подойти к частотам оптического диапазона — 10^{14} Гц. В этом случае можно сличить непосредственно параметры электромагнитных колебаний эталона метра и цезиевых часов. Реализация эталона метра, эталона герца совместно с радиочастотным мостом позволила создать метрологический эталонный комплекс, на котором воспроизводятся единицы двух основных единиц системы СИ — метра и секунды, а также воспроизводится единица герц производной величины — частоты. Последняя является на настоящее время наиболее точно воспроизводимой единицей из всех физических величин.

3.5.3. Единица силы электрического тока системы СИ — ампер

Введение произвольной электрической единицы в практику измерений впервые было предложено на Международном конгрессе электриков в Чикаго в 1893 г. Тогда было предложено ввести две аб-

солютные практические единицы электрических величин: 1 вольт и 1 ампер для измерений напряжения (разности потенциалов) и силы постоянного электрического тока. Особые электрические единицы в Европе были приняты в Германии в 1898 г. Определения были приняты следующие.

Один ом — электрическое сопротивление столбика ртути постоянного сечения, имеющего длину 106,300 см и массу 14,4521 г при 0 °С.

Один ампер — сила электрического тока, который выделяет из водного раствора азотнокислого серебра 1,118 мг металлического серебра за одну секунду.

За единицу напряжения было принято падение напряжения на сопротивлении 1 ом при силе тока 1 ампер в соответствии с законом Ома. Заряд в 1 кулон в этой системе соответствовал заряду, протекающему за одну секунду через проводник при силе тока в 1 ампер, т. е. $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}$.

В качестве эталона разности потенциалов был выбран так называемый нормальный кадмиевый элемент (НЭ), схема которого дана на рис. 3.3.

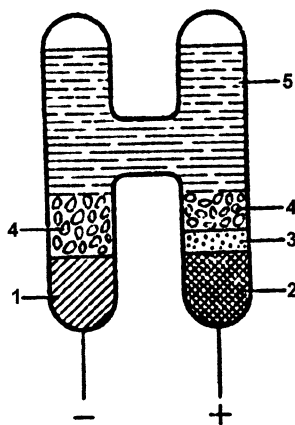


Рис. 3.3

Нормальный кадмиевый элемент Вестона представляет стеклянный сосуд, состоящий из двух пробирок, соединенных поперечной трубкой (рис. 3.3). В дно каждой пробирки впаяны платиновые проволочки для вывода электрического тока. В одну из пробирок налито немного чистой ртути 2, являющейся положительным полюсом; на дно второй пробирки налита амальгама кадмия 1, содержащая 12,5 % кадмия, это отрицательный полюс. Амальгама кадмия контактирует с пастой из кристаллов гидрата сульфата кадмия $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (4).

Чистая ртуть (2) контактирует с пастой из кристаллов сульфата ртути Hg_2SO_4 (3). Электролит (5) — раствор сульфата кадмия $\text{CdSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$, чаще всего с небольшой (нормальностью обычно 0,03...0,08) добавкой серной кислоты для предотвращения гидролиза сульфата ртути, снижения его растворимости и снижения скорости растворения стекла. Токообразующая реакция $\text{Cd} + \text{Hg}_2^{2+} \rightleftharpoons \text{Cd}_2 + 2\text{Hg}$.

НЭ предложен в 1892 г. Эдуардом Вестоном (Edward Weston); официально принят для метрологических целей в 1908 г. До 1970-х гг., когда появились квантовые эталоны напряжения на эффекте Джозефсона, НЭ были основой национальных эталонов вольты (с периодической сверкой по другим физическим эффектам), также широко использовались в лабораторной и промышленной практике для точных измерений. С 1970-х гг. активно внедрялись источники опорного напряжения на основе полупроводниковых приборов, ставшими все более точными. К 2000 г. этот процесс почти завершился; область целесообразного применения НЭ (если не считать старые приборы и НЭ) сузилась исключительно до использования НЭ в составе национальных и международного эталонов вольты и в других случаях, когда в стационарных условиях необходим крайне низкий кратковременный дрейф напряжения.

Особенностью нормального кадмиевого элемента является высокая стабильность и хорошая воспроизводимость разности потенциалов, возникающей между ртутным и кадмиевым электродами, если ее измерять в сосуде, заполненном водным раствором серноокислого кадмия. Разность потенциалов между ртутным и кадмиевым электродами устанавливается в пределах $E_{\text{НЭ}} = 1,018608...1,018644$ В. Это значение зависит от температуры, однако температурные поправки хорошо исследованы. Если через E обозначить ЭДС нормального элемента при нулевой температуре, то в интервале температур от 0°C до 40°C разность потенциалов нормального элемента хорошо описывается выражением

$$E_t = E_0 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2 + \gamma(t - 20)^3 + \delta(t - 20)^4,$$

где t — температура в градусах Цельсия; коэффициенты α , β , γ , δ учитывают температурные изменения и равны соответственно $\alpha = -39,83 \cdot 10^{-6}$ В/К; $\beta = -0,93 \cdot 10^{-6}$ В/К²; $\gamma = 0,009 \cdot 10^{-6}$ В/К³; $\delta = -0,0001 \cdot 10^{-6}$ В/К⁴.

В зависимости от концентрации электролита различают насыщенные и ненасыщенные НЭ. Насыщенный НЭ — это НЭ, в котором электролит представляет собой насыщенный раствор, то есть раствор, в котором при рабочей температуре сульфат кадмия более не растворяется. Именно это и делает возможным присутствие его нераство-

ренного гидрата в пастообразных компонентах электродов. Ненасыщенный же НЭ содержит раствор сульфата кадмия, насыщенный при 4 °С. Растворимость сульфата кадмия выше 3 °С растет с ростом температуры; таким образом, существование его гидрата в твердом виде в ненасыщенном НЭ в диапазоне рабочих температур невозможно.

Это обуславливает их основное преимущество и недостаток друг перед другом, поскольку ЭДС НЭ в основном зависит от концентрации электролита. С одной стороны, так как в насыщенном НЭ концентрация электролита определяется растворимостью сульфата кадмия, взятого в избытке, то при поддержании постоянной температуры концентрация сульфата кадмия, изменившаяся в силу каких-либо причин (например, протекания тока через НЭ), автоматически восстанавливается из-за растворения или оседания «буферного» сульфата кадмия, в отличие от ненасыщенного НЭ, который при протекании тока «заряжается» и «разряжается», меняя свою ЭДС, да и при хранении концентрация электролита в нем несколько меняется. Это обуславливает гораздо большую временную стабильность ЭДС насыщенного НЭ. Но отсюда проистекает и основной недостаток насыщенного НЭ — намного большая зависимость ЭДС от температуры; ее приходится либо строго учитывать, либо термостатировать насыщенный НЭ, тогда как ненасыщенный НЭ в большинстве случаев этого не требует. В связи с этим насыщенные НЭ применяют, в основном, в лабораторных условиях, а ненасыщенные — в промышленных и переносных измерительных приборах.

Насыщенные НЭ серийно выпускаются классов точности (с пределом допускаемой основной относительной погрешности, выраженной в процентах) 0,005, 0,002, 0,001, 0,0005 и 0,0002. Гарантированная стабильность насыщенных НЭ за год равна их классу. В силу повышенной температурной зависимости ЭДС насыщенные НЭ снабжаются термометрами (НЭ класса 0,005, с точностью 0,2 °С) или термостатируются (остальных классов; например, температуру НЭ класса 0,0002 поддерживают с точностью 0,01 °С).

Теоретически ЭДС насыщенного НЭ при 20 °С составляет

$$E(20^{\circ}\text{C}) = 1,018636 \text{ В} - 6 \cdot 10^{-4} N - 5 \cdot 10^{-5} N^2,$$

где N обозначает нормальность серной кислоты в электролите (иногда встречающееся значение 1,018300 В соответствует устаревшему «международному» вольту); из-за этого и иных производственных отклонений чистоты материалов реальные насыщенные НЭ, пригодные к применению по ГОСТ 1954-82, имеют $E(20^{\circ}\text{C})$ в диапазоне 1,018540...1,018730 В при эксплуатации и 1,018590...1,018700 В при выпуске из производства. Конкретное значение указывается в атте-

стате или свидетельстве после выпуска данного экземпляра НЭ или его периодической поверки в метрологических органах.

Зависимость ЭДС насыщенного НЭ от температуры T (с точностью по ГОСТ не хуже $2 \text{ мкВ/}^\circ\text{С}$ отклонения в диапазоне $20...40^\circ\text{С}$ и не хуже $3 \text{ мкВ/}^\circ\text{С}$ в диапазоне $10...20^\circ\text{С}$) выражается формулой

$$E(T) = E(20^\circ\text{С}) - 4,06 \cdot 10^{-5} \Delta T - 9,5 \cdot 10^{-7} \Delta T^2 + 10^{-8} \Delta T^3,$$

где $\Delta T = T - 20^\circ\text{С}$.

Ненасыщенные НЭ выпускаются классов точности 0,02 (в СССР выпускались до 1990 г.), 0,01, 0,005 и 0,002. Гарантированная стабильность ненасыщенных НЭ за год равна удвоенному классу, поскольку в их аттестате/свидетельстве записывают не измеренную ЭДС, а величину, меньшую ее на класс точности, потому что эти НЭ только уменьшают ЭДС со временем. При действии ранних версий ГОСТ 1954, до 1982 г., было иначе: стабильность за год равнялась классу, а в аттестате писали измеренную ЭДС. Поэтому, например, новый НЭ МЭ4700 класса 0,01 — прямая замена старого Э-303 класса 0,02. Теоретически ЭДС ненасыщенного НЭ при 20°С составляет $E(20^\circ\text{С}) = 1,01899 \text{ В}$ (при соответствующей этой ЭДС концентрации электролита ЭДС НЭ не меняется с температурой возле точки 25°С), но из-за производственных отклонений и необходимости создания запаса ЭДС на старение реальные ненасыщенные НЭ, пригодные к применению по ГОСТ, имеют $E(20^\circ\text{С})$ в диапазоне $1,018800...1,019600 \text{ В}$ при эксплуатации и $1,019000...1,019600 \text{ В}$ при выпуске из производства. Конкретное значение указывается в аттестате или свидетельстве НЭ.

Средний температурный коэффициент ЭДС ненасыщенного НЭ (усредненный по всему диапазону температур) по ГОСТ не хуже $5 \text{ мкВ/}^\circ\text{С}$ в диапазоне $10...40^\circ\text{С}$ и не хуже $10 \text{ мкВ/}^\circ\text{С}$ в диапазонах $5...10^\circ\text{С}$ и $40...50^\circ\text{С}$. Точный учет зависимости ЭДС от температуры для ненасыщенных НЭ производится редко, поскольку при старении и изменении $E(20^\circ\text{С})$ ее вид изменяется. С точностью $0,5 \text{ мкВ/}^\circ\text{С}$ отклонения от 20°С в диапазоне температур $15...45^\circ\text{С}$ она выражается формулой

$$E(T) = E(20^\circ\text{С}) + [1,7 \cdot 10^{-6} - 5,6 \cdot 10^{-3} (E(20^\circ\text{С}) - 1,0188)] \Delta T - 1,2 \cdot 10^{-7} \Delta T^2 + 6,8 \cdot 10^{-9} \Delta T^3,$$

где $\Delta T = T - 20^\circ\text{С}$.

Токовая нагрузка НЭ ограничена, поскольку НЭ обладают заметным внутренним сопротивлением в пределах от 100 до 3000 Ом. Протекающий через НЭ ток отклоняет его напряжение от ЭДС. Кроме того, при протекании тока уже в единицы микроампер (мкА) в течение нескольких минут НЭ выходит из строя полностью или на

длительное время (от минут до недель). Поэтому продолжительный ток через НЭ, превышающий доли мкА, недопустим.

На НЭ строятся источники калиброванного напряжения. Однако при построении средств измерений НЭ не используется в качестве источника энергии. В качестве источника энергии используется другой менее стабильный источник регулируемого напряжения (ИРН), который периодически или непрерывно (автоматически) подстраивают под напряжение НЭ, измеряя напряжение встречно включенных НЭ и ИРН, так называемым нуль-органом — вольтметром, позволяющим определить момент уравнивания (равенства напряжения НЭ и ИРН, при котором разностное напряжение равно нулю).

Механическая и тепловая стойкости НЭ невелики. Тряска и вибрация способны повлиять на ЭДС НЭ, но, как правило, обратимо. Из-за этого рекомендуется после перевозки НЭ дать ему отстояться от часов до недель в зависимости от требуемой точности. Изменения температуры также влияют на НЭ, причем после возврата температуры к исходной точке ЭДС восстанавливается тоже не сразу. Переворачивать и даже наклонять более чем на примерно 30° НЭ классической конструкции нельзя, поскольку при этом элемент может необратимо прийти в негодность из-за перемешивания компонентов разных электродов между собой. Однако многие ненасыщенные НЭ имеют т. наз. уплотненную конструкцию, в которой посредством пористых перегородок это практически предотвращается; такие НЭ способны без ущерба переносить умеренные механические воздействия.

Что касается стабильности, то насыщенные НЭ стабильнее ненасыщенных. ЭДС качественных термостатированных насыщенных НЭ нередко десятилетиями держится в интервале шириной в несколько мкВ. ЭДС ненасыщенных НЭ даже без использования падает типично на 75...85 мкВ/год для старых и на 20...40 мкВ/год для современных с улучшенными перегородками между электродами, при 25°C ; по мере старения процесс ускоряется, и через 10–20 лет они приходят в негодность. Скорость старения НЭ удваивается с ростом температуры на 12°C . Маленькие НЭ при прочих равных условиях менее стабильны из-за большего изменения концентрации материалов вследствие протекания тока и потому, что диффузия ионов ртути к отрицательному электроду происходит быстрее по более короткому пути.

В качестве примера можно привести параметры наиболее часто применяемого ненасыщенного нормального элемента МЭ4700. Напряжение при эксплуатации 1,018800...1,019600 В, за один год эксплуатации допустимое отклонение ЭДС в пределах 0,1 В. Класс точности 0,01. Допустимые температуры эксплуатации составляют 5...50 $^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха — не более 80 %.

При обсуждении международной системы единиц, из которой потом образовалась система СИ, было решено оставить одну произвольно выбираемую электрическую единицу. Желательно было выбрать ее так, чтобы имелась возможность сопоставления электрических величин с величинами, характеризующими пространство и время, — длиной, массой и временем. Для реализации этого за основу был принят факт, что два проводника с постоянным током действуют друг на друга с силой, изменяющей свой знак при изменении направления токов на обратное (сила Ампера). В итоге было сформулировано определение основной единицы в электрических измерениях — единицы силы постоянного тока — ампера.

Один ампер есть сила не изменяющегося во времени электрического тока, который, протекая в вакууме по двум бесконечным и параллельным проводникам пренебрежимо малого круглого поперечного сечения, находящимися друг от друга на расстоянии 1 метр, создает электродинамическую силу, действующую на эти проводники и равную $2 \cdot 10^{-7}$ ньютона на каждый метр их длины (рис. 3.4).

Реально эталон ампера был реализован в виде двух установок. На первой измеряли силу, действующую на малую катушку в однородном магнитном поле. На второй измеряли момент силы, действующий на малую катушку с током. Измерения силы, действующей на катушку с током, проводились на установке, получившей название Ампер-весов. Схема этой установки дана на рис. 3.5.

В устройстве (рис. 3.5), присоединенном к нормальному элементу, сила взаимодействия катушек уравнивалась грузом, помещенном на вторую чашку весов. Затем изменяли направление тока в катушках и одновременно увеличивали или уменьшали уравнивающий груз. Этот избыток или недостаток уравнивающего груза был близок по весу к величине силы взаимодействия катушек, равной

$$F = 2 \frac{\mu_0}{4\pi} N_1 N_2 I^2 f(d, D),$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума; N_1 , N_2 — число витков первой и второй катушки; d и D — диаметры первой и второй катушек; I — сила тока; f — некая эллиптическая функция, характеризующая геометрию катушек, их индуктивность и взаимное расположение.

В реализации Ампера на весах достаточно много источников погрешностей и расчетных параметров, точность которых трудно определить. Кроме того, использование нормального элемента в качестве источника питания практически означает, что реально именно он является первичным, т.е. определяет все точностные характеристики установки. Несмотря на указанные недостатки реализации основной

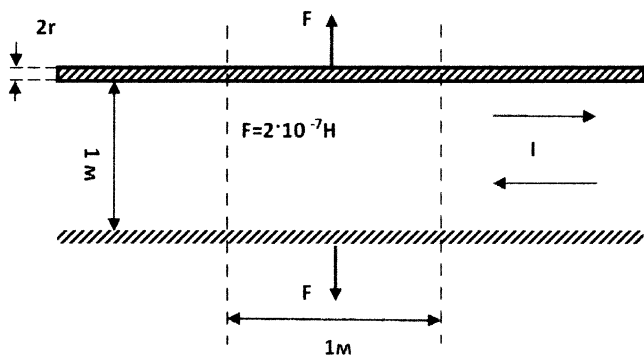


Рис. 3.4

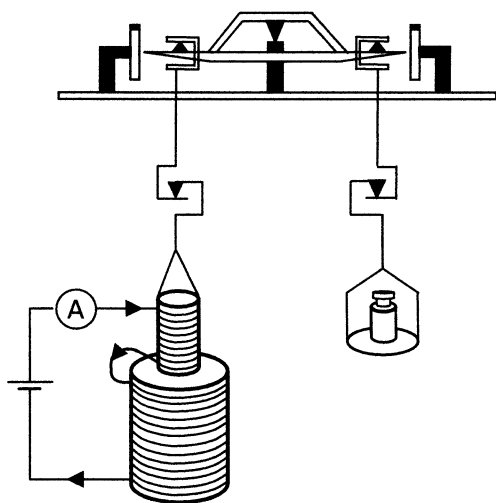


Рис. 3.5

электрической единицы на Ампер-весах, данная установка с успехом применялась для сравнения различных эталонов ампера и сравнения ЭДС различных нормальных элементов.

Значительный прогресс в реализации эталонов электрических единиц был достигнут после того, как на основе теории сверхпроводимости английским физиком Джозефсоном был предсказан эффект протекания сверхпроводящего тока через слой диэлектрика, разделяющего два сверхпроводника (Нобелевская премия 1973 г.). Сущность этого эффекта, получившего название эффекта Джозефсона, состоит в том, что через слой диэлектрика, разделяющего два сверхпроводника, при подаче некоторой разности потенциалов U может проходить

переменный ток, частота которого

$$\nu = \frac{2eU}{h}, \quad (3.1)$$

где e — заряд электрона, h — постоянная Планка. Из этого уравнения следует, что для измерения разности потенциалов, приложенной к сверхпроводникам контакта Джозефсона, необходимо измерить частоту переменного тока, проходящего через этот контакт.

На рис. 3.6 показана конструкция, позволяющая реализовать эффект Джозефсона. На какую-либо изолирующую подложку, например на стекло, напыляется металлическая полоска — слой чистого олова. Затем следует дождаться, когда слой олова окислится, т. е. покроется пленкой SnO толщиной около 10 мкм. После этого крестообразно напыляется вторая полоска из олова. Пересечение оловянных полосок, разделенных слоем диэлектрика, образует контакт Джозефсона.

Контакт подключается согласно схеме, приведенной на рис. 3.7.

На рис. 3.7 представлена схема подключения контакта Джозефсона и его вольт-амперная характеристика.

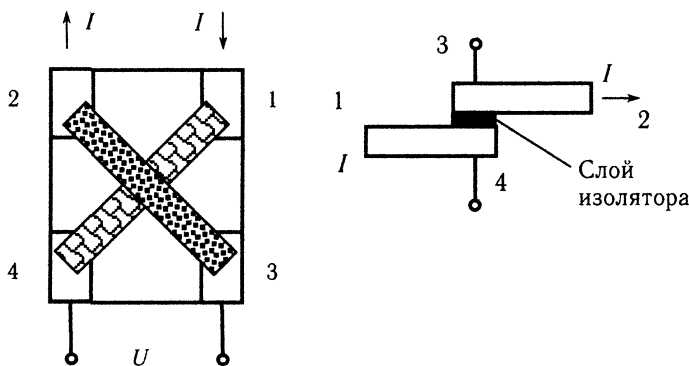


Рис. 3.6

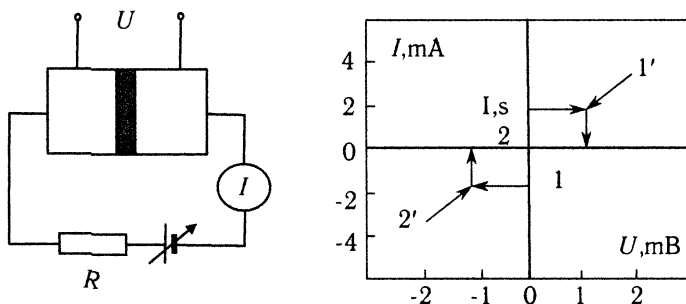


Рис. 3.7

Если сопротивление R велико, то мы имеем дело с источником постоянного тока, сила которого определяется величиной U_0 . При увеличении напряжения U_0 от нуля в контакте Джозефсона наблюдается все возрастающий ток сверхпроводимости без падения напряжения на контакте ($U=0$). После достижения некоего критического значения тока сверхпроводимости I_S на контакте возникает падение напряжения $U \neq 0$ и ток перескакивает на характеристическую линию $I'-U$. Если теперь уменьшать U_0 , то ток пойдет по линии $I'-1$, т. е. имеет место явление гистерезиса. Картина повторится при изменении направления тока на обратное. Для сверхпроводящего контакта характерно наличие тока сверхпроводимости и порогового значения напряжения E_g/e , где E_g — так называемая запрещенная зона, представляющая собой важнейшую характеристику в явлении сверхпроводимости.

Согласно расчетам Джозефсона, при $U \neq 0$ в контакте должен возникать переменный ток высокой частоты, имеющий в соответствии с формулой (3.1) частоту в несколько гигагерц. Рассматриваемый эффект может быть обнаружен, если поместить контакт Джозефсона в поле высокой частоты микроволнового волновода. Тогда наблюдается характерный ход зависимости «ток — напряжение» со ступенчатым увеличением тока при росте напряжения на дискретные значения ΔU , которые зависят от частоты микроволнового поля таким образом, что $\nu = 2e \frac{\Delta U}{h}$.

Это значит, что всякий раз, когда напряжение достигает величины, при которой частота переменного тока эффекта Джозефсона является целой кратной по отношению к частоте микроволнового излучения, возникает добавочный постоянный ток, дающий скачок на вольт-амперной характеристике. Этот вывод был подтвержден экспериментом на контакте Sn-SnO-Sn при температуре перехода олова в сверхпроводящее состояние ($T = 3,72$ K).

Джозефсоновские контакты используются во всем мире для реализации единицы напряжения (разности потенциалов). Поскольку e и h — мировые константы, эффект Джозефсона является преобразователем напряжения в частоту. Поскольку частота является самой точно измеряемой величиной и может быть воспроизведена совместно с единицей длины и времени, получается великолепная возможность сверхточного и, самое главное, независимого воспроизведения единицы одной из электрических величин.

Практически разность потенциалов, воспроизводимая на контакте Джозефсона, составляет около 10 мВ. Это означает, что для воспроизведения вольта необходимо последовательное соединение многих джозефсоновских контактов. По этой причине основу эталона

вольта обычно составляет некая структура, состоящая из нескольких контактов Джозефсона, напряжение на которой обычно компарируется с напряжением нормального элемента.

При воспроизведении основной электрической единицы и использовании эффекта Джозефсона существовавшая ранее схема реализации эталона вольта через нормальный элемент не разрушается, равно как не разрушается и не подвергается ревизии существующий эталон ампера. Просто средства воспроизведения единиц электрических величин дополняются новыми средствами воспроизведения напряжения с точностными характеристиками значительно выше тех, которые имели место при реализации единиц электрических величин через Ампер-весы и, соответственно, через механические единицы.

3.5.4. Реализация основной единицы системы СИ — единицы силы света — канделы

При построении системы единиц учитывалось восприятие человеком определенных природных явлений. Прежде всего, это касалось восприятия света органами зрения человека. Человеческий глаз воспринимает электромагнитное излучение в ограниченном диапазоне длин волн от 380 нм до 770 нм. При этом наибольшую чувствительность человеческий глаз имеет к зеленому свету при длине волны, близкой к 550 нм. При продвижении в синюю и в красную области спектра чувствительность человеческого глаза падает. Соответственно, для того чтобы охарактеризовать степень освещенности или светимости объектов, нужно не только измерять энергию электромагнитного излучения в диапазоне 380...770 нм, но и проводить измерения на приборах, спектральная чувствительность которых соответствовала бы спектральной чувствительности человеческого глаза.

Именно по этой причине в практику измерений и, соответственно, в Международную систему единиц физических величин была введена специфическая основная единица, определяющая энергию электромагнитного излучения, скорректированную под чувствительность человеческого глаза. Эта величина носит название *световой поток*, а единице светового потока присвоено название *люмен*.

В соответствии с принятым решением, в области наибольшей чувствительности человеческого глаза (555 нм в зеленой области спектра) одному ватту механической мощности световой волны соответствует эквивалентное значение в 683 оптических единиц мощности, носящих название *люмен*.

В сторону больших или меньших длин волн в соответствии с уменьшением чувствительности среднестатистического человеческого глаза механический эквивалент света необходимо поделить на коэф-

Таблица 3.4

Длина волны λ , нм	$V(\lambda)$	Длина волны λ , нм	$V(\lambda)$	Длина волны λ , нм	$V(\lambda)$
380	0,0000	520	0,7100	650	0,1070
390	0,0001	530	0,8620	660	0,0610
400	0,0004	540	0,9540	670	0,0320
410	0,0012	550	0,9950	680	0,0170
420	0,0040	555	1,0000	690	0,0082
430	0,0116	560	0,9950	700	0,0041
440	0,0230	570	0,9520	710	0,0021
450	0,3800	580	0,8700	720	0,0011
460	0,0600	590	0,7570	730	0,0005
470	0,9100	600	0,6310	740	0,0003
480	0,1390	610	0,5030	750	0,0001
490	0,2080	620	0,3810	760	0,0001
500	0,3230	630	0,2650	770	0,0000
510	0,5030	640	0,1750		

фициент, меньший единицы, затабулированный для дневного и ночного аппарата зрения человека в виде так называемой *функции видности* $V(\lambda)$. В табл. 3.4 приведены значения стандартной функции видности для дневного аппарата зрения человека в зависимости от длины волны. Аналогичная функция видности установлена экспериментально для ночного аппарата зрения.

Для того чтобы определить величину светового потока в оптических единицах, необходимо найти значение интеграла

$$\Phi = K_m \int_{\lambda}^{\lambda + \Delta\lambda} V(\lambda) \cdot P_{\lambda} d\lambda,$$

где K_m — механический эквивалент света, равный 683 люмена на ватт; $V(\lambda)$ — функция видности человеческого глаза; $P_{\lambda} d\lambda$ — поток излучения в механических единицах мощности.

Из сказанного следует, что оптические величины и единицы отличаются от механических тем, что энергия в каждом частотном интервале корректируется в соответствии со спектральной характеристикой человеческого зрения, что позволяет судить об интенсивности восприятия человеком светового излучения.

Для адекватного представления о световых характеристиках объекта произвольно выбрана основная единица, называемая *силой света* и определяемая как отношение светового потока, испускаемого светящейся точкой, к телесному углу, в пределах которого распро-

страняется свет, т. е.

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}.$$

Сила света измеряется в канделах (кд), прежнее название в русской транскрипции — свеча. Формально 1 кд — сила света монохроматического источника с длиной волны 555 нм, энергетическая яркость которого равна 1/683 Вт/ср. Здесь «ср» — сокращенное обозначение телесного угла. Согласно определению XIII Генеральной конференции по мерам и весам, за единицу силы света — канделу — принята сила света в направлении нормали к отверстию абсолютно черного тела, имеющего температуру затвердевания платины $T = 2045$ К и площадь $1/60$ см² при давлении 101 325 Па.

Введение основной оптической единицы предполагает наличие некоторых специфических оптических производных величин. Наиболее часто используемыми являются поверхностная плотность светового потока в некоторой точке поверхности и яркость точки в некотором направлении.

Плотность светового потока, падающего на поверхность от сторонних источников света, — освещенность — определяется как отношение светового потока к величине освещаемой площадки:

$$E = \frac{d\Phi_{\text{пад}}}{dS}.$$

Для самосветящихся поверхностей, например раскаленных объектов или экранов, и пламени измеряемой характеристикой является светимость, т. е. отношение светового потока, испускаемого поверхностью, к величине самой поверхности:

$$M = \frac{d\Phi_{\text{изл}}}{dS}.$$

Единица освещенности, измеренная в люменах на квадратный метр, получила название *люкса*. Светимость выражается в люменах на квадратный метр.

Еще одной часто используемой световой величиной является яркость объекта (точки) в определенном направлении. Яркость характеризует световую мощность светящейся точки в трех случаях.

1. Свечение поверхности: яркость L поверхности в точке А равна отношению силы света dI к величине площади, перпендикулярной направлению луча. Для луча, расположенного под углом φ по отношению к нормали поверхности площадью dS , яркость определяется формулой

$$L = \frac{dI}{dS \cdot \cos \varphi}.$$

2. Освещение поверхности: яркость L освещающего пучка равна отношению освещенности dE , которую создает пучок на перпендикулярном к нему элементе поверхности, к телесному углу $d\omega$, содержащему направление и заполненному освещающим пучком, т. е.

$$L = \frac{dE_n}{d\omega}.$$

3. Прохождение пучка через среду: яркость L пучка равна отношению светового потока $d^2\Phi$, переносимого пучком, к произведению площади его нормального сечения $dS_n = dS \cdot \cos \varphi$, и заполненного пучком телесного угла $d\omega$, содержащего направление, т. е.

$$L = \frac{d^2\Phi}{dS \cdot \cos \varphi \cdot d\omega}.$$

Оптическая яркость измеряется в канделах на квадратный метр. В соответствии с определением канделы эта величина воспроизводится на эталонах, представляющих из себя черный излучатель при температуре плавления платины при нормальном давлении. На рис. 3.8 приведена конструкция платинового объемного излучателя — эталона канделы.

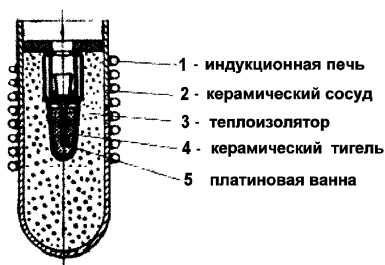


Рис. 3.8

Платина, расплавленная индукционной печью до температуры $T = 2045$ К, нагревает керамическую трубку диаметром до 2 мм и длиной до 40 мм. Излучение, выходящее из этой трубки, фокусируется на вход фотометра — прибора для измерения энергии излучения. Фотометр позволяет проводить измерения при различных длинах волн.

На практике чаще всего используют фотометр-компаратор, позволяющий сравнивать световые потоки двух излучающих объектов. Чаще всего это платиновый излучатель и вольфрамовая ленточная лампа накаливания, которая подбором силы тока излучает, как черное тело с температурой 2045 К.

У оптического эталона канделы есть несколько существенных источников погрешности при воспроизведении основной единицы системы СИ, а именно:

- 1) невозможно создать идеальный черный излучатель, т. к. излучающая полость имеет отверстие конечных размеров и коэффициент излучения всегда меньше единицы;
- 2) вследствие теплопроводности и отражений температура излучающей полости оказывается несколько ниже температуры платиновой ванны. Платина, кроме того, затвердевает неоднородно;
- 3) при прохождении через оптическую систему теряется часть световой энергии. Необходимые поправки дают погрешности около 1 %, что в общем случае дает погрешность воспроизведения единицы силы света на уровне 0,1...0,2 %.

По перечисленным причинам в настоящее время в связи с созданием фотоприемников с точно известным квантовым выходом основную фотометрическую единицу на уровне точности до 0,1 % можно воспроизвести, измеряя энергетическую мощность излучения на длине волны 555 нм. Измерения ведутся в единицах механической мощности — в ваттах, а световой поток находят затем, используя механический эквивалент света, равный 683 люмена на ватт. В этом случае отпадает необходимость в сложной технике термостатирования расплавленной платины.

В настоящее время единица силы света кандела определяется как сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц (длина волны 555 нм), энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1/683 ватта на стерадиан (1/683 Вт/ср).

3.5.5. Единица массы системы СИ — килограмм

Согласно определению, утвержденному XI Генеральной конференцией по мерам и весам, принявшей систему СИ, в качестве основной механической единицы принята единица массы — килограмм. Дано следующее определение килограмму.

Единицей массы — килограммом — является масса вещества, равная массе прототипа килограмма. Эталон единицы массы (1 кг) представляет собой цилиндр из сплава платины (90 %) и иридия (10 %), у которого диаметр и высота примерно одинаковы (около 30 мм). Прототип килограмма находится в Международном бюро по мерам и весам в Севре под Парижем.

Выбор этого сплава обеспечивает высокие качества при хранении: химическую стойкость, однородность. Сплав легко полируется и хорошо очищается. Ввиду большой плотности, составляющей $21,5 \text{ г/см}^3$, он обладает тем недостатком, что отделение от него уже малых частей приводит к большому изменению массы. По этой при-

чине копии с эталонов массы (вторичные эталоны различных рангов), как правило, изготавливают из стали или из латуни.

Для обеспечения единства измерений массы в ходе установления и утверждения прототипа килограмма было изготовлено много его экземпляров. Масса прототипов обеспечивалась с отличием на уровне 10^{-8} по относительной погрешности. Прототипы были проаттестованы в Международном бюро по мерам и весам. Каждому экземпляру была приписана погрешность. Возможные колебания массы прототипов не превышали 25 мкг, что соответствует относительной погрешности $2,5 \cdot 10^{-8}$. В Россию как в страну-участницу Метрической конвенции в 1889 г. был направлен прототип № 12, который хранится до настоящего времени во Всероссийском научно-исследовательском институте им. Д.И. Менделеева (бывшая Главная палата мер и весов России) в Санкт-Петербурге.

Первоначально прототип массы должен был совпадать с массой одного кубического дециметра воды при ее наибольшей плотности при температуре $T = 3,98\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 101 325 Па. Однако затем максимальная плотности воды была найдена равной $0,999972\text{ г/см}^3$, т. е. прототип массы оказался на 28 мкг больше, чем был задуман. Это сказалось бы на определении единицы объема, если бы таковая вводилась бы как объем одного миллилитра воды. При известной массе прототипа килограмма единицу объема можно определить как объем 1000 г воды при наибольшей плотности и нормальном давлении. Определенная таким образом единица соотносилась бы с производной единицей объема системы СИ как

$$1\text{ литр} = \frac{1\text{ кг}}{0,999972\text{ кг/дм}^3} = 1,000\,028 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3.$$

Международная система единиц СИ постоянно совершенствуется. Почти для всех основных единиц системы СИ приняты новые определения, основанные на физических явлениях, отличающихся постоянством и неподверженностью влиянию внешних воздействий. Это дает возможность создать так называемые «естественные» эталоны. Такие эталоны созданы для основных единиц: длины — метра, времени — секунды, силы тока — ампера, термодинамической температуры — кельвина, силы света — канделы.

Разработки такого же эталона для единицы массы — килограмма — еще не завершились успехом. Точность, достигаемая с помощью имеющегося эталона килограмма, очень высока и пока удовлетворяет все запросы практики. Тем не менее, создание «естественного» эталона массы считается одной из наиболее актуальных научных и практических проблем современной метрологии.

3.5.6. Единица количества вещества системы СИ — моль

Единица количества вещества «моль» практически дублирует имеющуюся основную единицу — единицу массы. Масса, определяемая как мера инертности тела или мера сил тяготения, является мерой количества вещества. До настоящего времени не существует независимой реализации эталона единицы этой физической величины. Многочисленные попытки независимого воспроизведения моля приводили к тому, что накопление точно измеренного количества вещества сводилось, в конце концов, с выходом на другие эталоны основных физических величин. Например, попытки электролитического выделения определенного количества какого-либо вещества приводили к необходимости измерения массы и силы электрического тока, а измерение числа атомов в кристаллах приводило к измерению линейных размеров кристалла и его массы.

Введение единицы количества вещества «моля» в систему СИ объясняется потребностями практики. В самом деле, для описания параметров механических процессов удобнее всего пользоваться произвольной искусственной мерой массы — килограммом. Для описания химических процессов очень важно знать число элементарных частиц, атомов или молекул, принимающих участие в химических реакциях. По этой причине моль называют химической основной единицей системы СИ и используется она для проведения специфических измерений, связанных с химическим взаимодействием веществ и материалов.

Указанная специфика породила одно очень важное качество единицы количества вещества — моля. Оно состоит в том, что при введении химического определения единицы регламентируется не просто количество любого вещества, а количество вещества в виде атомов или молекул данного сорта. Поэтому моль можно называть единицей количества индивидуального вещества. При таком определении моль становится более универсальной единицей количества вещества, чем килограмм.

Кроме удобства использования единицы количества вещества в проведении химических реакций введение второй основной единицы количества вещества оправдано еще одним обстоятельством. Оно состоит в том, что измерения количества вещества необходимо проводить в очень широком диапазоне изменения этой величины. В макроскопических явлениях объекты измерений в виде твердых тел содержат порядка 10^{23} атомов. Это порядок величины числа атомов в грамм-эквиваленте вещества. В микроскопических явлениях существует даже проблема детектирования отдельных атомов. Следова-

тельно, количество вещества необходимо измерять в диапазоне изменения более чем 20 порядков! Естественно, ни одно устройство, ни один прибор на эталонном уровне такой возможности не обеспечит.

По этой причине очевидным становится желание метрологов иметь в качестве основных единиц две единицы количества вещества, одна из которых позволяет проводить точные измерения в области больших количеств, а вторая позволяет измерять частицы определенного вещества поштучно.

Нежелание метрологов отказаться от какой-либо основной единицы количества вещества, например от килограмма, связано с тем, что воспроизведение этой единицы изготовлением копии прототипа возможно с очень высокой точностью. Воспроизведение массы независимыми способами, такими как отбор одного литра воды или электролитическое осаждение определенной массы металла из раствора, оказывается значительно менее точным, чем изготовление копии килограмма взвешиванием.

В связи с перечисленными трудностями реализации основной единицы количества вещества в виде эталона не существует.

Определение моля следующее: «Молем является количество вещества, имеющее столько структурных единиц, сколько их содержится в 12 граммах моноизотопа углерода ^{12}C ».

Из определения с очевидностью следует, что точно это значение не установлено, по физическому смыслу оно равно постоянной Авогадро — числу атомов в грамм-эквиваленте углерода. Это дает возможность определять моль как величину, обратную постоянной Авогадро. Для 12 грамм углерода с массовым числом 12 количество атомов будет равно N_A .

В соответствии с этим проблема создания эталона количества вещества сводится к уточнению постоянной Авогадро. Технически в настоящее время пользуются следующей процедурой.

1. Изготавливается определенное количество (сотни грамм) сверхчистого кремния.
2. На точных масс-спектрометрах измеряется изотопный состав этого кремния.
3. Выращивается монокристалл сверхчистого кремния.
4. Измеряется объем V монокристалла по измерениям его массы и плотности.
5. На рентгеновском интерферометре измеряется размер a элементарной ячейки куба в монокристалле кремния.
6. Поскольку кристаллическая решетка в кремнии имеет форму куба, число структурных единиц в монокристалле оказывается равным $N = V/a^3$.

7. По измерениям массы и эквивалентного атомного веса определяется число молей кремния в кристалле $n = m/\mu$, где m — масса кристалла, μ — атомный вес образца с учетом различного процентного содержания изотопов.

8. Определяется постоянная Авогадро как число структурных единиц в одном грамм-эквиваленте кремния $N_A = N/n$.

Работы по уточнению постоянной Авогадро ведутся международными метрологическими центрами постоянно. Особенно большую активность проявляет национальная физическая лаборатория Германии РТВ в Брауншвейге. Идет постоянная борьба за чистоту исходного материала (кремния) как за счет очистки от примесей, так и за счет однородности изотопного состава. Достигнутый в настоящее время уровень содержания примесей составляет для большинства элементов не более одной частицы на миллион частиц кремния, а по некоторым примесям, мешающим кристаллообразованию, одна частица на миллиард частиц кремния.

При повторении работ по уточнению постоянной Авогадро совершенствуются средства измерения массы кристалла, его плотности, изотопного состава, размеров кристаллической решетки. В настоящее время можно гарантировать достоверность определения постоянной Авогадро на уровне $10^{-6} \dots 10^{-7}$ по относительной погрешности. Тем не менее, это значение много больше погрешности в изготовлении копий эталона килограмма методом взвешивания.

Кроме точности, уступающей точности воспроизведения килограмма, описанная процедура определения моля страдает еще рядом существенных недостатков. Самый главный из них — это невозможность создания меры, равной какой-либо части моля или нескольких молей, т. е. создания мер кратных и дольных единиц. Любые попытки сделать это приводят к необходимости взвешивания, т. е. определения массы и выхода на эталон килограмма. Естественно, что смысл воспроизведения моля при этом теряется. Еще один принципиальный порок в процедуре использования моля — это то, что проведенные измерения числа частиц на кремнии очень трудно, а иногда невозможно сопоставить с какими-либо другими частицами, и в первую очередь с углеродом, по которому, собственно, и определяется моль. В общем случае любая сверхточная процедура определения числа частиц какого-либо вещества может оказаться совершенно непригодной для другого вещества. Массу любых веществ мы можем сравнивать друг с другом, но число частиц одного вещества может оказаться сопоставимым с числом частиц другого вещества. В идеальном случае для обеспечения единства измерений состава веществ и материалов следует иметь универсальный метод воспроизведения моля любого

вещества, но чаще всего такая задача оказывается невыполнимой. Очень большое число веществ в химические взаимодействия друг с другом не вступают.

Несмотря на все указанные проблемы в реализации эталона моля «химическая метрология» существует, и химикам очень удобно использовать единицу количества вещества, определенную как число частиц данного сорта. Именно поэтому моль широко используется в измерениях состава веществ и материалов, в особенности в измерениях экологической направленности. В настоящее время проблемы экологии как межнациональные и межгосударственные являются одной из основных точек приложения достижений метрологии как науки об обеспечении единства измерений.

3.5.7. Единица температуры системы СИ — кельвин

Понятие температуры возникло из необходимости характеризовать состояния тел по ощущениям человека «тепло — холодно». Поскольку тепловые характеристики среды занимают важное место в жизни человека, для их оценки была введена в систему СИ независимая произвольно выбранная (основная) единица. Очень часто понятие температуры отождествляется с понятием энергии теплового движения. На самом же деле температура и тепловая энергия — величины связанные, но не тождественные.

В специальных разделах физики присутствуют различные понятия температуры. Различают температуру термодинамическую, радиационную, яркостную и цветовую. Рассматривая систему СИ, следует основное внимание уделить понятию термодинамической температуры. Именно это понятие лежит в основе построения эталона и температурной шкалы. Температурная шкала системы СИ имеет название «Международная температурная шкала МПТШ-90». Цифра в названии означает год последнего внесения поправок в принципы построения шкалы.

В системе СИ единица температуры кельвин определяется как $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды. Тройная точка воды — такое состояние чистой воды, когда лед, жидкая вода и водяной пар находятся в тепловом равновесии. В условиях вакуума над тающим льдом устанавливается равновесное давление водяного пара, равное $P = 611$ Па. Этому состоянию приписано значение термодинамической температуры $T = 273,16$ К. Точка замерзания воды при нормальном атмосферном давлении ($p = 101\,325$ Па = 1 атм.) расположена ниже тройной точки воды на $0,00993$ К.

XIII Генеральная ассамблея по мерам и весам в 1967 г. наряду с абсолютной термодинамической шкалой утвердила в каче-

стве производной шкалу Цельсия, определив эту температуру как $t^{\circ}\text{C} = (T - 273,15) \text{ K}$.

В международной практике наряду с абсолютной термодинамической шкалой и шкалой Цельсия широко используется шкала Фаренгейта и реже шкала Реомюра.

Шкала Фаренгейта была введена в 1714 г., опираясь на температуру таяния льда и температуру человеческого тела. Этот интервал был разделен на 64 части, а нулевая точка располагалась ниже точки таяния льда на 32°F . В то время это была наиболее низкая из известных температур и получалась она смешиванием нашатыря, воды и льда. Температура тела человека по этой шкале оказалась равной 96°F , а точка кипения воды в шкале Фаренгейта равнялась 212°F . Несмотря на всю архаичность такого определения температурной шкалы, ею пользуются во всем западном полушарии и в первую очередь в США.

В некоторых странах в настоящее время принята шкала Реомюра, введенная в 1730 г. В качестве опорных точек выбирается температура таяния льда (0°R) и точка кипения воды, которой приписывается температура 80°R . Такой выбор определяется тем, что выбранная Реомюром смесь для наполнения термометра, состоящая из смеси спирта с водой, между точками замерзания и кипения воды расширяется на 8%. Размер градуса в шкале Реомюра можно воспроизвести изменением объема водно-спиртовой смеси на 0,001 часть первоначального объема. В шкале Кельвина этот коэффициент объемного расширения соответствует приблизительно $1,25 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

На практике термодинамическая шкала строится по реперным точкам — фиксированным температурам плавления или кипения различных веществ, которые тщательно измерены разными методами на разных приборах в разных странах. Только при условии хорошей сходимости результатов измерений реперная точка вносится в список точек Международной практической температурной шкалы МПТШ. Последний раз шкала переутверждалась в 1990 г. и потому называется МТШ-90.

Реперные точки шкалы МТШ-90 подразделяются на определяющие и вторичные. Определяющие реперные точки — это наиболее точно измеренные относительно тройной точки воды температуры, для которых результаты измерений в различных странах хорошо совпадают между собой. Список определяющих реперных точек шкалы МТШ-90 дан в табл. 3.5.

Вторичные реперные точки температурной шкалы охватывают более широкий диапазон температур. Самая высокая температура реперной точки — температура затвердевания вольфрама, равная 3660 K .

Таблица 3.5

Реперная точка	T , К	t , °С	Погрешность, К
Тройная точка равновесного водорода	13,81	–259,34	0,01
Точка кипения равновесного водорода при давлении 3330,6 Па	17,042	–256,108	0,01
Точка кипения равновесного водорода	20,28	–252,87	0,01
Точка кипения неона	27,102	–246,048	0,01
Тройная точка кислорода	54,361	–218,789	0,01
Точка кипения кислорода	90,188	–182,962	0,01
Тройная точка воды	273,16	0,01	Точно по определению
Точка кипения воды	373,15	100	0,005
Точка затвердевания цинка	692,73	419,58	0,003
Точка затвердевания серебра	1235,08	961,93	0,2
Точка затвердевания золота	1337,58	1064,43	0,2

Всего в шкале вторичных реперных точек содержится 27 значений, в основном температуры затвердевания чистых металлов. Результаты международных сличений температур этих реперных точек дали большее в сравнении с определяющими точками значения погрешностей. В основном причины расхождений заключаются в разной степени очистки веществ, которые используются в термостатах.

На практике для точных измерений используются платиновые термометры сопротивления или платина — платинородиевые термопары, которые градуируются по реперным точкам. От платиновых термометров и термопар размер единицы температуры — кельвина — передается образцовым или рабочим термометрам менее высокого класса точности.

3.5.8. Производные и внесистемные единицы Международной системы единиц (СИ)

Кроме основных единиц на практике широко применяются производные и внесистемные единицы, представленные в табл. 3.6 и 3.7. Внесистемные единицы величин применяются только в случаях, когда количественные значения величин невозможно или нецелесообразно выражать в единицах СИ.

Таблица 3.6. Производные единицы СИ

Наименование величины		Единица величины				Выражение через основные и производные единицы СИ
		Наименование	Обозначение		русское	
			между- народное	3		
I		2	3	4	5	
1. Плоский угол	радиан	rad	рад		$\text{м} \cdot \text{м}^{-1} = 1$	
2. Телесный угол	стерадиан	sr	ср		$\text{м}^2 \cdot \text{м}^{-2} = 1$	
3. Площадь	квадратный метр	m^2	м^2		м^2	
4. Объем	кубический метр	m^3	м^3		м^3	
5. Скорость	метр в секунду	m/s	м/с		$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	
6. Ускорение	метр на секунду в квадрате	m/s^2	м/с^2		$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$	
7. Частота	герц	Hz	Гц		с^{-1}	
8. Сила	ньютон	N	Н		$\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$	
9. Плотность	килограмм на кубический метр	kg/m^3	кг/м^3		$\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$	
10. Давление	паскаль	Pa	Па		$\text{м}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$	
11. Энергия, работа, количество теплоты	джоуль	J	Дж		$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$	
12. Теплоемкость	джоуль на кельвин	J/K	Дж/К		$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	
13. Мощность	ватт	W	Вт		$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$	
14. Электрический заряд, количество электричества	кулон	C	Кл		$\text{с} \cdot \text{A}$	

<i>I</i>	2	3	4	5
15. Электрическое напряжение, электрический потенциал, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила	вольт	V	B	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1}$
16. Электрическая емкость	фарад	F	Ф	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{А}^2$
17. Электрическое сопротивление	ом	Ω	Ом	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-2}$
18. Электрическая проводимость	сименс	S	См	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^3 \cdot \text{А}^2$
19. Поток магнитной индукции, магнитный поток	вебер	Wb	Вб	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$
20. Плотность магнитного потока, магнитная индукция	тесла	T	Тл	$\text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$
21. Индуктивность, взаимная индуктивность	генри	H	Гн	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-2}$
22. Температура Цельсия	градус Цельсия	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	K
23. Световой поток	люмен	lm	лм	кд · ср
24. Освещенность	люкс	lx	лк	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кд} \cdot \text{ср}$
25. Активность нуклида в радиоактивном источнике (активность радионуклида)	беккерель	Bq	Бк	с^{-1}
26. Поглощенная доза ионизирующего излучения, керма	грей	Gy	Гр	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$
27. Эквивалентная доза ионизирующего излучения, эффективная доза ионизирующего излучения	зиверт	Sv	Зв	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$
28. Активность катализатора	катал	kat	кат	$\text{моль} \cdot \text{с}^{-1}$
29. Момент силы	ньютон-метр	N·m	Н·м	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
30. Напряженность электрического поля	вольт на метр	V/m	В/м	$\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1}$
31. Напряженность магнитного поля	ампер на метр	A/m	А/м	$\text{м}^{-1} \cdot \text{А}$
32. Удельная электрическая проводимость	сименс на метр	S/m	См/м	$\text{м}^{-3} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^3 \cdot \text{А}^2$

Таблица 3.7. Внесистемные единицы СИ

Наименование величины	Единица величины					Область применения (срок действия)
	Наименование	Обозначение		Соотношение с единицей СИ		
		между- народное	русское			
1	2	3	4	5	6	
1. Масса	тонна	t	т	$1 \cdot 10^3$ кг	все области	
	атомная единица массы	u	а.е.м.	$\approx 1,660\,540\,2 \cdot 10^{-27}$ кг	атомная физика	
	карат	—	кар	$\approx 2 \cdot 10^{-4}$ кг	для драгоценных камней и жемчуга	
2. Время	минута	min	мин	60 с	все области	
	час	h	ч	3600 с		
	сутки	d	сут	86 400 с		
3. Объем, вместимость	литр	L	л	$1 \cdot 10^{-3}$ м ³	все области	
	градус	°	°	$\frac{\pi}{180}$ рад $\approx 1,745\,329 \cdot 10^{-2}$ рад	все области	
	минута	'	'	$\frac{\pi}{10\,800}$ рад $\approx 2,908\,882 \cdot 10^{-4}$ рад	все области	
4. Плоский угол	секунда	"	"	$\frac{\pi}{648\,000}$ рад $\approx 4,848\,137 \cdot 10^{-6}$ рад	все области	
	град (гон)	Gon	град	$\frac{\pi}{200}$ рад $\approx 1,570\,80 \cdot 10^{-2}$ рад	геодезия	
5. Длина	астрономическая единица	ua	а.е.	$\approx 1,495\,98 \cdot 10^{11}$ м	астрономия	
	световой год	ly	св. год	$\approx 9,4607 \cdot 10^{15}$ м	астрономия	
	парсек	pc	пк	$\approx 3,0857 \cdot 10^{16}$ м	астрономия	

1	2	3	4	5.	6
	ангстрем	Å	Å	10^{-10} м	физика, оптика
	морская миля	mile	миля	1852 м	морская и авиационная навигация
	фут	ft	фут	0,3048 м	промышленность
	дюйм	inch	дюйм	0,0254 м	промышленность
6. Площадь	гектар	Ha	га	$1 \cdot 10^4$ м ²	сельское и
	ар	a	a	$1 \cdot 10^2$ м ²	лесное хозяйство
7. Сила	грамм-сила	gf	гс	$9,80665 \cdot 10^{-3}$ Н	все области (действуют до 2016 года)
	килограмм-сила	kgf	кгс	9,80665 Н	
	тонна-сила	tf	тс	9806,65 Н	
	бар	bar	бар	$1 \cdot 10^5$ Па	промышленность
	килограмм-сила на квадратный сантиметр	kgf/cm ²	кгс/см ²	98066,5 Па	все области (действует до 2016 года)
8. Давление	миллиметр водяного столба	mmH ₂ O	мм вод.ст.	9,80665 Па	все области (действует до 2016 года)
	метр водяного столба	mH ₂ O	м вод.ст.	9806,65 Па	все области (действует до 2016 года)
	атмосфера техническая	—	ат	$9,80665 \cdot 10^4$ Па	все области (действует до 2016 года)
	миллиметр ртутного столба	mmHg	мм рт.ст.	133,3224 Па	медицина, метеорология, авиационная навигация

1	2	3	4	5	6
9. Оптическая сила	диоптрия	–	дптр	1 м^{-1}	оптика
10. Линейная плотность	текс	tex	текс	$1 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}$	текстильная промышленность
11. Скорость	узел	кп	уз	$\approx 0,514 \text{ м/с}$	морская навигация
12. Ускорение	гал	Gal	Гал	$0,01 \text{ м/с}^2$	гравиметрия
13. Частота вращения	оборот в секунду оборот в минуту	г/с г/мин	об/с об/мин	1 с^{-1} $\frac{1}{60} \text{ с}^{-1} \approx 0,016 \text{ с}^{-1}$	электротехника, промышленность
14. Энергия	электрон-вольт	eV	эВ	$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$	физика
15. Полная мощность	вольт-ампер	V·A	В·А	–	электротехника
16. Реактивная мощность	вар	var	вар	–	электротехника
17. Электрический заряд, количество электричества	ампер-час	A·h	А·ч	$3,6 \cdot 10^3 \text{ Кл}$	электротехника
18. Количество информации	бит байт	bit B (byte)	бит байт	– –	информационные технологии, связь
19. Скорость передачи информации	бит в секунду	bit/s	бит/с	–	информационные технологии, связь
20. Кинематическая вязкость	стокс	St	Ст	$10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$	промышленность

3.6. Единицы физических величин, применяющиеся в системах инфокоммуникаций

Во многих публикациях, посвященных технике связи, часто используются иностранные термины, образованные на основе фамилий известных ученых. Таковы названия измерительных приборов: амперметр, вольтметр, гальванометр и т. п. Также получило распространение применение фамилий для обозначения единиц измерения физических величин. В перечень единиц системы СИ, широко применяемых в связи, входят ампер, ом, вольт, герц, кулон, ватт, джоуль, генри.

До принятия системы СИ на международном уровне (1960 г.) широко использовалась система СГС (сантиметр — грамм — секунда). Эта система, называемая так же гауссовской, продолжает широко использоваться в теоретической физике и астрофизике. В системе СГС применяются единицы эрстед, гаусс, максвелл, гильберт.

Все названия основаны на фамилиях известных ученых-физиков, имеющих непосредственное отношение к исследованию конкретных явлений природы. Представляет интерес рассмотрение научных достижений ученых, в честь которых названы перечисленные единицы измерений.

3.6.1. Единица силы тока — ампер

Эта единица была названа в честь *Андре Мари Ампера*.

Ампер (1775–1836) — французский физик, математик, химик, член Парижской академии наук (1814), иностранный член Петербургской академии наук (1830), один из основоположников электродинамики. Ампер — автор термина «электродинамика» как наименования учения об электричестве и магнетизме, один из основоположников этого учения.



Андре Мари Ампер

Ампер родился в Лионе, получил домашнее образование. Все знания он получил самостоятельно из книг. Он никогда не ходил в школу, не сдал за всю свою жизнь ни одного экзамена.

Ампер не просто читал книги, он изучал, творчески усваивая прочитанное. Не случайно уже в 12–14 лет он начал представлять математические мемуары в Лионскую академию.

Ампер сначала работал репетитором в Политехнической школе в Париже, затем занимал кафедру физики в Бурке, а с 1805 года —

кафедру математики в парижской Политехнической школе. В 1814 г. он был избран членом Академии наук, а с 1824 г. занимал должность профессора экспериментальной физики в Коллеж де Франс.

Ампер провел ряд экспериментов по исследованию взаимодействия между электрическим током и магнитом, для которых сконструировал большое количество приборов. Обнаружил действие магнитного поля Земли на движущиеся проводники с током. В 1820 г. высказал идею использования электромагнитных явлений для передачи информации. В 1822 г. открыл магнитный эффект катушки с током (соленоида). Высказал идею об эквивалентности соленоида с током и постоянного магнита. Предложил помещать металлический сердечник из мягкого железа для усиления магнитного поля. Ампер изобрел коммутатор, предложил проект стрелочного телеграфа.

Интересны достижения Ампера в области математики. Известны его работы в области теории вероятностей. Ампер внес свой вклад в математическую физику. Только в одном 1814 году он выполнил несколько работ, получивших высокую оценку видных французских математиков, в частности, Далласа, Лагранжа и Пуассона. Джеймс Максвелл назвал Ампера «Ньютоном электричества».

Другим достижением Ампера была классификация наук. Он разработал свою систему классификации наук, которую намеревался изложить в двухтомном сочинении. В 1834 году вышел первый том «Опыты философии наук или аналитического изложения естественной классификации всех человеческих знаний». Второй том был издан сыном Ампера уже после его смерти.

Ампер был большим мастером изобретать новые научные термины. Именно он ввел в обиход ученых такие слова, как «электростатика», «электродинамика», «соленоид». Ампер высказал мысль о том, что в будущем, вероятно, возникнет новая наука об общих закономерностях процессов управления. Он предложил именовать ее «кибернетикой». Предвидение Ампера оправдалось.

Имя «Ньютона электричества» не осталось забытым. На I Международном конгрессе электриков в 1881 году «ампером» назвали единицу силы тока, вошедшую в Международную систему единиц СИ в качестве основной для электрических параметров, а измерительные приборы — «амперметрами». Это решение было принято по предложению А. Г. Столетова, который представлял российскую науку на I Всемирном конгрессе электриков в Париже.

Имя Ампера внесено в список величайших ученых Франции, помещенный на первом этаже Эйфелевой башни.

Международное и русское обозначение единицы тока «ампер» одинаково. Обозначается буквой «А».

Связь с другими единицами СИ:

- если сила тока в проводнике равна 1 амперу, то за одну секунду через поперечное сечение проходит заряд, равный 1 кулону;
- если конденсатор емкостью в 1 фарад заряжать током 1 ампер, то напряжение на обкладках будет возрастать на 1 вольт каждую секунду.

3.6.2. Единица напряжения — вольт

Эта единица напряжения была названа в честь *Алессандро Джузеппе Антонио Анастасио Вольта* (Alessandro Volta).

Вольта (1745–1827) — итальянский естествоиспытатель, физик, химик и физиолог. Он родился в старинной аристократической семье в небольшом итальянском городе Комо недалеко от Милана.

После смерти отца будущий ученый воспитывался дядей, который уделял большое внимание воспитанию племянника: изучению латыни, истории, арифметики. Юный Вольта восторженно и жадно принимал знания, и сразу же заинтересовался многими физическими явлениями — в том числе и электричеством. Алессандро Вольта суждено было сыграть существенную роль в изучении электричества.



Алессандро Вольта

Видя жадный интерес способного юноши к наукам, дядя старался снабжать его книгами. По мере их выпуска, в доме появлялись и изучались тома Энциклопедии.

Узнав о работах Бенджамина Франклина, Вольта в 1768 г., поразив жителей Комо, устанавливает первый в городе громоотвод, колокольчики которого звенели в грозовую погоду. В 24 года он публикует работу о лейденской банке, а еще через два года — об электрической машине. В 1774 году Вольта становится школьным учителем физики в родном городе, через три года — профессором физики в университете с тысячелетней историей в городе Павия. Здесь он проработал 36 лет, прежде чем возглавить философский факультет в Падуе.

Его важнейшим вкладом в науку явилось изобретение принципиально нового источника постоянного тока, сыгравшее определяющую роль в дальнейших исследованиях электрических и магнитных явлений. Вольта впервые поместил пластины из цинка и меди в кислоту, чтобы получить непрерывный электрический ток, создав первый в мире химический источник тока «Вольтов столб». Сам Вольта называл его «электрический орган». Начиная с 1800 года стало возможным

получать электричество с помощью химических реакций. Это изобретение оказало огромное влияние не только на развитие науки об электричестве, но и на всю историю человеческой цивилизации, поскольку благодаря применению источника тока, была обнаружена зависимость между электрическим и магнитным полем, что позволило создать электрический генератор и мотор.

Вольта также изобрел привычные для нас электрические приборы: конденсатор, электрофор (прибор для получения электричества), электромметр (прибор измерения электричества), электроскоп (прибор обнаружения электричества).

Первая серия уникальных экспериментов по измерению контактной разности потенциалов (КРП), завершилась составлением известного «ряда Вольты», в котором элементы располагаются в следующей последовательности: цинк, оловянная фольга, свинец, олово, железо, бронза, медь, платина, золото, серебро, ртуть, графит.

В 1794 году Вольта получил высшую награду Лондонского королевского общества — медаль Копли. В 1801 году получил от Наполеона титул графа и сенатора. А однажды Наполеон, увидев в библиотеке академии лавровый венок с надписью «Великому Вольтеру», стер последние буквы таким образом, что получилось «Великому Вольте».

Научные заслуги высоко ценятся и в наше время. В честь Алессандро Вольты в 1964 г. назван кратер на видимой стороне Луны.

Единица измерения «вольт» была введена в 1861 году комитетом электрических эталонов, а приборы для измерения напряжения называются «вольтметрами»

Единица «вольт» применяется при измерении электрического напряжения, электрического потенциала, разности электрических потенциалов, электродвижущей силы. Международное обозначение «V», русское — «В».

Первоначально в 1898 г. 1 вольт был установлен как «законная» единица измерения ЭДС, равная ЭДС, возбуждающей в проводнике сопротивлением 1 ом, ток силой 1 ампер. Впоследствии 1 вольт обычно определялся через единицу энергии джоуль и единицу заряда кулон.

В Международную систему единиц (СИ) вольт введен решением XI Генеральной конференции по мерам и весам в 1960 году одновременно с принятием системы СИ в целом.

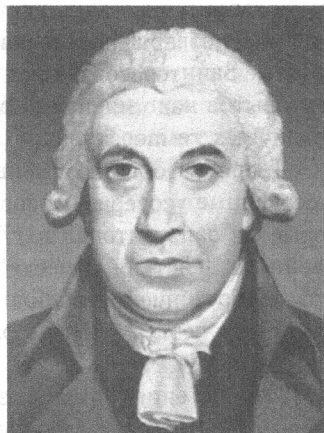
3.6.3. Единица мощности — ватт

Эта единица мощности была названа в честь *Джеймса Уатта* (1736–1819) — шотландского инженера, изобретателя-механика.

Ватт — единица измерения мощности, а также теплового пото-

ка, потока звуковой энергии, мощности постоянного электрического тока, активной, реактивной и полной мощности переменного электрического тока, потока излучения и потока энергии ионизирующего излучения.

Джеймс Уатт родился 19 января 1736 года в Гриноке. Имел от рождения хрупкое здоровье, в результате получил домашнее образование. Будучи подростком, он увлекался астрономией, химическими опытами, научился все делать своими руками, за что получил от окружающих звание «мастера на все руки». Отец подарил ему набор столярных инструментов, и Джеймс изготавливал модели механизмов и устройств, создаваемых отцом.



Джеймс Уатт

Однако в дальнейшем судьба Уатта оказалась весьма сложной. В возрасте восемнадцать лет он был вынужден заботиться о себе сам. Он решил, заняться ремеслом, связанным с измерительными приборами. Для освоения профессии Уатт на год отправляется в Лондон. Он оказался в Лондоне на нелегальном положении, так как официально в ученики его не зачислили. Курс обучения был рассчитан на семь лет, а Уатту удалось собрать сумму денег всего на один год обучения.

Уатт не жалея себя погружается в работу, отдавая ей все силы. Начав с изготовления обычных линеек и циркулей, он быстро переходит все к более сложным инструментам. Скоро он в силах изготовить квадрант, теодолит и другие инструменты.

Не закончив обучения, с ослабленным здоровьем, он возвращается в Шотландию, в Глазго, с намерением основать собственное дело. Он начинает заниматься созданием и починкой октантов, линеек и барометров, частей для телескопов и прочих инструментов. Однако союз ремесленников Глазго запрещает Уатту заниматься его работой, так как он, по сути, не получил соответствующего обучения согласно цеховым порядкам, и это несмотря на то, что он был единственным мастером такой квалификации в Шотландии.

Из безвыходного положения Уатта спасает случай. В университет Глазго поступает партия астрономических инструментов. Основа будущей обсерватории Макфарлейна, эти инструменты требовали чистки, установки, настройки. Уатт получает работу по приведению инструментов в порядок. Для этого он создает при университете ма-

ленькую мастерскую. Его назначают мастером научных инструментов при университете.

В 1759 году Уатт заинтересовался вопросом использования пара как источника двигательной энергии. Паровая машина Ньюкомена существовала уже пятьдесят лет, однако за все это время она ни разу не была усовершенствована, и мало кто разбирался в принципе ее работы. Заинтересовавшись научной стороной вопроса Уатт проводит ряд опытов над кипением воды, изучает упругость водяных паров при различных температурах.

Теоретические и опытные изыскания позволили Уатту внести существенные усовершенствования в конструкцию паровой машины, которые он запатентовал в 1769 году. А в 1782 году изобрел машину двойного действия. Вместе с более мелкими усовершенствованиями это изобретение позволило увеличить производительность паровой машины в четыре и более раз. Кроме того, сама машина стала легко управляемой.

Изобретения Уатта вызвали для него ряд проблем. Появилось множество подделок зачастую весьма плохого качества. Начались судебные разбирательства, которые вызывали существенные финансовые издержки.

В это время Российская академия наук пригласила Уатта работать в России. Русское правительство предложило английскому инженеру «занятие, сообразное с его вкусом и познаниями» и с ежегодным жалованьем в 1000 фунтов стерлингов. Намерение Уатта уехать в Россию вызвало переполох и ему были созданы соответствующие условия.

На склоне лет Уатт много занимался придуманной им машиной для копирования скульптурных произведений. Сам изобретатель называл ее «эйдогографом». Это механическое приспособление позволяло копировать барельефы, медальоны, статуи, бюсты, сосуды и прочие вещи самой сложной формы с высокой точностью.

Вскоре после смерти в Вестминстерском аббатстве был воздвигнут величественный памятник Уатту, выполненный талантливым скульптором Френсисом Легатом Чантри. Впоследствии памятник был перемещен в Собор Святого Павла. Имя Уатта носит колледж в Гриноке и мемориальная библиотека, основанию которой он способствовал. Он был избран членом Эдинбургского королевского общества (1784), Лондонского королевского общества (1785), Парижской академии наук (1814).

С 2009 года в Англии находится в обращении банкнота в 50 фунтов с изображением Уатта и Болтона.

Уатт был разносторонне одарен, легко изучал языки, много читал.

Вальтер Скотт в предисловии к одному из своих романов выражает удивление разнородности познаний Уатта, которого он знал в последние годы его жизни.

Единица измерения мощности «ватт» была введена в 1861 году комитетом электрических эталонов, а приборы для измерения мощности называются «ватметрами». Условное международное обозначение ватта «W», русское — «Вт». В настоящее время в Международной системе единиц (СИ) ватт — единица измерения мощности постоянного и переменного электрического тока, а также потоков звуковой энергии и энергии ионизирующего излучения.

3.6.4. Единица частоты — герц

Эта единица измерения частоты была названа в честь *Генриха Рудольфа Герца* (1857–1894) — немецкого физика.

Генрих Рудольф Герц родился 22 февраля 1857 года в Гамбурге. Он окончил Берлинский университет, где его учителями были Герман фон Гельмгольц и Густав Кирхгоф. С 1885 по 1889 год был профессором физики Университета в Карлсруэ. С 1889 года — профессор физики университета в Бонне.



Генрих Рудольф Герц

В Берлине произошла встреча Генриха Герца с замечательным ученым и человеком, выдающимся естествоиспытателем того времени, ученым Германом Гельмгольцем. Гельмгольц, под руководством которого Герц начал работать в практикуме, впоследствии вспоминал: «Уже из знакомства с его элементарными работами я убедился, что имею дело с человеком, одаренным действительно выдающимися способностями. В конце лета мне пришлось предложить студентам тему для научной работы. Я остановился на области электродинамики, так как я был уверен, что Герц заинтересуется этой темой, и работа его будет плодотворной. Действительность оправдала мое предположение». Позже Гельмгольц даже называл Герца «любимцем богов». Генрих Герц был не только гениальным экспериментатором, но и теоретиком и математиком высочайшего класса.

В период с 1885 по 1889 годы Герц, работая профессором физики технического университета в Карлсруэ, провел свои знаменитые опыты по распространению электрической силы, доказавшие реальность

электромагнитных волн. Источниками электромагнитного излучения у него были искры в разрядниках. Электромагнитные волны от разрядников вызывали искровые разряды между шариками в «приемниках» — расположенных в нескольких метрах контурах, настроенных в резонанс. Герцу удалось не только обнаружить волны, в том числе и стоячие, но и исследовать скорость их распространения, отражение, преломление и даже поляризацию.

В 1887 году по завершении опытов вышла первая статья Герца «Об очень быстрых электрических колебаниях», а в 1888 году — еще более фундаментальная работа «Об электродинамических волнах в воздухе и их отражении». Даже на теоретическом уровне достижения Герца были сразу отмечены учеными как начало новой электрической эры». Результаты, полученные Герцем, легли в основу создания радио.

В 1886–87 годах Герц впервые наблюдал и дал описание внешнего фотоэффекта. Герц разрабатывал теорию резонансного контура, изучал свойства катодных лучей, исследовал влияние ультрафиолетовых лучей на электрический разряд. В ряде работ по механике дал теорию удара упругих шаров, рассчитал время соударения и т. д. В книге «Принципы механики» (1894) дал вывод общих теорем механики и ее математического аппарата, исходя из единого принципа (принцип Герца).

Научные заслуги Генриха Рудольфа были признаны научной общественностью. В 1889 г. Итальянское общество наук в Неаполе наградило его медалью имени Маттеучи, Парижская академия наук — премией Лаказа, а Венская императорская академия — премией Баумгартнера. Через год Лондонское королевское общество награждает Герца медалью Румфорда, а в 1891 г. Королевская академия в Турине — премией Бресса. Прусское правительство награждает его орденом Короны. Кроме того, Герц был удостоен японского ордена Священного сокровища.

18 декабря 1897 года изобретатель радио Александр Попов передал с помощью телеграфного аппарата, присоединенного к прибору, слова «Генрих Герц», которые являются одними из первых слов, переданных по радио.

В 1957 году в ФРГ была выпущена почтовая марка с изображением Генриха Герца, а в 1969 году в Восточной Германии была выпущена памятная медаль в его честь. В 1987 году IEEE учредила Медаль Генриха Герца «за выдающиеся достижения в изучении волн Герца», присуждаемая ежегодно ученым-теоретикам и экспериментаторам.

В честь Герца назвали кратер, который находится на востоке обратной стороны Луны. В России в Нижнем Новгороде в честь Герца назван городской рынок радиоэлектроники. Городская телерадиоком-

муникационная башня в Гамбурге названа в честь знаменитого уроженца города.

В 1930 году Международная Электротехническая Комиссия в честь Герца установила новую единицу измерения — герц (Гц), применяемую как мера количества повторяющихся событий в единицу времени (ее также называют «количество циклов в секунду»). Она была принята Международным бюро мер и весов в 1964 году как единица частоты в системе СИ.

Итак, герц (русское обозначение «Гц», международное обозначение «Hz») — единица частоты периодических процессов в Международной системе единиц (СИ). Герц — производная единица, имеющая специальные наименование и обозначение. Через основные единицы СИ герц выражается следующим образом: $1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$, т.е. 1 Гц означает одно колебание в секунду.

3.6.5. Единица измерения индуктивности — генри

Эта единица измерения индуктивности (система СИ) была названа в честь *Джозефа Генри* (1797–1878) — американского ученого.

Джозеф Генри родился в городе Олбани (штат Нью-Йорк) в бедной семье возчика. Джозеф рано потерял отца. В остальные годы своего детства, жил со своей бабушкой в Голуэе (штат Нью-Йорк). Его отправили учиться в школу, которая позже была переименована в его честь: «Начальная школа им. Джозефа Генри».

Однажды Генри случайно через подземный ход попал в церковный подвал, заставленный шкафами с книгами. Едва умея читать, он начал листать все книги подряд. Подвал-библиотека стал местом его постоянных самостоятельных занятий. Вспоминая свою юность, Генри подчеркивал, что он был «главным образом, самоучкой».

После школы он в возрасте 13 лет работал подмастерьем у часовщика. Но в 16 лет у него появился интерес к науке после случайного прочтения книги «Популярные лекции по экспериментальной философии». В 1819 году он поступил в Академию Олбани, где обучался бесплатно. Он был настолько беден, что даже при бесплатном обучении ему приходилось подрабатывать репетиторством.

Джозеф Генри превосходно учился и часто помогал своими учи-



Джозеф Генри

телям в преподавании. В 1826 году он был назначен профессором математики и естественной философии в Академии Олбани. Некоторые из своих самых значимых исследований он выполнил, занимая эту новую должность.

Значительное внимание Генри уделял экспериментальному исследованию магнетизма. Он был первым, кто применил технологию создания электромагнита с использованием обмоток из изолированного провода, намотанного на железный сердечник. Генри удалось создать самый мощный электромагнит того времени. С присущим ему мастерством он создал многовитковые электромагниты, названные «уплотненными». В процессе многочисленных экспериментов он изменял количество и схему подключения катушек к двум гальваническим батареям и сумел создать «силовые» электромагниты с фантастической подъемной силой — от 30 до 325 кг при собственном весе магнита 10 кг.

В 1831 г. Генри создал для Йельского колледжа большой электромагнит с силой тяги 1000 кг (в настоящее время он хранится в Смитсоновском институте в Вашингтоне). Успешные эксперименты Генри привлекли внимание европейских ученых. В частности, петербургский академик Б. С. Якоби полагал, что «построить постоянный стальной магнит с подобным соотношением масс практически невозможно». Высокую оценку работам Генри дали Фарадей и Ленц. Впоследствии мало кому удалось превзойти достигнутые им результаты.

Вскоре электромагниты Генри получили практическое применение в промышленности. Так, в 1831 г. на одном из металлургических заводов в штате Нью-Йорк электромагнит использовался для сепарации железной руды.

Создавая магниты, Генри открыл новые явления в электромагнетизме — самоиндукцию и взаимную индукцию. Его работы по электромагнитным реле были основой для электрического телеграфа, изобретенного позднее.

Поразителен диапазон научных экспериментов Генри.

Генри первым обнаружил колебательный характер искрового разряда конденсатора, что по достоинству было оценено лишь полвека спустя при зарождении электросвязи и радиотехники.

Генри впервые создает и использует в физических экспериментах плоские катушки индуктивности, изготовленные из «полосовой меди», что позволяет ему добиваться больших эффектов, чем от обычных проволочных соленоидов. С помощью таких катушек Генри удалось исследовать еще одно ранее неизвестное явление — взаимную индукцию. Весь этот цикл исследований Генри отразил в трех статьях «Об электрической индукции» в 1838–1840 гг.

В 1844 г. Генри провел еще один важный эксперимент: в физическом корпусе колледжа на основе искрового разряда колебательно-го характера, что позволяют считать его одним из пионеров, заложивших основы учения об электромагнитных волнах. Заметим, что известный исследователь электромагнитных волн немецкий физик Г. Герц родился 15 лет спустя после открытия Генри колебательно-го характера искрового разряда.

Следующей областью приложения его талантов стала электро-связь. В то время в США использовался примитивный семафорный телеграф, не отвечавший потребностям в быстрой и надежной даль-ней связи. Первый электромагнитный аппарат, созданный Генри, был способен передавать информацию, по словам ученого, «...с быстротой мысли».

В последующем Генри конструированием телеграфов не занимал-ся. Однако известно, что один из изобретателей телеграфа С. Морзе, не имевший технического образования, в 1837 г. неоднократно приез-жал к Генри и что тот надоумил Морзе, «как действовать дальше». Генри, «ничего не тая», показал ему в действии свои схемы с элек-тромагнитами. Позднее Морзе использовал полученные сведения в своих патентах без указания источника. Следует заметить, что Генри не патентовал свои открытия.

В 1846 г. Генри был единогласно избран «секретарем-директором» крупнейшего научного центра Америки — Смитсоновского института, возглавил работы по геофизике и метеорологии. Федеральные вла-сти считали, что прогнозы погоды, необходимые для нужд сельского хозяйства, были более важными, чем «туманные обещания» физиков-теоретиков.

В Международную систему единиц (СИ) генри введен решением XI Генеральной конференцией по мерам и весам в 1960 году одновре-менно с принятием системы СИ в целом.

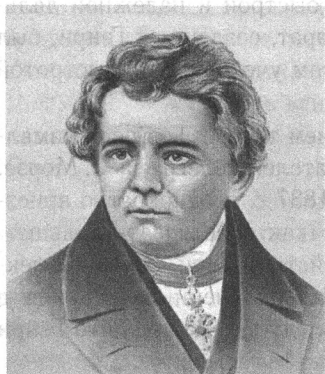
Итак, генри (русское обозначение «Гн», международное — «Н») — единица измерения индуктивности в Международной системе единиц (СИ). Цепь имеет индуктивность один генри, если изменение тока со скоростью один ампер в секунду создает ЭДС индукции, равную одному вольту.

3.6.6. Единица измерения электрического сопротивления — ом

Ом — единица измерения в Международной системе единиц (СИ), названная в честь *Георга Симона Ома* (1789–1854), знаме-нитого немецкого физика.

Георг Симон Ом родился 16 марта 1789 года в немецком Эрлан-гене (тогда часть Священной Римской империи). Мать Георга про-

исходила из семьи портного, она умерла, когда Георгу исполнилось девять лет. Отец его — слесарь Иоганн Вольфганг, весьма развитой и образованный человек, с детства занимался образованием сына, и самостоятельно преподавал ему математику, физику и философию. Он отправил Георга учиться в гимназию, которая курировалась университетом. По окончании курса в 1805 году Ом начал изучать математические науки в Эрлангенском университете. Уже после трех семестров в 1806 году, бросив университет, принял место учителя в монастыре Готтштадт (ныне в составе швейцарской коммуны Орпунд).



Георг Симон Ом

В 1809 году покинул Швейцарию и, поселившись в Нейенбурге, всецело посвятил себя изучению математики. В 1811 году вернулся в Эрланген, уже в том же году сумел закончить университет, защитить диссертацию и получить ученую степень доктора философии. Более того, ему тут же была предложена в университете должность приват-доцента кафедры математики. В этом качестве он проработал до 1813 года, когда принял место преподавателя математики в Бамберге (1813–1817), откуда перешел на такую

же должность в Кельне (1817–1828). Во время пребывания в Кельне опубликовал свои знаменитые работы по теории гальванической цепи.

В Кельне в промежутках между уроками он занимался гальваническими опытами, пытаясь выяснить, как зависит действие гальванической батареи от качества и от рода металла, из которого сделана замыкающая ее полюсы проволока.

В 1826 году Ом экспериментально открыл основной закон электрической цепи, связывающий между собой силу тока, электродвижущую силу и сопротивление. Этот закон — закон Ома — был сформулирован им в работе «Определение закона, по которому металлы проводят электричество». В 1827 году ученый обосновал его теоретически для участка и для полной цепи. В своей маленькой лаборатории в Кельне он соорудил конструкцию, состоявшую из висмутного стержня, впаянного между двумя медными проволоками. Опустив один из спаев в кипящую воду, а другой — в мелко наколотый лед, Георг Ом скоро пришел к выводу, что между движением электрического тока и водного потока в наклонном русле существует аналогия. Чем больше перепад уровней в русле и свободнее путь, тем поток воды сильнее. Так же происходит и с электрическим током: сила тока

будет тем больше, чем большей электродвижущей силой обладает батарея и чем меньше сопротивление току на его пути. В этом же году Ом ввел понятия «электродвижущей силы», «падения напряжения» и «проводимости».

Закон Ома долгое время не находил себе применения, хотя установленные в нем количественные соотношения между параметрами электрической цепи открыли широкие возможности в изучении электричества. К результатам работ немецкого ученого относились благосклонно местные физики, но ни в одной другой стране они не были известны.

Ом формулирует свой знаменитый закон в 1826 году и затем все свои работы по этому вопросу объединяет в книге, изданной в 1827 г., в которой дает теоретический вывод своего закона, исходя из теории, аналогичной теории теплопроводности Фурье. Несмотря на важность этих работ, они прошли незамеченными и были встречены даже враждебно.

Однако в октябре 1831 года профессор прикладной физики Парижской школы искусств и ремесел Клод Серве Пулье сообщил Французской академии, что нашел количественное соотношение между током, электродвижущей силой и сопротивлением, не упоминая имени Ома. Но затем он был вынужден признать, что читал сочинение немецкого физика о гальванической цепи и согласен с тем, что этот закон первым сформулировал Георг Симон Ом. Эта скандальная история способствовала тому, что о работах Ома узнали и другие французские, а затем английские физики.

Значение закона Ома стало несомненным только после того, как выдающиеся русские ученые Эмилий Христианович Ленц и Борис Семенович Якоби, немецкие ученые Карл Фридрих Гаусс, Густав Роберт Кирхгоф и некоторые другие положили этот закон в основу своих исследований.

Несмотря на открытие количественного закона, Георг Ом продолжал оставаться скромным учителем. В возрасте 44 лет (в 1833 году) он получает место профессора физики Нюрнбергской высшей политехнической школы, а в 1839 году становится ее ректором. Лондонское королевское общество в 1841 году наградило его медалью Копли. В 1849 году ученого пригласили в Мюнхенский университет на должность экстраординарного профессора, а в 1852 году, когда Ому было 63 года, он стал профессором. Всю жизнь Георг Симон Ом был великим тружеником, но его преследовали неудачи.

Научные интересы Ома распространялись также и на акустику, оптику, кристаллооптику. Ему принадлежит мысль о сложном составе звуков. В частности, в 1843 году Ом установил, что простейшие

слуховые ощущения вызываются лишь гармоническими колебаниями. Ухо способно разлагать сложные звуки на синусоидальные составляющие, и они воспринимаются как основной тон, и добавочные — обертоны. В этом состоит акустический закон Ома. Однако эти труды ученого признания не получили, и только через восемь лет после его смерти его соотечественник Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц смог доказать справедливость выводов Ома. Позже, основываясь на акустическом законе Ома, Гельмгольц разработал резонансную теорию слуха. В 1842 году Ом был избран членом Лондонского королевского общества.

В 1881 году на международном конгрессе электриков в Париже решено было назвать его именем теперь общепринятую единицу электрического сопротивления «ом». В Международную систему единиц (СИ) ом введен решением XI Генеральной конференцией по мерам и весам в 1960 году одновременно с принятием системы СИ в целом.

Итак, ом — единица измерения электрического сопротивления в Международной системе единиц (русское обозначение «Ом», международное обозначение «Ω»). Ом равен электрическому сопротивлению проводника, между концами которого возникает напряжение 1 вольт при силе постоянного тока 1 ампер.

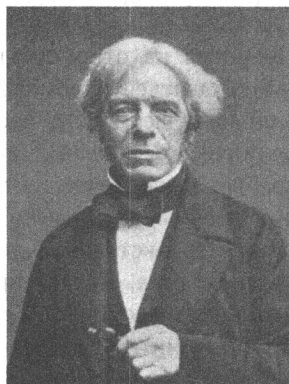
3.6.7. Единица измерения электрической емкости — фарад

Фарад — единица измерения электрической емкости, названа в честь *Майкла Фарадея* (1791–1867) — английского физика, члена Лондонского королевского общества (1824) и множества других научных организаций, в том числе иностранного почетного члена Петербургской академии наук (1830).

Майкл Фарадей родился 22 сентября 1791 года в поселке близ



Молодой Фарадей



Фарадей в последние годы

Лондона (ныне Большой Лондон) в семье кузнеца. Семья жила в нужде, поэтому уже в 13 лет Майкл, оставив школу, начал работать рассыльным в лондонском книжном магазине. После испытательного срока он стал учеником переплетчика.

Фарадей так и не сумел получить систематического образования, но рано проявил любознательность и страсть к чтению. В магазине было немало научных книг, в том числе книги по электричеству и химии. По ходу чтения Фарадей сразу начал проводить простые самостоятельные опыты.

Важным этапом в жизни Фарадея стали посещения Городского философского общества (1810–1811 годы), где 19-летний Майкл по вечерам слушал научно-популярные лекции по физике и астрономии, участвовал в диспутах. Некоторые ученые, посещавшие книжный магазин, отметили способного юношу. В 1812 году один из посетителей, музыкант Уильям Денс, подарил ему билет на цикл публичных лекций в Королевском институте знаменитого химика и физика, первооткрывателя многих химических элементов Гемфри Дэви.

Майкл не только с интересом выслушал, но и подробно записал и переплел четыре лекции Дэви, которые послал ему вместе с письмом с просьбой взять его на работу в Королевский институт. В начале 1813 года Дэви, который был в Институте директором химической лаборатории, пригласил 22-летнего юношу на освободившееся место лаборанта Королевского института.

Уже в это время проявились отличительные черты Фарадея — трудолюбие, методичность, тщательность исполнения экспериментов, стремление проникнуть в сущность исследуемой проблемы. В первой половине XIX века он заслужил славу «короля экспериментаторов». Всю жизнь он вел аккуратные лабораторные дневники своих опытов (изданы в 1931 году). Последний эксперимент по электромагнетизму помечен в соответствующем дневнике номером 16041, всего Фарадей провел за свою жизнь около 30 000 экспериментов.

В 1816 году появилась первая печатная работа Фарадея, в следующие три года число публикаций превысило 40, главным образом по химии. Затем его экспериментальные исследования начали неуклонно перемещаться в область физики. Несколько значительных работ по физике, опубликованных в 1821 году, показали, что Фарадей вполне сложился как крупный ученый. Главное место среди них занимала статья об изобретении электродвигателя, с которой фактически начинается промышленная электротехника.

С 1820 года Фарадея чрезвычайно увлекла проблема исследования связей между электричеством и магнетизмом.

В 1822 году в лабораторном дневнике Фарадея появилась запись:

«Превратить магнетизм в электричество». Рассуждения Фарадея были такими: если в опыте Эрстеда электрический ток обладает магнитной силой, а, по убеждению Фарадея, все силы взаимопревращаемы, то и движение магнита должно возбуждать электрический ток.

Путь к электрогенератору оказался нелегким — первые опыты были неудачны. Главной причиной неудач было незнание того факта, что электрический ток порождается только переменным магнитным полем, причем достаточно сильным (иначе ток будет слишком слаб для регистрации). Для усиления эффекта следовало магнит (или проводник) быстро двигать, а проводник свернуть в катушку. Только десять лет спустя, в 1831 году, Фарадей нашел, наконец, решение проблемы, обнаружив электромагнитную индукцию. С этого открытия начался самый плодотворный период исследований Фарадея (1831–1840), давший научному миру его знаменитую серию статей «Экспериментальные исследования по электричеству» (всего он опубликовал в «Philosophical Transactions» 30 выпусков, выходивших с 1831 по 1835 год). Уже в 1832 году Фарадей за открытие индукции был награжден медалью Копли.

О научном уровне 30 выпусков можно судить по одному из них, имеющем название «О магнитных силовых линиях, определенность их характера и их распределение в магните и в окружающем пространстве» (выпуск №28). Характерна реакция Джеймса Клерка Максвелла: «Способ, которым Фарадей использовал свою идею силовых линий, чтобы координировать явления электромагнитной индукции, доказывает, что он был математиком высокого порядка — одним из тех, у кого математики будущего могут черпать ценные и плодотворные методы».

Сообщения об опытах Фарадея немедленно вызвали сенсацию в научном мире Европы, массовые газеты и журналы также уделяли им немало внимания. Множество научных организаций избрали Фарадея своим почетным членом (всего он получил 97 дипломов). Если открытие электродвигателя показало, как можно использовать электричество, то опыты по индукции указывали, как создать мощный его источник (электрогенератор). С этого момента трудности на пути широкого внедрения электроэнергии стали чисто техническими. Физики и инженеры активно занялись исследованием индукционных токов и конструированием все более совершенных электротехнических устройств; первые промышленные модели появились еще при жизни Фарадея (генератор переменного тока Ипполита Пикси, 1832), а в 1872 году Фридрих фон Хефнер-Альтенек представил высокоэффективный генератор, впоследствии улучшенный Эдисоном.

Несмотря на всемирную славу, Фарадей до конца жизни оставал-

ся скромным добросердечным человеком. Он отклонил предложение возвести его, как ранее Ньютона и Дэви, в рыцарское достоинство, дважды отказался стать президентом Королевского общества (в 1848 и 1858 годах). Во время Крымской войны правительство Великобритании предложило ему участвовать в разработке химического оружия против русской армии, но Фарадей с возмущением отверг это предложение как аморальное. Фарадей вел непритязательный образ жизни и часто отклонял выгодные предложения, если они мешали ему заниматься любимым делом.

В 1862 году он выдвинул гипотезу, что магнитное поле может смещать спектральные линии. Однако оборудование тех лет было недостаточно чувствительно, чтобы обнаружить этот эффект. Только в 1897 году Питер Зеeman подтвердил гипотезу Фарадея, сославшись на него как на автора, и получил в 1902 году за это открытие Нобелевскую премию.

В тот же период Фарадей исследовал наночастицы металла в коллоиде золота и описал их оптические и другие особенности по сравнению с частицами более крупных размеров. Этот опыт может считаться первым вкладом в нанотехнологию. Объяснение замеченным эффектам дала в XX веке квантовая теория.

В 1960 г. в честь Фарадея на XI Генеральной конференции по мерам и весам была принята для системы СИ единица емкости — «фарад».

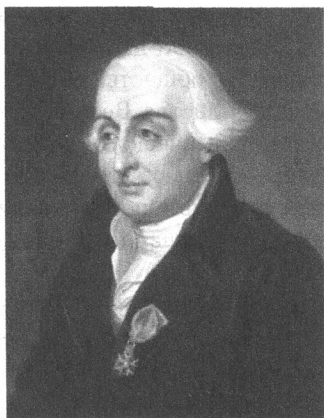
Итак, фарад (русское обозначение «Ф», международное обозначение «F», прежнее название — «фарада») — единица измерения электрической емкости в Международной системе единиц (СИ). 1 фарад равен емкости конденсатора, при которой заряд 1 кулон создает между его обкладками напряжение 1 вольт: $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/1 В}$.

3.6.8. Единица измерения электрического заряда — кулон

Кулон — единица электрического заряда в Международной системе единиц (СИ), названная в честь *Шарля Огюстена де Кулона* (1736–1806).

Шарль Огюстен де Кулон — французский военный инженер и ученый-физик, исследователь электромагнитных и механических явлений, член Парижской академии наук. Он родился в Ангулеме, который находится на юго-западе Франции.

Интерес к математике вызвал решение Кулона стать ученым. Двоюродный брат отца, занимавший видное положение в Монпелье, знал многих членов Королевского научного общества города. Вскоре обществу он представил своего племянника Шарля.



Шарль Огюстен де Кулон

В феврале 1757 г. на заседании Королевского научного общества молодой любитель математики прочел свою первую научную работу «Геометрический очерк среднепропорциональных кривых». Поскольку работа заслужила одобрение членов общества, то вскоре начинающий исследователь был избран адъюнктом по классу математики.

В дальнейшем Шарль Кулон принимал активное участие в работе общества и представил еще пять мемуаров — два по математике и три по астрономии. Его интерес к астрономии был вызван наблюдениями, которые он проводил вместе с другим членом Общества Монпелье — де Раттом. Шарль участвовал в наблюдениях кометы и лунного затмения, результаты которых он и представил в виде мемуаров. Интересовали Кулона и теоретические вопросы астрономии: одна из его работ была посвящена определению линии меридиана.

В 1760 г. Шарль поступил в Мезьерскую школу военных инженеров. В этой школе работали преподаватель математики аббат Шарль Боссю, ставший впоследствии известным ученым, и известный французский естествоиспытатель аббат Нолле. Эти ученые оказали большое влияние на своего ученика.

Последующие десять лет после окончания школы Шарль Кулон работал военным инженером — вначале в порту Брест на западном побережье Франции, затем восемь лет работал на Мартинике. После возвращения во Францию весной 1773 года Кулон представил свой научный мемуар в Парижскую академию наук. Он зачитал мемуар на двух заседаниях Академии в марте и апреле 1773 года. Работа была воспринята с одобрением.

Шарль Кулон продолжил научные исследования в Шербуре. Там он занимался ремонтом ряда фортификационных сооружений. Эта работа оставляла достаточно свободного времени, и молодой ученый продолжил свои научные исследования. Основной темой, которой интересовался в это время Кулон, была разработка оптимального метода изготовления магнитных стрелок для точных измерений магнитного поля Земли. Эта тема была задана на конкурсе, объявленном Парижской академией наук.

Победителями конкурса 1777 года были объявлены сразу двое — шведский ученый ван Швинден и Кулон. Однако для истории науки

наибольший интерес представляет не глава мемуара Кулона, посвященная магнитным стрелкам, а следующая глава, где анализируются механические свойства нитей, на которых подвешивают стрелки. Ученый провел цикл экспериментов и установил общий порядок зависимости момента силы деформации кручения от угла закручивания нити и от ее параметров — длины и диаметра.

Результаты его опытов были обобщены в работе «Теоретические и экспериментальные исследования силы кручения и упругости металлических проволок», законченной в 1784 году. Шарль Кулон провел цикл опытов, в которых изучил важнейшие особенности явления трения. Опыты с металлическими нитями, выполненные Кулоном для конкурса 1777 года, имели важное практическое следствие — создание крутильных весов. Этот прибор мог использоваться для измерения малых сил различной природы, причем он обеспечил чувствительность, беспрецедентную для XVIII века.

Разработав точнейший физический прибор, Кулон применил его для решения проблем электричества и магнетизма. Важнейшим результатом, полученным Кулоном в области электричества, было установление основного закона электростатики — закона взаимодействия неподвижных точечных зарядов. Было дано экспериментальное обоснование знаменитого «закона Кулона»: «Сила отталкивания двух маленьких шариков, наэлектризованных электричеством одной природы, обратно пропорциональна квадрату расстояния между центрами шариков».

В дальнейших работах Кулон исследовал явление утечки электрического заряда. Основным результатом стало установление экспоненциального закона убывания заряда с течением времени и закона распределения заряда между соприкасающимися проводящими телами, а также определение плотности заряда на различных участках поверхности этих тел.

Применительно к магнетизму Шарль Кулон пытался решить те же задачи, что и для электричества. Ученому удалось изучить некоторые своеобразные черты магнетизма.

Таким образом, Кулон заложил основы электростатики и магнетостатики. Им были получены экспериментальные результаты, имеющие как фундаментальное, так и прикладное значение. Для истории физики его эксперименты с крутильными весами имели важнейшее значение еще и потому, что они дали в руки физиков метод определения единицы электрического заряда через величины, использовавшиеся в механике, — силу и расстояние, что позволило проводить количественные исследования электрических явлений.

Кулон ввел понятия магнитного момента и поляризации зарядов.

Уже после революции Академия наук неоднократно вызывала ученого в Париж для участия в определении мер и весов. Кулон стал одним из первых членов Национального института, заменившего Академию.

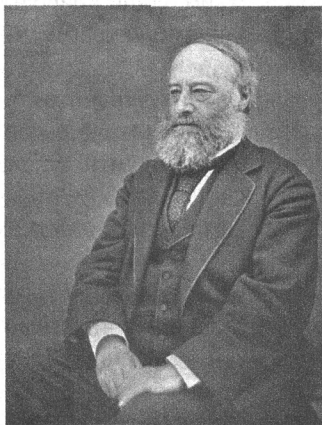
Единица измерения электрического заряда (количества электричества) «кулон» принята в Международной системе единиц (СИ) на XI Генеральной конференции по мерам и весам в 1960 году одновременно с принятием системы СИ в целом.

Впервые в качестве единицы измерения электрического заряда кулон был принят на I-м Международном конгрессе электриков (1881 г., Париж). В 1946 году Международный комитет мер и весов принял современное определение кулона.

Итак, кулон (русское обозначение «Кл», международное — «С») — единица измерения электрического заряда (количества электричества). Кулон — это величина заряда, прошедшего через проводник при силе тока 1 А за время 1 с. Через основные единицы СИ кулон выражается соотношением вида $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}$.

3.6.9. Единица измерения энергии — джоуль

Джоуль — единица измерения энергии (система СИ), названная в честь *Джеймса Прескотта Джоуля* (1818–1889) — английского физика, внесшего значительный вклад в становление термодинамики.



Джеймс Прескотт Джоуль

Джоуль родился в семье зажиточного владельца пивоваренного завода в Солфорде близ Манчестера, получил домашнее образование, притом в течение нескольких лет его учителем по элементарной математике, началам химии и физики был Дальтон. С 1833 года (с 15 лет) работал на пивоваренном заводе и параллельно с обучением (до 16 лет) и занятиями наукой до 1854 года участвовал в управлении предприятием. Первые экспериментальные исследования начал уже в 1837 году, заинтересовавшись возможностью замены паровых машин на пивоварне на

электрические. В 1838 году по рекомендации одного из своих учителей опубликовал первую работу по электричеству в научном журнале *Annals of Electricity*. Работа была посвящена устройству электромагнитного двигателя. В 1840 году обнаружил эффект магнитного насыщения при намагничивании ферромагнетиков и в течение 1840–1845 годов экспериментально изучал электромагнитные явления.

Изыскивая лучшие способы измерения электрических токов, Джеймс Джоуль в 1841 году открыл названный его именем закон, устанавливающий квадратичную зависимость между силой тока и выделенным этим током в проводнике количеством теплоты (в русской литературе фигурирует как закон Джоуля – Ленца, так как в 1842 году независимо этот закон был открыт российским физиком Ленцем).

В работах начала 1840-х годов исследовал вопрос экономической целесообразности электромагнитных двигателей.

В 1842 году обнаруживает и описывает явление магнитострикции, заключающееся в изменении размеров и объема тела при изменении его состояния намагниченности. В 1843 году формулирует и публикует окончательные результаты работ по исследованию тепло-выделения в проводниках, в частности, экспериментально показывает, что выделяемое тепло никоим образом не забирается из окружения, что бесспорно опровергало теорию теплорода, сторонники которой все еще оставались в то время. В том же году заинтересовался общей проблемой количественного соотношения между различными силами, приводящими к выделению теплоты и, придя к убеждению в существовании определенной зависимости между работой и количеством теплоты, стал искать численное соотношение между этими величинами — механический эквивалент тепла.

В 1847 году Джоуль знакомится с Томсоном, который дает высокую оценку экспериментальной технике Джоуля и с которым впоследствии плодотворно сотрудничает. Во многом под влиянием Джоуля формируются и представления Томсона о вопросах молекулярно-кинетической теории. В первых же совместных работах Томсон и Джоуль создают термодинамическую температурную шкалу.

В течение 1843–1850 годов проводит серию экспериментов, непрерывно совершенствуя экспериментальную технику и каждый раз подтверждая принцип сохранения энергии количественными результатами. Джоуль внес значительный вклад в технику физического эксперимента, усовершенствовал конструкции многих измерительных приборов.

К концу 1840-х годов работы Джоуля получают всеобщее признание в научном сообществе, и в 1850 году он избран действительным членом Лондонского королевского общества.

В 1850-е годы публикует большую серию статей об измерениях. Основное внимание уделяется их совершенствованию. Он предложил новые конструкции вольтметров, гальванометров, амперметров, обеспечивающих высокую точность измерений. В течение всей научной практики Джоуль уделял значительное внимание экспериментальной технике, позволяющей получать высокоточные результаты.

В 1867 году Джоуль по схеме, предложенной Томсоном, проводит для Британской научной ассоциации измерения эталона механического эквивалента теплоты, но получает результаты, расходящиеся со значениями, получающимися из чисто механических опытов, однако уточнение условий механических экспериментов подтвердили точность измерений Джоуля и в 1878 году эталон сопротивления был пересмотрен.

В честь Джоуля названа единица измерения энергии — джоуль. Джоуль был введен в абсолютные практические электрические единицы в качестве единицы работы и энергии электрического тока на Втором международном конгрессе электриков, проходившем в год смерти Джеймса Джоуля (1889). Международная конференция по электрическим единицам и эталонам (Лондон, 1908) установила «международные» электрические единицы, в том числе «международный джоуль».

В Международную систему единиц (СИ) джоуль введен решением XI Генеральной конференции по мерам и весам в 1960 году одновременно с принятием системы СИ в целом.

Итак, джоуль (англ. Joule; русское обозначение «Дж»; международное — «J») — единица измерения работы, энергии и количества теплоты в Международной системе единиц (СИ). Джоуль равен работе, совершаемой при перемещении точки приложения силы, равной одному ньютону, на расстояние одного метра в направлении действия силы. В электричестве джоуль означает работу, которую совершают силы электрического поля за 1 секунду при напряжении в 1 вольт для поддержания силы тока в 1 ампер.

3.6.10. Единица измерения индукции магнитного поля — тесла

Тесла — единица измерения индукции магнитного поля (система СИ), названа в честь изобретателя *Николы Теслы* (1856–1943).

Николе Тесла принадлежит большое количество изобретений, навсегда изменивших наш мир. Тесла родился в селе Смиляны 10 июля 1856 года в семье сербского православного священника Милутина Теслы. В настоящее время Смиляны находятся на территории Хорватии, а в то время это местечко размещалось в имперской Австро-Венгрии.

Окончив начальную школу и трехлетнюю нижнюю реальную гимназию, осенью 1870 года он поступил в Высшее реальное училище, расположенное в городе Карловац. В Карловаце Тесла много занимался математикой и физикой.

В 1875 году Никола Тесла поступил в Высшее техническое училище в Граце (ныне Грацкий технический университет). Можно сказать, что с этого момента жизнь Теслы окончательно повернулась в новое русло. На втором курсе Тесла смог ознакомиться с тогдашним

чудом техники — динамо-машиной Грамме, использующей постоянный ток. Коллектор машины, состоявший из нескольких проволочных щеток, сильно искрил. Никола Тесла, очень быстро понял, что машину можно усовершенствовать — отказаться от коллектора и применить переменный ток.

Свою идею Тесла высказал профессору Пешлю, который прямо на лекции подверг Николу резкой критике, назвав идею серба утопической. Однако это лишь раззадорило Теслу, и последующие годы учебы Никола потратил на обдумывание проблемы генератора переменного тока.

У Теслы был необычный дар: он в уме мог представить какой-либо прибор либо устройство, мысленно отtestировать его, чтобы затем воплотить в реальности уже полностью готовым к эксплуатации.

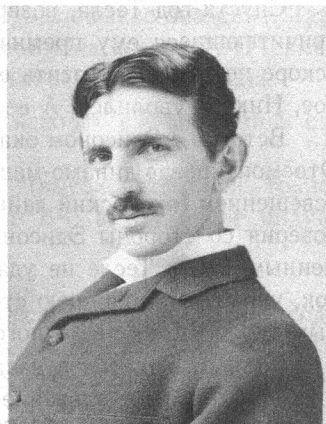
Не окончив училище, в начале 1881 года Тесла переехал в Венгрию. В Будапеште он получает должность чертежника и проектировщика в инженерном отделении Центрального телеграфа.

С открытием в Будапеште американской телефонной станции Тесла получает возможность вплотную заняться изучением многих прогрессивных изобретений того времени. По долгу службы Никола проверяет и ремонтирует телефонные линии, совершенствует аппаратуру. Но все свои основные силы Тесла направлял на создание электродвигателя, работающего от переменного тока. Несмотря на созревшее решение в голове ученого, практически воплотить его никак не удавалось.

В тот период мысль Теслы работала с такой интенсивностью, что за неполные два месяца ученый в уме создал «практически все виды моторов и все модификации системы», ассоциируемые с Тесла. Это были как однофазные, так многофазные моторы. Революционность изобретения Теслы заключалась в том, что теперь электричество можно было подавать на сотни километров, запитывая бытовые приборы и фабричные машины, а не используя лишь для освещения зданий.

В апреле 1882 г. Тесла направился в Париж, где встретил Чарльза Бечлора, управляющего Континентальной компании Томаса Эдисона. В эту компанию его и приняли на работу.

Весной 1883 года Теслу направили в Страсбург. Там он следил за



Никола Тесла

возведением электростанции, попутно занимаясь выявлением дефектов, допущенных при строительстве. В Страсбурге Никола пробыл долго, потому успел сконструировать двигатель, работающий от переменного тока. Устройство было показано меру города Баузену, но тот так и не нашел для молодого ученого спонсоров.

Спустя год Тесла, возвратившись в Париж, попытался получить причитающиеся ему премиальные в размере 25 тысяч долларов, но вскоре понял, что платить ему никто не собирается. Задетый за живое, Никола уволился. А весной 1884 года Тесла отправился в США.

Встреча с Эдисоном оказала на Теслу неизгладимое впечатление. Отремонтировав динамо-машины на первом пароходе с электрическим освещением (океанский лайнер «Орегон»), Тесла добился уважения и доверия со стороны Эдисона. Однако заинтересовать Эдисона переменным током Тесле не удалось. Эдисон свято верил в постоянный ток, испытывая крайнюю степень неприязни к другим, более известным апологетам переменного.

Уйдя от Эдисона в начале 1885 года, Никола Тесла отправился в самостоятельное плавание по жизни. Первые два года были весьма тяжелыми, но в апреле 1887 года Тесла при поддержке единомышленников основал «Тесла арк лайт компани». Благодаря «компьютерному» мозгу серба компания «Тесла арк лайт компани» стремительно набрала обороты и стала «смертельным» конкурентом компании Томаса Эдисона. Последний тратил уйму времени и денег на эксперименты, а Тесла словно играючи воплощал в жизнь устройство за устройством, каждое из которых оказывалось гораздо экономичнее эдисоновских. В «войне токов», как остроумно называли в американских СМИ конкурентную борьбу Теслы и Эдисона, явный перевес был на стороне «сумасшедшего серба».

16 мая 1888 года Тесла докладывал о своем генераторе переменного тока аудитории Американского института инженеров-электриков. Это было знаменательное событие как для самого ученого, так и для общественности. Находившийся на докладе миллионер-изобретатель Джордж Вестингауз (он создал гидравлический паровозный тормоз) тут же предложил Тесле миллион долларов и авторские отчисления за будущие патенты.

Открывшиеся знания позволяли Тесле совершать и демонстрировать невероятные эксперименты. Тесла с удовольствием пользуется возможностью показать всю мощь своих изобретений и познаний. В 1892 году, читая лекцию об электромагнитном поле высокой частоты перед учеными Королевской академии Великобритании, Тесла зажег в своих руках электрические лампочки. Электрогенератор при этом не был подключен к ним проводами. Некоторые лампы не имели

даже спирали — высокочастотный ток проходил через тело изобретателя. Восхищению ученых не было предела, и после лекции физик Джон Релей торжественно усадил Теслу в кресло самого Фарадея, сопроводив свое действие словами: «Это кресло великого Фарадея. После его смерти в нем никто не сидел».

Изобретения Теслы имели большое практическое значение. Так, например, в 1895 году была введена в строй Ниагарская ГЭС (самая большая в мире), и работала она с помощью генераторов Тесла.

Не подлежат сомнению 10 наиболее важных изобретений и открытий Николы Теслы.

1. Высокочастотная электротехника (высокочастотный трансформатор, электромеханический генератор ВЧ, в том числе индукторного типа).

2. Многофазный электрический ток.

3. Радиосвязь и мачтовая антенна для радиосвязи. В 1891 году Тесла во время публичной лекции описал и показал принципы радиосвязи, а в 1893 году создал мачтовую антенну для беспроводной радиосвязи.

4. Катушки Теслы. По сей день используются для получения искусственных молний.

5. Применение электротехнических аппаратов в медицинских целях. Тесла обнаружил, что высокочастотные токи большого напряжения (до 2 миллионов вольт) способны благотворно воздействовать на кожу, в частности, убивать микробы и очищать поры.

6. Явление вращающегося магнитного поля (описано Теслой в 1888 году).

7. Асинхронный электродвигатель (запатентован в 1888 году).

8. Первым (или одним из первых) наблюдал и описал катодные, рентгеновские лучи и ультрафиолетовое излучение.

9. Флюоресцентная лампа (спроектировал первым).

10. Радиоуправляемая лодка (продемонстрирована в 1898 году).

В Международную систему единиц (СИ) единица измерения индукции магнитного поля «тесла» введена решением XI Генеральной конференции по мерам и весам в 1960 году одновременно с принятием СИ в целом. Единица названа в честь Теслы.

Итак, тесла (русское обозначение «Тл», международное — «Т») — единица измерения индукции магнитного поля в Международной системе единиц (СИ), равная индукции такого однородного магнитного поля, в котором на 1 метр длины прямого проводника, перпендикулярного вектору магнитной индукции, с током силой 1 ампер действует сила 1 ньютон.

3.6.11. Единица измерения электрической проводимости — сименс

Сименс — единица измерения электрической проводимости в Международной системе единиц (СИ). Названа в честь *Эрнста Вернера фон Сименса* (1816–1892) — известного немецкого инженера, изобретателя, ученого, промышленника, основателя фирмы Siemens, общественного и политического деятеля.



Эрнст Вернер фон Сименс

Вернер Сименс родился 13 декабря 1816 года в Ленте близ Ганновера. Он был четвертым ребенком из 14 в семье фермера Христиана-Фердинанда Сименса.

Окончив с отличием гимназию «Катаринеум» в Любеке, затем артиллерийское инженерное училище в Магдебурге, он в звании лейтенанта служил в артиллерийских мастерских в Берлине, где занимался изобретательством и научными опытами.

После смерти родителей 24-летний Вернер остается старшим в семье, состоящей из десяти братьев и сестер.

В 1845 г. он становится одним из наиболее заметных молодых ученых в недавно образованном Физическом обществе, и уже в следующем году его откомандировывают в комиссию генштаба для подготовки внедрения электротелеграфии. В письме от 14 декабря 1846 г. Вернер Сименс сообщает родственникам: «Я теперь почти решился избрать постоянное поприще в телеграфии... Телеграфия станет самостоятельной важной отраслью техники, и я чувствую себя призванным сыграть в ней роль организатора».

Сименс, сочетая научные исследования и изобретательскую деятельность с опытно-конструкторскими разработками, внедрял в производство новые и совершенствовал выпускаемые изделия.

Его доклад об электротелеграфии в Парижской академии наук был высоко оценен Гумбольдтом и опубликован по рекомендации Араго. В возрасте 35 лет Сименс вошел в ряды всемирно признанных авторитетов в области электротехники. В 1860 г. Берлинский университет присвоил ему звание почетного доктора философии. В 1868–1870 гг. фирма S&H участвовала в сооружении Индоевропейской телеграфной линии Лондон — Калькутта протяженностью 11 000 км. Один из участков этой линии (через Кавказ) был построен на железных опорах и проработал с 1871 по 1931 г.

Ко второй половине 1860-х годов относится начало работ Сименса в области си́льноточной электротехники. Его самое значительное достижение в этой области датируется 1867 г., когда он создал совершенную конструкцию генератора постоянного тока с самовозбуждением, долгое время именовавшуюся динамо-машиной. Он же предложил ртутную единицу сопротивления, впоследствии преобразованную в ом, а единице электрической проводимости было присвоено наименование «сименс».

В начале 1870-х годов S&N построила кабельное судно «Фарадей», оснащенное усовершенствованной кабелеукладочной машиной. В 1874 г. «Фарадей» проложил трансатлантический телеграфный кабель, напрямую связавший Ирландию и США (5700 км), минуя остров Ньюфаундленд. А всего за 10 лет это судно проложило шесть трансатлантических кабелей.

В июле 1874 г. Сименс был принят в члены Прусской академии наук.

В 1877 г. фирма S&N изготавливала телефонные трубки Белла, а в 1881 г. участвовала в строительстве первой в Берлине телефонной станции.

Почти всеми успехами предприятия Сименса обязаны исследовательским и изобретательским способностям своего руководителя. Он отклонял все, что не было всесторонне рассмотрено теоретически и подтверждено экспериментом.

Динамо-машина Сименса произвела настоящую революцию в горном деле, благодаря ей появились электроотбойный молоток, шахтный электровентилятор, электротранспортер и, главное, электрическая рудничная дорога.

В 1879 г. фирма S&N представила на берлинской промышленной выставке первую электрическую железную дорогу; в 1880 г. на выставке в Мангейме — первый в мире электролифт; в 1881 г. ею построена первая линия электрического трамвая на окраине Берлина; в 1882 г. начата опытная эксплуатация безрельсового транспорта.

На Первой Международной электротехнической выставке в Париже в 1881 г. наибольший успех выпал на долю экспонатов Эдисона и Сименса. В 1882 году Сименс был избран членом-корреспондентом Петербургской академии наук. В 1888 г. Вернер Сименс был возведен в дворянское сословие и стал Вернером фон Сименсом.

С 1889 года начался постепенный отход Вернера Сименса от активного участия в делах фирмы, в это время в его фирме, включая дочерние предприятия в Лондоне, Санкт-Петербурге и Вене, насчитывалось уже 5000 сотрудников. 31 декабря 1889 года Сименс вышел из руководства фирмой.

На последнем году жизни в 1892 г. он изобрел стальную ленточную броню для защиты подземных кабелей от механических воздействий.

Наименование «сименс» для единицы электрической проводимости в СИ принято XIV Генеральной конференцией по мерам и весам в 1971 году. Раньше применялось название «мо», представляющее собой прочитанное назад слово «ом»; обозначалось как \mathcal{U} (перевернутой буквой Ω).

До Второй мировой войны (в СССР до 1960-х годов) сименсом называлась единица электрического сопротивления, соответствующая сопротивлению столба ртути длиной 1 м и диаметром 1 мм при 0 °С. Она соответствует примерно 0,9534 Ом. Эта единица была введена Сименсом в 1860 году и конкурировала с омом, который был окончательно выбран в качестве единицы сопротивления на Всемирном конгрессе электротехников в 1881 году. Тем не менее, сименс как единица сопротивления широко использовался связистами во всем мире до середины XX века.

Итак, сименс (русское обозначение «См», международное обозначение «S») — величина, обратная ому. Через другие единицы измерения СИ сименс выражается следующим образом:

$$1 \text{ См} = 1/\text{Ом} = \text{А/В}.$$

3.6.12. Единица измерения магнитного потока — вебер



Вильгельм Эдуард Вебер

Вебер — единица измерения магнитного потока в Международной системе единиц (СИ), названная в честь немецкого ученого *Вильгельма Эдуарда Вебера* (1804–1891).

Вильгельм Эдуард Вебер родился 14 октября 1804 г. в семье профессора теологии. Естественные науки он изучал в Галле, там же стал приват-доцентом, а затем в 1828 г. — внештатным профессором физики. В этом же году вместе с братом Эрнстом Генрихом, занимавшим пост профессора физиологии в Лейпциге, он написал научную работу по акустике, принесшую ему широкую известность среди физиков.

В 1831 г. его пригласили занять место штатного профессора в Геттингенском университете. Здесь было положено начало тесной дружбе и научному сотрудничеству с Гауссом в изучении магнетиз-

ма. Результатом этого сотрудничества было изобретение электромагнитного телеграфа, который они в 1833 г. вместе испытали. Телеграф соединил университетский физический кабинет с обсерваторией.

Результаты совместной научной работы с Гауссом в период с 1836 г. по 1841 г. отражены в шеститомнике, изданном Вебером совместно с Гауссом.

В 1843 г. он занял место профессора в Лейпцигском университете. Здесь появился его электродинамометр (прибор для измерения мощности), принцип действия которого был основан на открытом Ампером явлении взаимодействия двух токов и с помощью которого это взаимодействие можно было точно определить и использовать. В 1849 г. он возвращается в Геттинген, где и остается профессором до своей смерти.

Главные работы ученого относятся к области магнитных явлений и электричества. Его мемуары, частью находящиеся в издававшейся с 1837 до 1843 г. Гауссом и Вебером литературе, легли в основу классической физической литературы. Своими работами Вебер существенно способствовал увеличению знаний о законах, управляющих электродинамическими явлениями, открытыми А. М. Ампером. Он теоретически вывел закон взаимодействия движущихся зарядов, впервые выведя формулу, в которой учитывались не только знаки и величина этих зарядов, но и их относительная скорость перемещения.

В 1856 г. Вебер совместно с Р. Кольраушем определил отношение заряда конденсатора Q , выраженного в электростатических единицах, к этому же заряду q , выраженному в магнитных единицах, и впервые выяснил, что оно численно равно скорости света: $Q/q = c$.

Вебером были проведены исследования, приведшие к определению абсолютной единицы электрического напряжения или электродвижущей силы, причем Вебер, руководствуясь законом Фарадея об индукции и исходя из измерений магнитного поля Земли, произведенных Гауссом, использовал полученные им значения. Его земной индуктор, с помощью которого он проводил обширные количественные измерения, стал позже одним из самых важных приборов, предназначенных для электромагнитных измерений.

Вебером было сделано еще одно открытие, состоящее в том, что при объединении обоих законов Кулона для магнитных и электрических сил большое значение приобретала некая определенная скорость. С помощью сложных измерений он определил, что эта скорость равна скорости света. Так впервые в науке об электромагнетизме появилась скорость света как определенная физическая величина.

Самой же большой заслугой Вебера явилось то, что он стал основоположником общепринятой сегодня электрической системы мер, и

достиг он этого исключительно тщательной и точной количественной перепроверкой всех открытий, начиная от Эрстеда и кончая Фараде-ем, причем для этого он воспользовался опытом Гаусса в определении магнитных величин. Для своих исследований он изобрел множество новых, более точных, более чувствительных приборов и приспособлений и неутомимо производил огромное количество таких точных измерений, каких до него еще никто не осуществлял.

Вебер также одним из первых обобщил представление об элементарных электрических квантах, причем впервые приписал этим самым маленьким частицам, помимо определенного заряда, и определенную массу (инертность).

Принятая в 1881 г. на Международном электрическом конгрессе в Париже система абсолютных практических единиц измерений электрических величин представляет собой развитие того, что было введено в науку Вебером. Нелишне упомянуть, что еще в 1864 г. Вебер предвидел все значение, какое должно иметь для дальнейшего развития учения об электричестве явление электрических колебаний, и посвятил этому вопросу, столь блистательно решенному впоследствии опытным путем Г. Р. Герцем, обширную записку.

Он был очень скромн, по-детски непосредствен, но способ его мышления был бескомпромиссно прямолинеен, честен и абсолютно точен. Умер он 23 июня 1891 г. в Геттингене.

Название единицы «вебер» было установлено Международной электротехнической комиссией (МЭК) в 1930 году. В 1960 году XI Генеральная конференция по мерам и весам вместе с учреждением СИ приняла это название для единицы магнитного потока в СИ.

В 1970 г. в честь Вильгельма Эдуарда Вебера назван кратер на обратной стороне Луны.

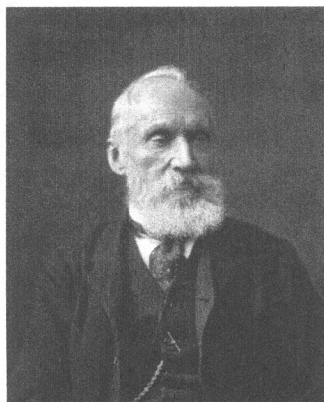
Итак, вебер (русское обозначение «Вб», международное обозначение «Wb») — единица магнитного потока в СИ. По определению, изменение магнитного потока через замкнутый контур со скоростью один вебер в секунду наводит в этом контуре ЭДС, равную одному вольту. Через основные единицы СИ вебер выражается с помощью соотношения: $Вб = В \cdot с = Гн \cdot А$.

3.6.13. Единица термодинамической температуры — кельвин

Кельвин — единица термодинамической температуры в Международной системе единиц (СИ), одна из семи основных единиц СИ, названа в честь английского физика *Уильяма Томсона* (1824–1907), которому за научные заслуги был пожалован титул «лорд Кельвин».

Уильям Кельвин (Уильям Томсон, лорд Кельвин) родился 26 июня 1824 года в Белфасте (Северная Ирландия). Его предками были британские фермеры. Отец — известный математик Джеймс Томсон, автор ряда учебников.

Уильям вместе со своим старшим братом Джеймсом учился в колледже в Глазго, а затем в Кембридже, который окончил в 1845 году. В 1846 году он стал преподавателем теоретической физики в университете в Глазго. В 1866 году Уильям получил дворянский титул, а в 1892 году стал пэром и получил титул «барон Кельвин».



Уильям Томсон (лорд Кельвин)

Уильям Кельвин является автором многих теоретических работ по физике, он изучал явления электрического тока, динамической геологии. Его работы помогли решить многие задачи электростатики и термодинамики (в частности, ему принадлежат две формулировки второго принципа термодинамики).

Вместе с Джеймсом Джоулем Кельвин проводил опыты над охлаждением газов и сформулировал теорию действительных газов.

В 1850-х годах Уильям интересовался вопросами телеграфии и помог организовать телеграфическую связь через Атлантический океан. Он также изобрел или усовершенствовал многие технические инструменты: лот и компас, зеркальный гальванометр, сифон-рекордер, электрометры, ампер-весы.

Уильям Томсон в своей работе «Об абсолютной термометрической шкале» («On an Absolute Thermometric Scale») пишет о необходимости шкалы, нулевая точка которой будет соответствовать предельной степени холода (абсолютному нулю), а ценой деления будет градус Цельсия. Эта абсолютная шкала на сегодняшний день известна как термодинамическая шкала Кельвина. Значение -273 было получено как обратное от $0,00366$ — коэффициента расширения газа на градус Цельсия, что точно соответствует текущему принятому значению.

Итак, кельвин (русское обозначение «К», международное обозначение «K») — единица термодинамической температуры в Международной системе единиц (СИ), одна из семи основных единиц СИ. Предложена в 1848 году. До 1968 года кельвин официально именовался градусом Кельвина. Один кельвин равен $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды. Начало шкалы (0 К) совпадает с абсолютным нулем.

Пересчет в градусы Цельсия: $^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273,15$ (температура тройной точки воды – $0,01^{\circ}\text{C}$).

3.6.14. Единица измерения температуры — градус Цельсия

Цельсий (градус Цельсия) — единица измерения температуры в международной системе единиц СИ (наряду с градусом Кельвина), названа в честь *Андерса Цельсия* (1701–1744) — шведского астронома и физика.



Андерс Цельсий

Андерс Цельсий родился 27 ноября 1701 года в Упсале в семье профессора. После окончания Упсальского университета остался там работать в должности профессора до самой смерти.

С 1716 года начал изучать северное сияние и в 1733 году опубликовал свои наблюдения. В заметках он на основе отклонений компаса доказал, что интенсивность северного сияния связана с колебаниями магнитного поля. В этом же году отправился с экспедицией на экватор, чтобы проверить и подтвердить гипотезу Ньютона об эллипсоидной форме Земли. А спустя несколько

лет в 1736 году отправился в Лапландию измерять меридиан. По возвращении Цельсий организует и возглавляет в своем университете обсерваторию, где занимается измерением яркости звезд.

В 1742 г. предложил стоградусную шкалу термометра, в которой за 0 градусов принял температуру кипения воды при нормальном атмосферном давлении, а за 100 градусов — температуру таяния льда. Современная шкала Цельсия введена несколько позже: другой швед, биолог Линней «перевернул» ее и сделал такой, какой мы знаем. В этой системе 0 градусов соответствует температуре замерзания воды, а 100 градусов — точке кипения воды.

Шкалы Цельсия и Кельвина сдвинуты на 273,15 градуса и пересчитываются следующим образом.

Температура по Кельвину = Температура по Цельсию + 273,15.

Умер Цельсий в Упсале в 1744 году. В честь ученого был назван редкий минерал «цельзиан», который встречается в Швеции, Японии, Украине.

Итак, градус цельсия (обозначается « $^{\circ}\text{C}$ ») — единица измерения температуры в Международной системе единиц (СИ), названная в честь Андерса Цельсия.

Глава 4

Единицы измерения физических величин в основной системе СГС и производных системах СГСЭ, СГСМ и СГСГ

4.1. Система единиц СГС

До принятия Международной системы единиц СИ использовалась система СГС. В СГС основной единицей для измерения длины принят сантиметр, массы — грамм, времени — секунда. СГС — аббревиатура от трех основных единиц (сантиметр, грамм, секунда). СГС также называют абсолютной физической системой единиц. Кроме трех основных единиц, в СГС существует ряд дополнительных единиц измерения, которые являются производными от основных.

Система мер, основанная на сантиметре, грамме и секунде, была предложена немецким ученым Гауссом в 1832 г. В 1874 г. Максвелл и Томсон усовершенствовали систему, добавив в нее электромагнитные единицы измерения. В 1889 г. 1-я Генеральная конференция по мерам и весам приняла систему мер, сходную с СГС, но основанную на метре, килограмме и секунде, т. к. эти единицы были признаны более удобными для практического использования.

Рассмотрение особенностей системы СГС целесообразно, так как она широко используется в настоящее время в физике. Кроме того, знание этой системы позволяет понимать содержание физической литературы, поскольку основная масса классических работ написана на ее основе.

Существует несколько производных от СГС систем, отличающихся выбором электрических и магнитных единиц измерения и величиной констант в различных законах электромагнетизма. Основными производными системами являются СГСЭ (абсолютная электростатическая система), СГСМ (абсолютная электромагнитная система), СГСГ (гауссова система единиц).

При построении системы СГСЭ в качестве первой производной электрической единицы вводится единица электрического заряда с использованием закона Кулона в качестве определяющего уравнения. При этом абсолютная диэлектрическая проницаемость считается безразмерной электрической величиной. Как следствие этого, в некоторых уравнениях, связывающих электромагнитные величины, появляется в явном виде корень квадратный из скорости света в вакууме.

При построении системы СГСМ в качестве первой производной

электрической единицы вводится единица силы тока с использованием закона Ампера в качестве определяющего уравнения. При этом абсолютная магнитная проницаемость считается безразмерной электрической величиной. В связи с этим в некоторых уравнениях, связывающих электромагнитные величины, появляется в явном виде корень квадратный из скорости света в вакууме.

Гауссова система — самая естественная из всех систем. Ее преимущества заключаются в том, что в вакууме векторы электрической и магнитной индукции совпадают с векторами напряженности электрического поля. Кроме того, напряженности электрического поля имеют одинаковую размерность, что естественно, учитывая, что они составляют единое электромагнитное поле. Физические формулы, записанные в гауссовой системе, имеют самый естественный вид.

Однако, несмотря на физическую целесообразность и логичность или на то, что большинство классических книг в области физики и научных работ в журналах написаны с использованием именно этой системы, гауссова система не стала основной международной системой единиц, поскольку ее единицы силы тока, напряжения и сопротивления не получили широкого признания и вошли в конфликт с единицами, которые использовались на практике.

СГС отличается от СИ не только выбором конкретных единиц измерения. Из-за того, что в СИ были дополнительно введены основные единицы для электромагнитных физических величин, которых не было в СГС, некоторые единицы имеют другие размерности. Из-за этого некоторые физические законы в этих системах записываются по-разному (например, закон Кулона). Отличие заключается в коэффициентах, большинство из которых — размерные. Поэтому, если в формулы, записанные в СГС, просто подставить единицы измерения СИ, то будут получены неправильные результаты. Это же относится и к разным разновидностям СГС — в СГСЭ, СГСМ и гауссовой системе единиц одни и те же формулы могут записываться по-разному.

4.2. Единица измерения магнитной индукции в системе СГС

Гаусс — единица измерения магнитной индукции в системе СГС, названа в честь немецкого физика и математика *Карла Фридриха Гаусса* (1777–1855).

Дед Гаусса был бедным крестьянином, отец — садовником, каменщиком, смотрителем каналов в герцогстве Брауншвейг. Уже в возрасте двух лет мальчик показал себя вундеркиндом, в три года умел читать и писать, даже исправлял счетные ошибки отца. До самой старости он привык большую часть вычислений производить в уме.

Учитель Гаусса М. Бартельс оценил исключительный талант юно-

го ученика и сумел выхлопотать ему стипендию от герцога Брауншвейгского. Это помогло Гауссу закончить колледж Collegium Carolinum в Брауншвейге (1792–1795).

Свободно владея множеством языков, Гаусс некоторое время колебался в выборе между филологией и математикой, но предпочел последнюю. Он очень любил латинский язык и значительную часть своих трудов написал на латыни; любил английскую, французскую и русскую литературу. В возрасте 62 лет Гаусс начал изучать русский язык, чтобы ознакомиться с трудами Лобачевского, и вполне преуспел в этом деле.

В колледже Гаусс изучил труды Ньютона, Эйлера, Лагранжа. Уже там он сделал несколько открытий в теории чисел, в том числе доказал закон взаимности квадратичных вычетов. Кроме этого, Гаусс создал «метод наименьших квадратов» и начал исследования в области «нормального распределения ошибок».

С 1795 по 1798 год Гаусс учился в Геттингенском университете. Это наиболее плодотворный период в жизни Гаусса.

1796 г.: Гаусс доказал возможность построения с помощью циркуля и линейки правильного семнадцатиугольника. Более того, он разрешил проблему построения правильных многоугольников до конца и нашел критерий возможности построения правильного n -угольника с помощью циркуля и линейки. Этим открытием Гаусс очень дорожил и завещал изобразить на его могиле правильный 17-угольник, вписанный в круг.

1798 г.: закончен шедевр «Арифметические исследования» (лат. «Disquisitiones Arithmeticae»), напечатанный только в 1801 году. В этом труде подробно излагается теория сравнений в современных (введенных им) обозначениях, решаются сравнения произвольного порядка, глубоко исследуются квадратичные формы, комплексные корни из единицы используются для построения правильных n -угольников, изложены свойства квадратичных вычетов, приведено доказательство квадратичного закона взаимности и т. д. Гаусс любил говорить, что математика — царица наук, а теория чисел — царица математики.

После 1801 года Гаусс, не порывая с теорией чисел, расширил круг своих интересов, включив в него и естественные науки. Катализатором послужило открытие малой планеты Церера (1801 г.),



Карл Фридрих Гаусс

вскоре после наблюдений потерянной. 24-летний Гаусс проделал (за несколько часов) сложнейшие вычисления по новому, открытому им же методу, и указал место, где искать беглянку; там она, к общему восторгу, и была вскоре обнаружена.

Слава Гаусса становится общеевропейской. Многие научные общества Европы избирают Гаусса своим членом. Несколько стран наперебой приглашают Гаусса на службу (в том числе в Петербург). По рекомендации Александра фон Гумбольдта Гаусса назначают профессором в Геттингене и директором Геттингенской обсерватории. Эту должность он занимал до самой смерти.

1809 г.: новый шедевр, «Теория движения небесных тел». Изложена каноническая теория учета возмущений орбит.

1810 г.: новые почести. Гаусс получает премию Парижской академии наук и золотую медаль Лондонского королевского общества.

1811 г.: появляется новая комета. Гаусс быстро и очень точно рассчитывает ее орбиту. Начинает работу над комплексным анализом, открывает (но не публикует) теорему, позже переоткрытую Коши и Вейерштрассом: интеграл от аналитической функции по замкнутому контуру равен нулю.

1812 г.: исследование гипергеометрического ряда, обобщающего разложение практически всех известных тогда функций.

1821 г.: в связи с работами по геодезии Гаусс начинает исторический цикл работ по теории поверхностей. В науку входит понятие «гауссова кривизна». Положено начало дифференциальной геометрии. Именно результаты Гаусса вдохновили Римана на написание его классической диссертации о «римановой геометрии».

Итогом изысканий Гаусса была работа «Исследования относительно кривых поверхностей» (1822). В ней свободно использовались общие криволинейные координаты на поверхности. Гаусс далеко развил метод конформного отображения, которое в картографии сохраняет углы (но искажает расстояния); оно применяется также в аэро- и гидродинамике, в электростатике.

1824 г.: избирается иностранным почетным членом Петербургской академии наук.

1825 г.: открывает гауссовы комплексные целые числа, строит для них теорию делимости и сравнений. Успешно применяет их для решения сравнений высоких степеней.

В 1831 году в Геттинген приезжает приглашенный по инициативе Гаусса 27-летний талантливый физик Вильгельм Вебер, с которым Гаусс познакомился в 1828 году в гостях у Гумбольдта. Оба энтузиаста науки сдружились, несмотря на разницу в возрасте, и начали цикл исследований электромагнетизма.

1832 г.: «Теория биквадратичных вычетов». С помощью тех же целых комплексных гауссовых чисел доказываются важные арифметические теоремы не только для комплексных, но и для вещественных чисел. Здесь же Гаусс приводит геометрическую интерпретацию комплексных чисел, которая с этого момента становится общепринятой.

1833 г.: Гаусс изобретает электрический телеграф и (вместе с Вебером) строит его действующую модель.

В 1839 г. 62-летний Гаусс овладевает русским языком и в письмах в Петербургскую Академию просил прислать ему русские журналы и книги. Предполагают, что изучение русского языка Гауссом связано с работами Лобачевского. В 1842 году по рекомендации Гаусса Лобачевский избирается иностранным членом-корреспондентом Геттингенского королевского общества.

Умер Гаусс 23 февраля 1855 г. в Геттингене. В честь Гаусса названы: кратер на Луне, малая планета № 1001 (Gaussia), постоянная Гаусса, вулкан Гауссберг в Антарктиде.

С именем Гаусса связано пятнадцать теорем и научных терминов в математике, астрономии и физике.

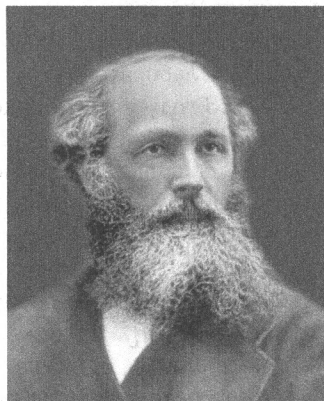
Итак, гаусс (русское обозначение «Гс», международное — «G») — единица измерения магнитной индукции в системе СГС; сама эта система единиц часто именуется гауссовой. Соотношение между гауссом и теслой: $1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Тл}$.

4.3. Единица измерения магнитного потока в системе СГС

Максвелл — единица измерения магнитного потока в системе СГС, названная в честь английского физика *Джеймса Клерка Максвелла* (1831–1879) по предложению Международной электротехнической комиссии (МЭК) в 1900 году. В 1930 году на сессии МЭК наименование было подтверждено.

Родился Джеймс Клерк Максвелл 13 июня 1831 г. в столице Шотландии, городе Эдинбурге, в семье адвоката и потомственного дворянина Джона Клерка Максвелла. Детство Джеймса прошло в фамильном имении в Южной Шотландии. Его мать рано умерла, и воспитанием мальчика занимался отец. Именно он привил Джеймсу любовь к техническим наукам.

В 1841 г. он поступил в Эдинбургскую академию, затем в 1847–



Джеймс Клерк Максвелл

1850 гг. учился в университете Эдинбурга. Здесь Максвелл изучает и развивает теорию упругости, ставит научные опыты. В 1850–1854 гг. учился в Кембриджском университете, который окончил со степенью бакалавра.

После завершения учебы Джеймс остается преподавать в Кембридже. В это время он начинает работу над теорией цвета, впоследствии легшей в основу цветной фотографии. Максвелл также начинает интересоваться электричеством и магнитным эффектом.

В 1856 году Джеймс Максвелл стал профессором Маришаль-колледжа в Абердине (Шотландия), проработав там до 1860 года. Работая в Абердине, Джеймс трудится над трактатом «Об устойчивости движения колец Сатурна» (1859), признанной и одобренной научными кругами. Одновременно с этим Максвелл занимается разработкой кинетической теории газов, которая легла в основу современной статистической механики, а позже, в 1866 году, им был открыт закон распределения молекул по скоростям, названный его именем.

В 1860–1865 гг. Джеймс Максвелл был профессором на кафедре натуральной философии в Кингс-колледже (Лондон). В 1864 году вышла его статья «Динамическая теория электромагнитного поля», которая стала главной работой Максвелла и предопределила направление его дальнейших исследований. Проблемами электромагнетизма ученый занимался вплоть до конца своей жизни.

В 1871 году Максвелл вернулся в Кембриджский университет, где возглавил первую лабораторию для физических экспериментов, названную по имени английского ученого Генри Кавендиша — Кавендишская лаборатория. Там он преподавал физику и участвовал в оснащении лаборатории.

В 1873 году ученый наконец заканчивает работу над двухтомным трудом «Трактат об электричестве и магнетизме», ставшим поистине энциклопедическим наследием в области физики. Максвелл заложил основы современной классической электродинамики (уравнения Максвелла), ввел в физику понятия тока смещения и электромагнитного поля, получил ряд следствий из своей теории (предсказание электромагнитных волн, электромагнитная природа света, давление света и другие).

Максвелл — один из основателей кинетической теории газов (установил распределение молекул газа по скоростям). Одним из первых ввел в физику статистические представления, показал статистическую природу второго начала термодинамики («демон Максвелла»), получил ряд важных результатов в молекулярной физике и термодинамике (термодинамические соотношения Максвелла, правило Максвелла для фазового перехода «жидкость — газ» и другие).

Пионер количественной теории цвета; автор принципа цветной фотографии. Среди других работ Максвелла — исследования по механике (фотоупругость, теорема Максвелла в теории упругости, работы в области теории устойчивости движения, анализ устойчивости колец Сатурна), оптике, математике. Он подготовил к публикации рукописи работ Генри Кавендиша, много внимания уделял популяризации науки, сконструировал ряд научных приборов.

Скончался великий ученый 5 ноября 1879 года и был похоронен близ родового имения, в шотландской деревне Партон.

Единица измерения магнитного потока названа в честь английского физика Джеймса Клерка Максвелла по предложению Международной электротехнической комиссии (МЭК) в 1900 году. В 1930 году на сессии МЭК наименование было подтверждено.

Итак, максвелл — единица измерения магнитного потока в системе СГС (русское обозначение «Мкс», международное — «Мх»). В однородном магнитном поле с индукцией 1 гаусс магнитный поток в 1 максвелл проходит через плоский контур площадью 1 см^2 , расположенный перпендикулярно вектору индукции, т. е.

$$1 \text{ максвелл} = 1 \text{ гаусс} \cdot \text{см}^2 = 10^{-8} \text{ вебер}.$$

4.4. Единица измерения напряженности магнитного поля в системе СГС

Эрстед — единица измерения напряженности магнитного поля в системе СГС, названная в честь Ганса Христиана Эрстеда (1777–1851).

Ганс Христиан Эрстед родился 14 августа 1777 года на датском острове Лангеланд в городке Рюдкобинг в семье бедного аптекаря. Семья постоянно испытывала нужду, так что начальное образование братьям Ганса Христиану и Андерсу пришлось получать где придется. Городской парикмахер учил их немецкому языку, его жена — датскому, пастор маленькой церкви научил их правилам грамматики,



Ганс Христиан Эрстед

познакомил с историей и литературой, землемер научил сложению и вычитанию, а заезжий студент впервые рассказал им удивительные вещи о свойствах минералов. Уже в двенадцать лет Ганс был вынужден встать за стойку отцовской аптеки. Здесь медицина укрепила в нем уверенность в его научном предназначении. Он поступает в Ко-

пенгагенский университет. Здесь он берется за изучение медицины, физики, астрономии, философии, поэзии.

Золотая медаль университета 1797 года была присуждена ему за эссе «Границы поэзии и прозы». Следующая его работа, также высоко оцененная, касалась свойств щелочей, а диссертация, за которую Ганс Эрстед получил звание доктора философии, была посвящена медицине.

Блестяще защитив диссертацию, Ганс едет по направлению университета на стажировку во Францию, Германию, Голландию. Там Эрстед слушал лекции известных философов, в том числе Фридриха Шеллинга, Георга Вильгельма Фридриха Гегеля. Большое значение имело его общение с немецким физиком Риттером, изобретателем аккумулятора.

В 1806 году Г. Эрстед становится профессором Копенгагенского университета. Увлечшись философией Шеллинга, он много думал о связи между теплотой, светом, электричеством и магнетизмом. В 1813 году во Франции выходит его труд «Исследования идентичности химических и электрических сил». В нем он впервые высказывает идею о связи электричества и магнетизма. Эрстед пишет: «Следует испытывать, не производит ли электричество... каких-либо действий на магнит...». Его соображения были простыми: электричество рождает свет — искру, звук — треск. Наконец, оно может производить тепло: проволока, замыкающая контакты источника тока, нагревается. Не может ли электричество производить магнитных действий? Говорят, Эрстед не расставался с магнитом. Тот кусочек железа должен был непрерывно заставлять его думать в этом направлении.

Идея связи электричества и магнетизма, восходящая к простейшему сходству притяжения пушинок янтарем и железных опилок магнитом, носилась в воздухе, и многие лучшие умы Европы были ею увлечены. Сегодня любой школьник без труда воспроизведет опыт Ганса Эрстеда, продемонстрирует «вихрь электрического конфликта», насыпав на картон, через центр которого проходит проволока с током, железные опилки.

С 1820 года Эрстед, уже заслуженный профессор химии Копенгагенского университета, читал своим студентам лекции, сопровождавшиеся демонстрациями. На лекции и произошло главное открытие Эрстеда: впервые экспериментально установлена связь между электрическими и магнитными явлениями. История этого открытия, совершенного зимой 1819–1820 учебного года, весьма показательна.

Эрстед на лекции в университете демонстрировал нагрев проволоки электричеством от вольтова столба, для чего составил электрическую или, как тогда говорили, гальваническую цепь. На demonstra-

ционном столе находился морской компас, поверх стеклянной крышки которого проходил один из проводов. Вдруг кто-то из студентов случайно заметил, что, когда Эрстед замкнул цепь, магнитная стрелка компаса отклонилась в сторону.

Это было первое экспериментальное подтверждение связи электричества и магнетизма, того, что так долго искали многие ученые. Сообщение об этих опытах, опубликовано Эрстедом в Копенгагене в 1820 г.

В дальнейшем Эрстед повторил условия своего лекционного опыта, а затем стал их менять. И обнаружил следующее: «Если расстояние от проволоки до стрелки не превосходит $3/4$ дюйма, отклонение составляет 45° . Если расстояние увеличивать, то угол пропорционально уменьшается. Абсолютная величина отклонения изменяется в зависимости от мощности аппарата». Используя данное сообщение, А. М. Ампер вскоре предложит на его принципе магнитоэлектрический гальванометр, роль которого в развитии электрической науки трудно переоценить.

Далее Эрстед изучает действие проводников из различных металлов на стрелку. Для этого он использует проволоки из платины, золота, серебра, латуни. Было обнаружено, что металлы, которые никогда не обнаруживали магнитных свойств, приобретали их, когда через них протекал электрический ток.

Когда соединительную проволоку Эрстед ставил вертикально, то магнитная стрелка совсем не указывала на нее, а располагалась как бы по касательной к окружности с центром по оси проволоки. Исследователь предложил считать действие проволоки с током вихревым, так как именно вихрям свойственно действовать в противоположных направлениях на двух концах одного диаметра.

В 1824 г. он основал общество для распространения естествознания и в 1829 г. стал директором политехнической школы в Копенгагене. С 1830 г. Эрстед — иностранный почетный член Петербургской академии наук.

Основные труды Эрстеда посвящены молекулярной физике, химии, акустике, электричеству, философии, однако его важнейшая научная заслуга — установление связи между электрическими и магнитными явлениями в опытах по отклонению магнитной стрелки под действием проводника с током.

В 1876 г. Эрстеду в Копенгагене поставлен бронзовый памятник.

Итак, эрстед (русское обозначение «Э», международное обозначение «Ое») — единица измерения напряженности магнитного поля в системе СГС. Введена в 1930 году Международной электротехнической комиссией.

1 эрстед равен напряженности магнитного поля в вакууме при индукции 1 гаусс. Согласно формуле, описывающей напряженность магнитного поля в вакууме, создаваемую прямолинейным тонким бесконечным проводником с током, $H = \frac{2I}{cl}$, где H — напряженность магнитного поля в эрстедах, I — сила тока, c — скорость света, l — расстояние от точки наблюдения до проводника в сантиметрах.

4.5. Единица измерения магнитодвижущей силы в системе СГС

Гильберт — единица измерения магнитодвижущей силы в системе СГС, названная в честь *Уильяма Гильберта* (1544–1603) — английского физика, придворного врача Елизаветы I и Якова I.



Уильям Гильберт

Уильям Гильберт родился в семье главного судьи и члена городского совета города Колчестера в графстве Эссекс. В этом городе он окончил классическую школу и в мае 1558 г. поступил в колледж святого Иоанна в Кембридже. Позже его обучение продолжалось в Оксфорде. В 1560 г. он получил степень бакалавра, а через 4 года стал «мастером искусств». К тому времени уже определился его выбор: он серьезно занялся изучением медицины, в 1569 г. получил степень доктора медицины, был избран старшим членом ученого общества колледжа святого Иоанна в Кембридже.

Биографы Гильберта пишут, что примерно в это же время «...совершил путешествие по континенту, где ему, вероятно, была присуждена степень доктора физики». В 1560-е годы Гильберт как на континенте, так и в Англии «с большим успехом и одобрением практиковал в качестве врача». В 1573 г. он был избран членом Королевского колледжа врачей, где ему впоследствии было доверено много важных постов — инспектора, казначея, советника и (с 1600 г.) президента колледжа. Успехи Гильберта как врача были так значительны, что королева Елизавета Тюдор сделала его своим лейб-медиком. Королева интересовалась и его научными занятиями и даже посетила его лабораторию, где Гильберт продемонстрировал ей некоторые опыты.

В доме и в лаборатории Гильберта, который, по воспоминаниям знавших его людей, был веселым, общительным и радушным человеком, часто собирались его многочисленные коллеги и друзья. В их

числе были и моряки, которые рассказывали ему о наблюдениях над компасом во время их кругосветных плаваний. Это позволило Гильберту собрать богатый материал оклонениях магнитной стрелки, который вошел в его знаменитую книгу.

Первое время научные интересы Гильберта относились к химии (вероятно, в связи с его врачебной деятельностью), а затем — к астрономии. Он изучил практически всю имевшуюся литературу, касающуюся движения планет, и был самым активным в Англии сторонником и пропагандистом идей Коперника и Дж. Бруно.

После смерти Елизаветы Тюдор в 1603 г. Гильберт был оставлен лейб-медиком при новом короле Якове I, но не пробыл в этой должности и года. В 1603 г. Уильям Гильберт скончался от чумы и был похоронен в церкви Святой Троицы в Колчестере.

Свою библиотеку, все приборы и коллекцию минералов Гильберт, у которого не было наследников, завещал колледжу, но, к сожалению, все это погибло в 1666 г. во время большого лондонского пожара.

Конечно, основной вклад Гильберта в науку связан с его трудами по магнетизму и электричеству. Более того, само возникновение этих важнейших разделов физики в новое время по справедливости должно быть связано с Гильбертом.

Гильберт — и в этом его особая заслуга — первым, даже до Фрэнсиса Бэкона, которого часто называют прародителем экспериментального метода в науке, целеустремленно и сознательно шел от опыта в изучении магнитных и электрических явлений.

Главным итогом его исследований явился труд «О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле». В этой книге описано более 600 проделанных Гильбертом опытов и изложены те выводы, к которым они приводят.

Гильберт установил, что у магнита всегда имеются два неразделимых полюса: если магнит распилить на две части, то у каждой из половинок оказывается вновь по паре полюсов. Полюса, которые Гильберт назвал одноименными, отталкиваются, а другие — разноименные — притягиваются.

Гильберт открыл явление магнитной индукции: брусок железа, расположенный возле магнита, сам приобретает магнитные свойства. Что касается природных магнитов, то силу притяжения к ним железных предметов можно увеличить с помощью надлежащей железной арматуры. От действия магнита можно частично загородиться железными перегородками, но погружение в воду не влияет заметным образом на притяжение к ним. Гильберт даже заметил, что удары по магнитам могут ослабить их действие.

Гильберт не только экспериментировал с магнитами, он поставил

перед собой задачу, для решения которой, как выяснилось, оказалось недостаточно даже и половины тысячелетия: почему вообще существует магнетизм Земли? Ответ, который он предложил, опять-таки базировался на экспериментах. Был изготовлен постоянный магнит в форме шара, названный Гильбертом Тереллой (т. е. маленькой моделью Земли), и Гильберт при помощи магнитной стрелки, помещавшейся над различными участками его поверхности, изучал создаваемое им магнитное поле. Оно оказалось весьма похожим на то, что имеется над Землей. На экваторе, т. е. на равных расстояниях от полюсов, стрелки магнита располагались горизонтально, т. е. параллельно поверхности шара, а чем ближе к полюсам, тем сильнее наклонялись стрелки, принимая вертикальное положение над полюсами.

Идея Гильберта, что Земля — большой постоянный магнит, не выдержала испытания временем. Но значение трудов Гильберта не вызывает сомнения.

Магнитами, хотя бы из-за прикладных целей мореплавания, уже немного интересовались и до Гильберта, но в исследовании электричества он безусловно и безоговорочно был первым. И здесь ему принадлежат важные достижения. Даже первый прибор — прообраз электроскопа (он назвал его «версором») — был придуман им. Гильберт установил, что электризация (тоже его термин) происходит при натирании не только янтаря (это было замечено еще древними греками), но также и многих тел другого состава, в том числе и стекла. (Можно заметить, что электризация трением до середины XVIII века оставалась основным, если не единственным инструментом исследования электрических явлений.)

Гильберту удалось даже экспериментально обнаружить такие тонкие эффекты, как влияние пламени на заряженные тела. Он даже, значительно опережая свое время, связывал нагревание с тепловым движением частиц тел.

Должная оценка провидческих идей Гильберта как в области физики, так и методологии науки, появилась лишь теперь, через триста, даже четыреста лет после выхода его гениальных трудов.

Итак, гильберт (русское обозначение «Гб», международное — «Gi») — единица измерения магнитодвижущей силы в системе СГС, названная в честь Уильяма Гильберта. $1 \text{ Gb} = 0,7957747 \text{ Aw}$ (ампервитков).

Глава 5

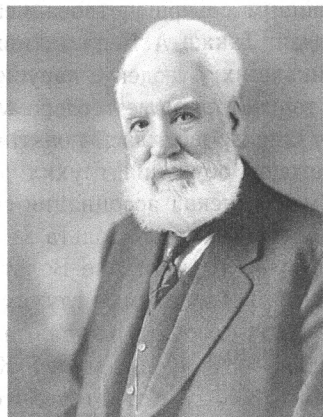
Относительные единицы измерений

5.1. Краткая история относительных единиц измерений

В инфокоммуникациях широко используется термин «децибел». Децибел (дБ) считается базовой единицей, с помощью которой в телекоммуникационной промышленности сравниваются характеристики оборудования. Децибел — безразмерная единица, применяемая для измерения отношения некоторых величин — «энергетических» (мощности, энергии, плотности потока мощности и т. п.) или «силовых» (силы тока, напряжения и т. п.). Таким образом, децибел — это относительная величина.

Децибел не является официальной единицей в системе единиц СИ, хотя по решению Генеральной конференции по мерам и весам допускается его применение без ограничений совместно с СИ, а Международная палата мер и весов рекомендовала включить его в эту систему.

Происхождение названия этой единицы аналогично происхождению названий единиц других физических величин. Название было сформулировано в честь выдающегося и широко известного ученого, каким был *Александр Грэм Белл* (1847–1922) — ученый, изобретатель и бизнесмен шотландского происхождения, один из основоположников телефонии, сыгравший большую роль в создании телекоммуникационной отрасли в США [4].



Александр Грэм Белл

Еще в молодые годы, живя в Шотландии, Белл начал интересоваться возможностью передачи сигнала по каналам электросвязи. В 1870 году Беллы обосновались в городе Брантфорд, провинция Онтарио (Канада). В Канаде он продолжил заниматься изобретательством, в частности, создал электрическое фортепиано, приспособленное для передачи музыки по проводам. В 1876 году он получил патент США № 174465, описывающий «метод и аппарат» для передачи речи и других звуков по телеграфу, весьма схожий с телефоном. Кроме того,

А. Белл вел работы по использованию в телекоммуникациях светового луча.

Кроме телефона А. Белл изобрел машину для лущения зерна (1858), фонавтограф (1874), аудиометр (1879), фотофон (1880), металлоискатель (1881), вакуумный насос (1881), пирамидального воздушного змея (1901), аэроплан «Серебряный дротик» (1909), лодку на подводных крыльях HD-4 (1919).

В 1879 году компания «Western Union» заключила соглашение с компаньонами изобретателя. Была создана объединенная фирма «Белл компани», основная часть акций которой принадлежала А. Беллу. Деятельность компании была успешной, телефонные аппараты быстро совершенствовались, и к 1900 году в США было установлено 1,5 млн. аппаратов.

Изобретения А. Белла принесли ему известность, но была и другая причина, способствовавшая признанию его заслуг и присвоению его фамилии единице измерений. Эта причина заключалась в экономической эффективности основанной фирмы, приносившей большие прибыли. Однако лично А. Белла материальная сторона мало интересовала. На заработанные деньги Белл основал в Вашингтоне Институт имени А. Вольта, в котором изобретатели работали над дальнейшим совершенствованием телефона, фонографа и электрической связи. Также А. Белл активно способствовал решению проблем, возникавших у людей с нарушениями зрения и слуха. За свои средства в течение ряда лет содержал в Вашингтоне экспериментальную школу, где проводилась практическая работа по выявлению наилучших методов обучения глухих детей. По его настоянию была основана Американская ассоциация содействия обучению глухих устной речи. Получив премию Вольта за изобретение телефона, он основал на эти деньги в Вашингтоне Вольтовское бюро по распространению информации по проблемам глухих.

А. Белл поддерживал талантливых ученых и изобретателей (в том числе А. Майкельсона и Г. Кертисса) с самого начала их научных исследований. Следует отметить, что примером для него являлся помогавший ему самому известный американский ученый Д. Генри. Сам Белл работал над многими проектами, в частности в области авиации и гидродинамики.

Заслуги А. Белла были признаны на международном уровне. В 1976 году международной некоммерческой ассоциацией «Институтом инженеров электротехники и электроники» (IEEE) была учреждена Золотая медаль имени Александра Грэма Белла для награждения за выдающиеся фундаментальные исследования и прикладные разработки в области коммуникаций; она является высшей наградой орга-

низации. В 1970 г. в честь Александра Белла назван кратер на Луне. В 2013 г. в честь Белла были названы три первых наноспутника, изготовленных по программе NASA PhoneSat. Грэм-Белл — самый восточный остров в архипелаге Земля Франца-Иосифа, в Баренцевом море, на севере Европы.

Рассмотрев исторические научные заслуги А. Белла, целесообразно перейти к рассмотрению истории создания самой единицы измерения, имеющей русское обозначение «децибел» — «дБ», международное — «dB». Децибел аналогичен единицам «бел» (Б, В).

Кроме единицы «децибел» в начале развития техники связи широко использовался термин «непер». Непер, как и децибел, не входит в систему единиц СИ, однако, по решению Генеральной конференции по мерам и весам, допускается его применение без ограничений совместно с СИ. Единица названа в честь Джона Непера, который ввел в математику понятие логарифма. Русское обозначение «Нп», международное — «Np».

Единицы дБ и Нп имеют нечто общее. Так же, как бел и децибел, непер является единицей логарифмической шкалы. Разница между ними в том, что отношение величин, выраженное в белах (децибелах), предполагает использование десятичных логарифмов, тогда как для отношения в неперах используются натуральные логарифмы. Учитывая роль Д. Непера в создании логарифмов, рассмотрим его биографию и историю научных достижений.

Джон Непер (1550–1617) — шотландский барон, математик, один из изобретателей логарифмов, первый публикатор логарифмических таблиц.

В ранней молодости, после окончания курса в Сент-Эндрюсском университете, куда он поступил в 1563 году, Непер совершил путешествие по Германии, Франции и Италии, из которого вернулся на родину в 1571 году. Поселившись в своем родном замке, он затем никогда не оставлял Шотландии. Основные его работы были посвящены богословским предметам и математике. По его собственным словам, истолкование пророчеств всегда составляло главный предмет его занятий, математика же служила для него только отдыхом. Однако Д. Непер вошел в историю как математик — изобретатель замечательного вычислительного инструмента — таблицы



Джон Непер

изобретатель замечательного вычислительного инструмента — таблицы

логарифмов. Это открытие вызвало гигантское облегчение труда вычислителя. Лаплас говорил, что Непер своим изобретением «продлил жизнь астрономов», упростив их вычисления.

В XVI веке уже имелась потребность в сложных расчетах. Значительная часть трудностей была связана с умножением и делением многозначных чисел. Неперу принадлежит идея замены трудоемкого умножения на простое сложение. Для этого следует сопоставить с помощью специальных таблиц геометрическую (исходную) и арифметическую прогрессии. Тогда и деление автоматически заменяется на неизмеримо более простое вычитание. В предисловии к своей книге Непер писал: «Я всегда старался, насколько позволяли мои силы и способности, освободить людей от трудности и скуки вычислений, докучливость которых обыкновенно отпугивает очень многих от изучения математики».

Видимо, по этой причине им были изобретены так называемые «палочки Непера» — оригинальный прибор для быстрого умножения, описанный в книге, которая вышла в Эдинбурге в начале 1617 году и называлась «Рабдология», и в двух книгах о счете с помощью палочек. В предисловии к книге автор писал, что изобрел их для тех, кто предпочитает логарифмам вычисления с «естественными числами», и решился на публикацию потому, что «палочки» понравились многим его друзьям и даже получили распространение в других странах». Они изготовлялись из дерева или из слоновой кости и, как и сам метод умножения с их помощью, быстро получили распространение в Европе (одно время они были даже более популярны, чем логарифмы). Важным вкладом в сферическую тригонометрию стали открытые им «формулы аналогии Непера».

Непер также изобрел гидравлический винтовой насос оригинальной конструкции для выкачивания воды из угольных шахт, который запатентовал в 1597 году. Его книга по богословию имела при жизни автора гораздо больший успех, чем труды по математике. Однако наиболее значимым с исторической точки зрения было опубликованное им в 1614 году в Эдинбурге сочинение под названием «Описание удивительной таблицы логарифмов» (лат. «*Mirifici Logarithmorum Canonis Descriptio*», 56 страниц текста и 90 страниц таблиц). Там было краткое описание логарифмов и их свойств, а также 8-значные таблицы логарифмов синусов, косинусов и тангенсов с шагом $1'$.

Основное свойство логарифма Непера: если величины образуют геометрическую прогрессию, то их логарифмы образуют прогрессию арифметическую. Однако правила логарифмирования для неперовой функции отличались от правил для современного логарифма. Все значения таблицы Непера содержали вычислительную ошибку после ше-

стого знака. Однако это не помешало новой методике вычислений получить широчайшую популярность, и составлением логарифмических таблиц занялись многие европейские математики, включая Кеплера. Одновременно с Непером и независимо от него таблицу логарифмов опубликовал швейцарский математик Йост Бюрги, однако таблицы Непера были практичнее и удобнее в пользовании.

В 1615 году Непера посетил оксфордский профессор математики Генри Бригс. Непер рекомендовал Бригсу видоизменить определение логарифма, приблизив его к современному. Бригс опубликовал свои таблицы в год смерти Непера (1617). Они уже включали десятичные, а не натуральные, логарифмы, и не только синусов, но и самих чисел (от 1 до 1000, с 14 знаками). Логарифм единицы теперь, как положено, был равен нулю. Таким образом, Непер был не только создателем натуральных логарифмов, но и инициатором создания десятичных логарифмов.

В дальнейшем в таблицах Бригса обнаружились ошибки. Первое безошибочное издание таблиц появилось только в 1857 году в Берлине (таблицы Бремикера). В 1620-е годы Эдмунд Уингейт и Уильям Отред изобрели первую логарифмическую линейку — незаменимый инструмент инженера до появления карманных калькуляторов.

Современное определение логарифмирования как операции, обратной возведению в степень, впервые появилось у Валлиса и Иоганна Бернулли, а окончательно было узаконено Эйлером в XVIII веке. Эйлеру принадлежит и заслуга распространения логарифмической функции на комплексную область.

За заслуги в области математики кроме единицы измерения в честь Джона Непера названы кратер на Луне, астероид 7096 Непер (1992 год), палочки Непера, неперово число e , университет в Эдинбурге (Edinburgh Napier University).

Подводя итог исторического обзора работ Непера, следует отметить их влияние на дальнейшее развитие науки. Упрощение вычислений в алгебре стало возможным с введением понятия показателя степени. Но во времена Непера алгебра еще только возникала из арифметики, и общего понятия о степени в ней не существовало. Тем не менее, используя лишь простейший аппарат арифметики и геометрии, Непер нашел метод решения интересовавшей его задачи. Но логарифмами не ограничивается вклад Непера в европейскую математическую культуру: он предложил способ умножения, деления и извлечения квадратных корней с помощью изобретенного им простейшего вычислительного средства, получившего название «палочки Непера», а также впервые в мире использовал двоичную систему в инструментальном счете.

Идея сведения сложных операции к более простым, доведенная Непером до практического применения, в течение многих столетий оставалась непревзойденным средством упрощения вычислений. Только с помощью логарифмов могли быть произведены гигантские астрономические вычисления Иоганна Кеплера.

5.2. Причины применения логарифмических единиц в настоящее время

Как отмечалось выше, изобретение логарифмов было связано с решением задачи упрощения вычислений. В настоящее время с развитием компьютерных технологий проблема вычислений решена и, казалось бы, задача применения логарифмов перестала быть актуальной. Однако для применения логарифмов, неперов и децибелов вместо процентов или долей в настоящее время есть ряд причин [10].

Первую причину можно связать с особенностью восприятия органами чувств человека и животных ряда биологических процессов, которая состоит в том, что уровень восприятия пропорционален не амплитуде входного воздействия, а логарифму входного воздействия [6]. Поэтому вполне естественно для ряда приборов устанавливать логарифмические шкалы, в том числе используя децибелы. Восприятие звуковых сигналов разных частот также происходит в логарифмическом масштабе. По этой причине музыкальная шкала частот является логарифмической.

Вторая причина связана с преимуществами логарифмической шкалы в тех случаях, когда при решении конкретной задачи приходится иметь дело с величинами, различающимися на много порядков. В качестве примеров можно привести задачу графического отображения уровней сигналов, частотных диапазонов звуковоспроизводящих устройств и радиоприемников, диаграммы направленности антенны, амплитудно-частотных характеристик и фазо-частотных характеристик электрических фильтров, определение величин частот при настройке фортепиано, графическое отображение скоростей в космонавтике и авиации и т. п.

Третья причина заключается в возможности замены операции перемножения величин операцией сложения. При последовательном включении различных электротехнических устройств общая частотная характеристика (АЧХ) может быть получена не путем перемножения, а путем сложения отдельных АЧХ в логарифмическом масштабе.

5.3. Причины применения относительных единиц в инфокоммуникациях

Как отмечалось ранее, логарифмические единицы были созданы для упрощения вычислений. Понятно, что в XVII веке это было актуально, поскольку тогда еще не было электрических калькуляторов. Однако тогда не было ни электросвязи, ни радиосвязи. С развитием техники связи применение логарифмических единиц стало особенно актуальным. Их актуальность сохранилась и настоящее время.

Во-первых, в современной технике связи имеется большое количество величин, меняющихся в широком диапазоне. Это наблюдается, например, в акустике при исполнении оркестром музыкального произведения. Электрический сигнал, передаваемый при этом по радио, также изменяется в широком диапазоне. Наблюдение и измерение параметров такого сигнала осуществляется на экране осциллографа в логарифмическом масштабе, поскольку в линейном масштабе слабый сигнал (пиано) сгруппируется около нуля. Также в логарифмическом масштабе откладывается частота сигнала, поскольку минимальное ее значение 25 Гц, а максимальное — около 15 000 Гц. Также в логарифмическом масштабе изображаются многие графики в научных статьях и книгах.

Второй причиной является практическая необходимость измерения относительных величин при решении конкретных задач. В качестве примера приведем задачу измерения затухания проводной линии телефонной связи. Для этого надо измерить сигналы на ее входе и выходе и вычислить их отношение. Однако для оценки затухания можно поступить иначе. Входное напряжение линии нормировано и поддерживается на нормированном значении. Его можно принять за единицу измерения. Прибор, измеряющий напряжение на выходе линии, может быть проградуирован относительно входного сигнала непосредственно в дБ, и затухание может быть определено непосредственно по его шкале. В децибелах в связи измеряются коэффициенты усиления и ослабления, уровни сигналов и шумов, затухание электромагнитных излучений, параметры антенн и т. п.

На ранних этапах развития техники связи в качестве логарифмической единицы использовался непер (Нп). Эта единица широко использовалась не только в измерительных процессах, но и в нормативных документах техники связи и научных публикациях. По этой причине в старых нормативных документах и книгах читатель столкнется с параметрами в неперах. В дальнейшем в технике связи начал применяться децибел (дБ), который равен одной десятой бела. Причина заключается в том, что бел имеет слишком большую величину.

ну, вследствие чего им неудобно пользоваться на практике. Разница между ними в том, что отношение величин, выраженное в децибелах, предполагает использование десятичных логарифмов (по основанию 10), тогда как для отношения в неперах используются натуральные логарифмы (по основанию $e = 2,718281828...$).

5.4. Определение единицы «децибел»

5.4.1. Измерение «энергетических» величин

Изначально децибел использовался для оценки отношения мощностей, и в каноническом, привычном смысле величина, выраженная в децибелах, предполагает логарифм отношения двух мощностей и вычисляется по формуле

$$\text{дБ} = 10 \lg \frac{P_1}{P_0}, \quad (5.1)$$

где P_1/P_0 — отношение значений двух мощностей: измеряемой P_1 к так называемой опорной P_0 , то есть базовой, взятой за нулевой уровень (имеется в виду нулевой уровень в единицах дБ, поскольку в случае равенства мощностей $P_1 = P_0$ логарифм их отношения $\lg \frac{P_1}{P_0} = 0$).

Соответственно, переход от дБ к отношению мощностей осуществляется по формуле

$$\frac{P_1}{P_0} = 10^{(0,1 \cdot \text{величина в дБ})}. \quad (5.2)$$

Мощность P_1 может быть найдена при известной опорной мощности P_0 по выражению

$$P_1 = P_0 \cdot 10^{(0,1 \cdot \text{величина в дБ})}. \quad (5.3)$$

5.4.2. Измерение «неэнергетических» величин

При применении децибел для оценки «неэнергетических» величин они должны быть преобразованы в энергетические. Так как, согласно закону Джоуля – Ленца, $P = U^2/R$ или $P = I^2 R$, применительно к оценке относительного значения по напряжению имеем

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{U_1^2}{R_1} \cdot \frac{R_0}{U_0^2}, \quad (5.4)$$

где R_1 — сопротивление, на котором определяется изменяемое напряжение U_1 , а R_0 — сопротивление, на котором было определено опорное напряжение U_0 .

В общем случае напряжения U_1 и U_0 могут регистрироваться на различных по величине сопротивлениях ($R_1 \neq R_0$). Такое может быть, например, при определении коэффициента усиления усилителя, имеющего различные выходное и входное сопротивления, или при измерении потерь в согласующем устройстве, трансформирующем сопро-

тивления. Поэтому в общем случае величина в децибелах равна

$$10 \lg \frac{P_1}{P_0} = 10 \lg \left(\frac{U_1^2}{R_1} \cdot \frac{R_0}{U_0^2} \right). \quad (5.5)$$

Только в частном (но весьма распространенном) случае, если оба напряжения U_1 и U_0 измерялись на равных сопротивлениях ($R_1 = R_0$), можно пользоваться кратким выражением величины в децибелах, равным

$$10 \lg \frac{P_1}{P_0} = 10 \lg \left(\frac{U_1}{U_0} \right)^2 = 20 \lg \frac{U_1}{U_0}. \quad (5.6)$$

5.4.3. Децибелы «по мощности», «по напряжению» и «по току»

Из правила, соответствующего формуле (5.1), следует, что дБ бывают только «по мощности». Тем не менее, в случае равенства $R_1 = R_0$ (в частности, если R_1 и R_0 — одно и то же сопротивление, или в случае, если соотношение сопротивлений R_1 и R_0 равно единице) говорят 0 дБ «по напряжению» и «по току», подразумевая при этом следующие выражения:

а) дБ по напряжению

$$20 \lg \frac{U_1}{U_0}; \quad (5.7)$$

б) дБ по току

$$20 \lg \frac{I_1}{I_0}. \quad (5.8)$$

Нетрудно подсчитать, что, в частности, при регистрации изменения мощности на +1 дБ (+1 дБ «по мощности») мощность увеличилась в 1,259 раза, при регистрации снижения мощности в два раза оценка в децибелах составит 3,01 дБ.

5.4.4. Переход от дБ к «разам»

Чтобы вычислить изменение «в размах» по известному изменению в дБ, можно воспользоваться формулами:

а) для мощности

$$\frac{P_1}{P_0} = \sqrt[10]{10^{\text{дБ}}} = 10^{\text{дБ}/10}; \quad (5.9)$$

б) для напряжения (силы тока)

$$\frac{U_1}{U_0} = \sqrt[20]{10^{\text{дБ}}} = 10^{\text{дБ}/20} = 10^{0,05 \text{ дБ}}. \quad (5.10)$$

5.4.5. Переход от дБ к мощности

Для этого нужно знать значение опорного уровня мощности P_0 . Например, при $P_0 = 1$ мВт и известном изменении на +20 дБ

$$P_1 = \left(\sqrt[10]{10^{\text{дБ}}} \right) P_0 = \left(\sqrt[10]{10^{20}} \right) \cdot 0,001 = 0,1 \text{ Вт}. \quad (5.11)$$

5.4.6. Переход от дБ к напряжению (току)

Для этого нужно знать значение опорного уровня напряжения U_0 и определиться, регистрировалось ли напряжение на одинаковом сопротивлении или же для решаемой задачи различие значений сопротивлений не важно. Например, при условии $R_0 = R_1$, заданном $U_0 = 2$ В и приросте напряжения на 6 дБ

$$U_1 = \left(\sqrt[20]{10^{дБ}}\right) U_0 = \left(\sqrt[20]{10^6}\right) \cdot 2 = 4 \text{ В.} \quad (5.12)$$

При некотором навыке операции с децибелами вполне реально выполнять в уме. Более того, нередко это очень удобно: вместо умножения, деления, возведения в степень и извлечения корня удается обходиться сложением и вычитанием «децибельных» единиц.

Для этого следует применять следующие соотношения:

$$1 \text{ дБ} = \text{в } 1,25 \text{ раза,}$$

$$3 \text{ дБ} = \text{в } 2 \text{ раза,}$$

$$10 \text{ дБ} = \text{в } 10 \text{ раз.}$$

Отсюда, раскладывая «более сложные значения» на «составные», получаем:

$$6 \text{ дБ} = 3 \text{ дБ} + 3 \text{ дБ} = \text{в } 2 \cdot 2 = \text{в } 4 \text{ раза,}$$

$$9 \text{ дБ} = 3 \text{ дБ} + 3 \text{ дБ} + 3 \text{ дБ} = \text{в } 2 \cdot 2 \cdot 2 = \text{в } 8 \text{ раз,}$$

$$12 \text{ дБ} = 4 \cdot (3 \text{ дБ}) = \text{в } 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = \text{в } 16 \text{ раз,}$$

$$13 \text{ дБ} = 10 \text{ дБ} + 3 \text{ дБ} = \text{в } 10 \cdot 2 = \text{в } 20 \text{ раз,}$$

$$20 \text{ дБ} = 10 \text{ дБ} + 10 \text{ дБ} = \text{в } 10 \cdot 10 = \text{в } 100 \text{ раз,}$$

$$30 \text{ дБ} = 20 \text{ дБ} + 10 \text{ дБ} = \text{в } 100 \cdot 10 = \text{в } 1000 \text{ раз.}$$

Сложению (вычитанию) значений в дБ соответствует умножение (деление) самих отношений. Отрицательные значения дБ соответствуют обратным отношениям. Например, уменьшение мощности в 40 раз — это в $4 \cdot 10$ раз или на $(6 \text{ дБ} + 10 \text{ дБ}) = 16 \text{ дБ}$.

5.4.7. Условные обозначения

При оценке различных физических величин в литературе применяют условные обозначения. В соответствии с международным стандартом МЭК 27-3 при необходимости указать исходную величину ее значение помещают в скобках за обозначением логарифмической величины.

Для различных физических величин одному и тому же числовому значению, выраженному в децибелах, могут соответствовать разные уровни сигналов (вернее, разности уровней). Поэтому во избежание путаницы такие «конкретизированные» единицы измерения обозначают теми же буквами «дБ», но с добавлением индекса — общеприня-

того обозначения измеряемой физической величины. Например «дБВ» (децибел относительно вольта) или «дБмкВ» (децибел относительно микровольта), «дБВт» (децибел относительно ватта) и т. п.

5.4.8. Опорный (абсолютный) уровень

Кроме обычного применения децибела для определения отношения двух величин, децибел используют и для измерения абсолютных значений. Для этого достаточно условиться, какой уровень измеряемой физической величины будет принят за опорный уровень (условный 0 дБ).

Международный консультативный комитет (еще в то время, когда наибольшее распространение имели воздушные линии из медных проводов) установил для измерения мощностей, напряжений и токов в логарифмических единицах одинаковое для всех стран начало отсчета, которое было названо *абсолютным нулевым уровнем*. В качестве исходного уровня был установлен абсолютный уровень по мощности. За мощность, соответствующую нулевому отсчету в логарифмических единицах, была взята мощность в один милливольтампер для кажущихся мощностей и один милливатт для активных мощностей. Выбор этой величины обусловлен, с одной стороны, малыми значениями мощностей сигналов, передаваемых по линиям связи, и, с другой стороны, необходимостью математически удобно связать ее с общепринятыми в электротехнике единицами.

В качестве производных от уровня по мощности были установлены: абсолютный нулевой уровень по напряжению 0,775 В и абсолютный нулевой уровень по току 1,29 мА. Эти значения напряжения и тока получены из расчета, что мощность 1 мВ·А выделяется на сопротивлении 600 Ом по известной формуле

$$P = \left| \frac{U^2}{Z} \right| = |I^2 Z|. \quad (5.13)$$

Все другие значения абсолютных уровней по мощности, напряжению и току выражаются с помощью десятичных логарифмов в децибелах, исходя из формул:

– для уровней по мощности

$$L_P = 10 \lg \frac{P}{1}, \text{ дБ}; \quad (5.14)$$

– для уровней по напряжению

$$L_U = 20 \lg \frac{P}{0,775}, \text{ дБ}; \quad (5.15)$$

– для уровней по току

$$L_I = 10 \lg \frac{P}{1,29}, \text{ дБ}. \quad (5.16)$$

Приведенные формулы выведены с расчетом применения децибела. Однако децибел был принят в качестве основной логарифмической единицы по решению международных организаций в 1971 г. До этого в качестве логарифмической единицы использовались неперы. Поэтому в ряде принятых ранее нормативных документов, в статьях и книгах, имеющих историческое значение, использовались неперы.

При определении опорных уровней в неперах в приведенных выше формулах должны использоваться натуральные логарифмы с основанием $e = 2,718281828$. Натуральные логарифмы использовались по той причине, что распространение электромагнитных волн вдоль разных линий передачи характеризуется множителем $e^{j\omega t}$, где e — основание натуральных логарифмов. При использовании старых документов и средств измерений значения, выраженные в неперах, можно перевести в децибелы на основе соотношений $1 \text{ дБ} = 0,115 \text{ Нп}$ и $1 \text{ Нп} = 8,686 \text{ дБ}$.

Следует отметить, что при измерении абсолютных уровней их значения могут быть либо больше нулевого значения, либо меньше. В первом случае, когда $P > 1 \text{ мВ}$, $U > 0,775 \text{ В}$ и $I > 1,29 \text{ мА}$, соответствующие им уровни положительны, а когда $P < 1 \text{ мВ}$, $U < 0,775 \text{ В}$ и $I < 1,29 \text{ мА}$, соответствующие им уровни отрицательны. Следовательно, при записи результатов измерений следует указывать знак. Следует также отметить, что если измерения осуществляются на сопротивлении 600 Ом , то уровни по мощности, напряжению и току совпадают по величине.

На основании формул, определяющих абсолютные уровни по мощности, напряжению и току, можно определить разность уровней сигналов в разных точках электрической цепи:

$$L_{P_1} - L_{P_2} = 10 \lg \frac{P_1}{P_2}, \text{ дБ}; \quad (5.17)$$

$$L_{U_1} - L_{U_2} = 20 \lg \frac{U_1}{U_2}, \text{ дБ}; \quad (5.18)$$

$$L_{I_1} - L_{I_2} = 20 \lg \frac{I_1}{I_2}, \text{ дБ}. \quad (5.19)$$

Кроме разности уровней при измерениях применяют термины «относительный уровень» и «измерительный уровень». Под относительным уровнем $L_{\text{отн}}$ понимается уровень, отсчитываемый относительно некоторого уровня L_0 , принятого за начальный. Величина относительного уровня определяется как разность между абсолютным уровнем в конкретной точке L_1 и абсолютным уровнем L_0 , соответствующим началом отсчета:

$$L_{\text{отн}} = L_1 - L_0. \quad (5.20)$$

При вычислении относительного уровня можно пользоваться формулами (5.17)–(5.19), приведенными выше.

В технике связи широко применяется термин «измерительный уровень». Под измерительным уровнем $L_{\text{изм}}$ в некоторой точке линии связи понимается абсолютный уровень, имеющий место в данной точке при подаче на вход тока с частотой 800 Гц от генератора, имеющего ЭДС $2 \times 0,775$ В и внутреннее сопротивление 600 Ом. Такой генератор на нагрузке 600 Ом выделяет напряжение 0,775 В, т.е. абсолютный нулевой уровень по напряжению.

5.5. Стандартные обозначения

При изучении литературы, посвященной технике связи, читателю приходится сталкиваться с условными обозначениями международного уровня. Наиболее часто применяются следующие обозначения.

dBm (русское «дБм») — опорный уровень — это мощность в 1 мВт. Мощность обычно определяется на номинальной нагрузке (для профессиональной техники — обычно 10 кОм для частот менее 10 МГц, для радиочастотной техники — 50 Ом или 75 Ом). Например, «выходная мощность усилительного каскада составляет 13 дБм» (то есть мощность, выделяющаяся на номинальной для этого усилительного каскада нагрузке, составляет 20 мВт).

dBV (русское «дБВ») — опорное напряжение 1 В на номинальной нагрузке (для бытовой техники — обычно 47 кОм); например, стандартизованный уровень сигнала для бытового аудиооборудования составляет 10 дБВ, то есть 0,316 В на нагрузке 47 кОм.

dBuV (русское «дБмкВ») — опорное напряжение 1 мкВ; например, «чувствительность радиоприемника, измеренная на антенном входе, — 10 дБмкВ с номинальным сопротивлением антенны 50 Ом».

dBu — опорное напряжение 0,775 В, соответствующее мощности 1 мВт на нагрузке 600; например, стандартизованный уровень сигнала для профессионального аудиооборудования составляет +4 dBu, то есть 1,23 В.

dBm0 (русское «дБм0») — опорная мощность в дБм в точке нулевого относительного уровня. «Абсолютный уровень мощности относительно 1 мВт в точке линии передачи с нулевым уровнем».

Условные обозначения, применяемые в технике инфокоммуникаций в РФ, и их связь с международными обозначениями устанавливаются в ГОСТах. Например ГОСТ 24204-80 «Единица децибел для измерения уровней, затуханий и усиления в технике проводной связи». В табл. 5.1 приведены обозначения для величин усиления и затухания, а в табл. 5.2 — обозначение различных уровней сигнала.

В ГОСТ 24204-80 дано стандартное определение абсолютного

Таблица 5.1

Затухание (A) дБ (dB)		Усиление (S) дБ (dB)	
по мощности	по напряжению	по мощности	по напряжению
$10 \lg \frac{P_1}{P_2}$	$20 \lg \frac{U_1}{U_2}$	$10 \lg \frac{P_2}{P_1}$	$20 \lg \frac{U_2}{U_1}$

Таблица 5.2

Виды уровней	Обозначение единицы уровней		Определение уровня
	русское	международное	
Абсолютный уровень сигнала по мощности	дБм	dBm	$L_1 = 10 \lg P_x$
Абсолютный уровень сигнала по напряжению	дБн	dBu	$L_2 = 20 \lg \frac{U_x}{0,7746}$
Относительный уровень сигнала по мощности	дБо	dBr	$L_3 = 10 \lg \frac{P_x}{P_0}$
Относительный уровень сигнала по напряжению	дБон	dBru	$L_4 = 20 \lg \frac{U_x}{U_0}$
Абсолютный уровень сигнала по мощности, приведенный к точке с нулевым относительным уровнем по мощности	дБм0	dBm0	$L_5 = L_1 - L_3$

уровня сигнала по мощности, как $P_0 = 1$ мВт или 1 мВ·А (mV или mV·A) и абсолютного уровня сигнала по напряжению, для которого

$$U_0 = \sqrt{R_0 \cdot P_0} = \sqrt{600 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \approx 0,7746 \text{ В (V)}.$$

Значение абсолютного уровня сигнала по напряжению совпадает со значением абсолютного уровня сигнала по мощности в данной точке при полном сопротивлении Z_x , равном активному сопротивлению 600 Ом. При других полных сопротивлениях Z_x значение уровня по мощности может быть найдено из значения уровня по напряжению в данной точке путем прибавления к нему поправки, равной $10 \lg \frac{600}{|Z_x|}$.

Измерители уровня, используемые в инфокоммуникациях, часто имеют две шкалы: одну, проградуированную в абсолютных уровнях напряжения для 600-омной цепи (нулю соответствует 0,775 В), другую для 135-омной (нулю соответствует 0,367 В), или же одну для 135-омной и вторую для 75-омной (нулю соответствует 0,274 В).

Значения абсолютных нулевых уровней напряжения и токов, определяемых из мощности 1 мВт для других величин номинального активного сопротивления, приведены в табл. 5.3.

Для перехода от шкал нестандартных измерителей уровня напряжения к стандартным значениям абсолютных уровней напряжения необходимо вводить поправки Δ_U , приведенные в табл. 5.4.

Таблица 5.3

Номинальное сопротивление цепи, Ом	Напряжение, В	Ток, мА
50	0,2236	4,472
75	0,2739	3,652
100	0,3162	3,162
135	0,3674	2,722
150	0,3873	2,582
170	0,4123	2,425
600	0,7746	1,2916
1400	1,183	0,8454

Таблица 5.4

Номинальное сопротивление цепи, Ом	$\frac{R_{\text{ном}}}{600}$	Поправка $\Delta_U = 20 \lg \sqrt{\frac{R_{\text{ном}}}{600}}$, дБ
50	0,0833	-10,8
75	0,125	-9,00
100	0,166	-7,75
135	0,225	-6,46
150	0,250	-6,00
170	0,284	-5,46
1400	2,330	3,69

5.6. Параметры канала ТЧ и типовых сетевых трактов

Параметры и характеристики канала тональной частоты (ТЧ) и типовых сетевых трактов сложились исторически в период передачи аналоговых сигналов. В настоящее время преобладают цифровые методы передачи. Однако правила нормирования параметров с использованием логарифмических единиц сложились применительно к аналоговым методам передачи, а далее перешли на цифровые системы связи. Параметры, нормированные государственными стандартами, можно разбить на несколько групп [1, 2]:

- параметры входа и выхода канала и тракта;
- параметры и характеристики остаточного затухания;
- параметры и характеристики, связанные с изменением фаз передаваемых сигналов;
- параметры, определяющие уровень помех.

Параметры входа и выхода канала или тракта определяют степень согласованности входного и выходного сопротивлений с сопротивлениями внешних цепей, внутренним сопротивлением источника передаваемых сигналов и сопротивлением нагрузки тракта. Допустимое отклонение входного и выходного сопротивлений от номинального R_0 определяют, нормируя значение коэффициента отражения δ или затухания несогласованности A_δ в дБ:

$$\delta \geq \left| \frac{\bar{Z}_{\text{тр}} - R_0}{\bar{Z}_{\text{тр}} + R_0} \right|, \quad A_\delta \leq -20 \lg \delta, \quad (5.21)$$

где $\bar{Z}_{\text{тр}}$ — полное входное или выходное сопротивление данного канала или тракта.

Для канала ТЧ и сетевых трактов нормы на уровни сигналов на входе и выходе, а также остаточное затухание установлены в децибелах. Так, для канала ТЧ уровень входного сигнала $L_{\text{лвх}} = -13$ дБ, а уровень сигнала на выходе $L_{\text{лвых}} = +4$ дБ, остаточное затухание $A_r = -17$ дБ. Входные и выходные уровни первичного, вторичного и третичного трактов равны соответственно $L_{\text{лвх}} = -36$ дБ и $L_{\text{лвых}} = -23$ дБ, а остаточное затухание $A_r = -13$ дБ.

В децибелах также нормированы допустимые уровни шума. Измеренное среднее напряжение невзвешенного шума для простого канала ТЧ эталонной цепи протяженностью 2500 км не должно превышать 6,4 мВ (−46 дБм0, или 25 000 пВт0 в точке нулевого относительного уровня). При протяженности канала ТЧ, не равной 2500 км, допустимая мощность шумов определяется из суммы двух слагаемых: мощности шумов линейного тракта и мощности невзвешенного шума, вносимого оборудованием преобразования оконечных станций.

5.7. Измерение параметров металлических кабелей

5.7.1. Измерение затухания несогласованности

При реализации каналов ТЧ и сетевых трактов в аналоговых системах применяются металлические кабели. Несмотря на внедрение оптических кабелей, задача измерения параметров металлических кабелей остается актуальной. Среди таких параметров находится затухание несогласованности. Как известно, нормальная передача сигнала по кабелю требует согласования сопротивлений источников и приемников сигнала с волновым сопротивлением кабеля. Необходимо такое же согласование при соединении четырехполюсников. Затухание несогласованности двух сопротивлений Z_1 и Z_2 определяется как

$$\alpha_n = 20 \lg \left| \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 - Z_2} \right|, \quad (5.22)$$

где Z_1 и Z_2 — сопротивления, несогласованность которых измеряется.

5.7.2. Измерение затухания асимметрии

Подверженность телефонной линии помехам в сильной степени зависит от симметричности цепи относительно земли. Асимметрия цепи на переменном токе определяется неравенством полного сопротивления проводов относительно земли. Величина асимметрии переменному току определяется из выражения

$$\xi = \frac{|Z_1 - Z_2|}{|(Z_1 + Z_2)/2|} \cdot 100\%, \quad (5.23)$$

где Z_1 — полное сопротивление первого провода относительно земли, Z_2 — полное сопротивление второго провода относительно земли.

Кроме понятия величины асимметрии, широко используют понятие затухание асимметрии, являющейся логарифмической величиной:

$$A_\xi = 20 \lg \frac{1}{\xi} = 20 \lg \left| \frac{Z_1 + Z_2}{2(Z_1 - Z_2)} \right|. \quad (5.24)$$

Если цепь абсолютно симметрична относительно земли, то $Z_1 = Z_2$ и $A_\xi = \infty$.

Для кабельных линий затухание асимметрии на частоте 800 Гц должно быть не менее 60...65 дБ, а для канала вещания — не менее 80...82 дБ на частоте 5000 Гц.

5.7.3. Измерение затухания четырехполюсника

Собственное (характеристическое) затухание четырехполюсника выражается в децибелах как

$$\alpha_C = 10 \lg \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}}, \text{ дБ}, \quad (5.25)$$

где $P_{\text{вх}}$ — кажущаяся мощность на входе четырехполюсника, $P_{\text{вых}}$ — кажущаяся мощность на выходе, подключенному к согласованной нагрузке Z_n .

Так как измерение затухания обычно осуществляется с помощью средств измерений напряжения или уровней, то характеристическое затухание также выражается формулой

$$\alpha_C = 10 \lg \left| \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}}} \right| + 10 \lg \left| \frac{Z_{C2}}{Z_{C1}} \right|, \quad (5.26)$$

где Z_{C1} и Z_{C2} — соответственно характеристическое сопротивление четырехполюсника со стороны входа и выхода.

Если в качестве средства измерений использовался измеритель уровня, то имеем

$$\alpha_C = P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}} + 10 \lg \left| \frac{Z_{C2}}{Z_{C1}} \right|. \quad (5.27)$$

Измерение собственного затухания четырехполюсника осуществляют путем измерения $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$ (или $P_{\text{вх}}$ и $P_{\text{вых}}$), либо путем срав-

нения измеряемого затухания с затуханием образцового прибора (магазина затуханий).

5.8. Применение децибелов в акустике

Децибелы применяются не только для оценки электрических величин — мощности, напряжения, тока, сопротивления. В акустике децибелы применяются при количественных оценках звуковых величин и, в частности, звукового давления [3, 7].

Звуковое давление p представляет избыточное давление в среде по отношению к постоянному давлению, существующему там до появления звуковых волн. Единицей измерения звукового давления является паскаль (Па). Переменное звуковое давление (градиент звукового давления) преобразуется в пропорциональные электрические сигналы с помощью микрофона.

Интенсивность звука J связана со звуковым давлением p и колебательной скоростью частиц воздуха v зависимостью

$$J = pv. \quad (5.28)$$

Если звуковая волна распространяется в свободном пространстве, где нет отражения звука, то

$$v = \frac{p}{\rho c}; \quad (5.29)$$

здесь ρ — плотность среды, кг/м³; c — скорость звука в среде, м/с. Произведение ρc характеризует среду, в которой происходит распространение звуковой энергии, и называется ее *удельным акустическим сопротивлением*.

Можно записать, что

$$J = \frac{p^2}{\rho c}. \quad (5.30)$$

Если сопоставить приведенные формулы с формулами, выведенными ранее для мощности тока, напряжения и сопротивления, то легко обнаружить аналогию между отдельными понятиями, характеризующими электрические и акустические явления, и уравнениями, описывающими количественные зависимости между ними (табл. 5.5).

Как следует из табл. 5.5, аналогом электрической мощности являются акустическая мощность и интенсивность звука; аналогом напряжения служит звуковое давление; электрический ток соответствует колебательной скорости, а электрическое сопротивление — удельному акустическому сопротивлению. По аналогии с законом Ома для электрической цепи можно говорить об акустическом законе Ома. Следовательно, все, что говорилось о преобразовании в децибелы электрических величин, в равной мере относится и к акустическим явлениям.

Таблица 5.5. Аналогия между электрическими и акустическими характеристиками

Электрическая мощность P	Акустическая мощность P Интенсивность звука J
Напряжение U	Звуковое давление p
Электрический ток I	Колебательная скорость v
Электрическое сопротивление R	Удельное акустическое сопротивление ρc
$I = \frac{U}{R}$	$v = \frac{p}{\rho c}$
$P = UI$	$J = pv$
$P = \frac{U^2}{R}$	$J = \frac{p^2}{\rho c}$
$P = I^2 R$	$J = v^2 c$

Применение децибел в акустике весьма целесообразно. Интенсивности звуков в современных условиях могут различаться в сотни миллионов раз. Такой огромный диапазон изменений акустических величин создает большие неудобства при сопоставлении их абсолютных значений, а при использовании логарифмических единиц эта проблема снимается. Кроме того, установлено, что громкость звука при оценке ее на слух возрастает примерно пропорционально логарифму интенсивности звука. Таким образом, уровни этих величин, выраженные в децибелах, довольно близко соответствуют громкости, воспринимаемой ухом. Для большинства людей с нормальным слухом изменение громкости звука частотой 1 кГц ощущается при изменении интенсивности звука примерно на 26 %, т. е. на 1 дБ.

В акустике по аналогии с электротехникой определение децибел базируется на отношении двух мощностей. Так, абсолютный уровень интенсивности звука определяется формулой

$$L_{J_0} = 10 \lg \frac{J}{J_0}, \quad (5.31)$$

где J — акустическая мощность, оцениваемая в дБ, а J_0 — нулевой уровень.

Международным соглашением нулевым уровнем отсчета интенсивности звука принято считать $J_0 = 10^{-12}$ Вт/м². При таком уровне амплитуда колебаний барабанной перепонки уха человека меньше размеров атома, что соответствует порогу слышимости. При данном выборе нулевого уровня все слышимые звуки выражаются только положительными децибелами. Фактический порог слышимости для людей с нормальным слухом немного выше и равен 5...10 дБ.

Подобным же образом в децибелах выражается отношение двух интенсивностей звука J_1 и J_2 :

$$L_J = 10 \lg \frac{J_2}{J_1} = 20 \lg \frac{p_2}{p_1}. \quad (5.32)$$

Последнее уравнение справедливо только при условии равенства акустических сопротивлений, другими словами, постоянства физических параметров среды, в которой распространяются звуковые волны.

Децибелы, определенные по приведенным выше формулам, не связаны с абсолютными значениями акустических величин и применяются для оценки затухания звука, например, эффективности звуковой изоляции и систем подавления и заглушения шумов. Подобным образом выражаются и неравномерности частотных характеристик, т. е. разность максимального и минимального значений в заданном диапазоне частот различных излучателей и приемников звука — микрофонов, громкоговорителей и пр. Отсчет при этом обычно ведется от среднего значения рассматриваемой величины, либо (при работе в звуковом диапазоне) относительно значения при частоте 1 кГц.

Определив уровень интенсивности в децибелах в какой-либо точке пространства на расстоянии r_1 от источника звука (расчетным или опытным путем), можно вычислить уровень интенсивности на расстоянии r_2 :

$$L_{J_2} = L_{J_1} - 20 \lg \frac{r_2}{r_1}. \quad (5.33)$$

Если на приемник звука одновременно воздействуют два или несколько источников звука и известна интенсивность звука в децибелах, создаваемая каждым из них, то для определения результирующей величины децибелы следует обратить в абсолютные значения интенсивности (Вт/м^2), сложить их и эту сумму снова преобразовать в децибелы. Складывать сразу децибелы в этом случае нельзя, так как это соответствовало бы произведению абсолютных значений интенсивностей. Если имеется n одинаковых источников звука с уровнем каждого L_J , то их суммарный уровень будет

$$L = L_J + 10 \lg n. \quad (5.34)$$

Если уровень интенсивности одного источника звука превышает уровни остальных на 8...10 дБ и более, то можно учитывать только один этот источник, а действием остальных пренебречь.

Кроме оценки интенсивности звука в акустике производится оценка уровней громкости. Необходимость оценки уровней громкости связана со сложной зависимостью чувствительности человеческого уха к звукам разных частот. Так, например, при интенсивности звука порядка 70 дБ максимальная чувствительность имеет место в диапазоне частот 2...5 кГц. В более низком и более высоком диа-

пазонах чувствительность убывает. С ростом силы звука частотная характеристика уха выравнивается и при больших уровнях интенсивности (80 дБ и выше) ухо реагирует приблизительно одинаково на звуки разных частот звукового диапазона.

В акустике приходится постоянно считаться с этой особенностью слуха, и поэтому было введено специальное понятие — уровень громкости, которое определяет уровень интенсивности звука с учетом частотных и динамических свойств уха. Из этого следует, что интенсивность звука, которая измеряется специальными широкополосными приборами, и громкость, которая фиксируется ухом, — понятия не равнозначные.

За единицу громкости звука принят «сон» (лат. *sonus* — звук). Шкала сонов является шкалой субъективной оценки, разработана в результате многочисленных тестов испытуемых и стандартизована Международной организацией по стандартизации. Полученные экспериментальным способом оценки показывают, что громкость возрастает как кубический корень из интенсивности звука, то есть зависимость психологической оценки громкости (j) от физической интенсивности (мощности) звука (I) описывается формулой

$$j = kI^{1/3}, \quad (5.35)$$

где k — коэффициент, зависящий от частоты. 1 сон соответствует громкости чистого тона частотой 1000 Гц с уровнем 40 дБ. При увеличении уровня на каждые 10 дБ значение громкости в сонах удваивается.

5.8.1. Оценка шумовых параметров

Большинство звуков, с которыми приходится иметь дело в повседневной жизни, имеют шумовой характер. Характеристика громкости шумов на основе сопоставления с чистыми тонами 1 кГц проста, но приводит к тому, что оценка шума на слух может расходиться с показаниями измерительных приборов. Объясняется это тем, что при равных уровнях громкости шума наиболее раздражающее действие на человека оказывают составляющие шума в диапазоне 3...5 кГц. Шумы могут восприниматься как равно неприятные, хотя их уровни громкости не равны.

Раздражающее действие шума более точно оценивается другим параметром — т. наз. *уровнем воспринимаемого шума*. Мерой воспринимаемого шума служит уровень звука равномерного шума в октавной полосе со средней частотой 1 кГц, который в заданных условиях оценивается слушателем как одинаково неприятный с измеряемым шумом. Уровни воспринимаемого шума характеризуются единицами PNдБ (PNdB). Расчет их ведется по специальной методике.

Дальнейшим развитием системы оценки шумов являются так называемые эффективные уровни воспринимаемого шума, выражаемые в ЕРНдБ. Система ЕРНдБ позволяет комплексно оценивать характер воздействующего шума: частотный состав, дискретные составляющие в его спектре, а также продолжительность шумового воздействия.

По аналогии с единицей громкости сон введена единица шумности — «ной». За один ной принята шумность равномерного шума в полосе 910...1090 Гц при уровне звукового давления 40 дБ. В остальном ной сходен с сонами: рост шумности вдвое соответствует росту уровня воспринимаемого шума на 10 РНдБ. Например, 2 ной = 50 РНдБ, 4 ной = 60 РНдБ.

Для измерения всевозможных шумовых характеристик применяют специальные приборы — шумомеры. Шумомер представляет автономный переносный прибор, позволяющий измерять непосредственно в децибелах уровни интенсивности звука в широких пределах относительно стандартных уровней.

Шумомер состоит из высококачественного микрофона, широкополосного усилителя, переключателя чувствительности, меняющего усиление ступенями по 10 дБ, переключателя частотных характеристик и графического индикатора. Шумомеры позволяют определять как общие уровни интенсивностей звука при измерениях с линейной частотной характеристикой, так и уровни громкости звука при измерениях с частотными характеристиками, сходными с характеристиками человеческого уха. Диапазон измерений уровней звуковых давлений находится обычно в пределах от 20...30 до 130...140 дБ относительно стандартного уровня звукового давления $2 \cdot 10^{-5}$ Па. С помощью сменных микрофонов уровень измерений может быть расширен до 180 дБ.

Частотные характеристики всего тракта шумомера, включая микрофон, стандартизированы. Всего имеется пять частотных характеристик. Одна из них линейна в пределах всего рабочего диапазона частот, четыре другие приблизительно повторяют характеристики уха человека для чистых тонов при разных уровнях громкости. Они названы первыми буквами латинского алфавита А, В, С и D.

Установлены следующие суммарные уровни звука, измеренные по шкале А шумомера: жилые помещения — 30 дБ, аудитории и классы учебных заведений — 40 дБ, территории жилой застройки и площадки отдыха — 45 дБ, рабочие помещения административных зданий — 50 дБ.

В зависимости от спектрального состава шума ориентировочная норма предельно допустимых уровней, дБ, характеризуется цифрами, приведенными в табл. 5.6.

При отсутствии шумомера ориентировочную оценку уровней громкости различных шумов можно проводить с помощью табл. 5.7.

Таблица 5.6. Предельно допустимые уровни

Диапазон частот	Предельно допустимые уровни (дБ)
Высокочастотный от 800 Гц и выше	75...85
Среднечастотный 300...800 Гц	85...90
Низкочастотный ниже 300 Гц	90...100

Таблица 5.7. Шумы и их оценка

Оценка громкости на слух	Уровень шума в дБ	Источник и место расположения шума
Оглушительный	160	Повреждение барабанной перепонки
	140...170	Реактивные двигатели вблизи
	140	Предел терпимости к шуму
	130	Болевой порог, поршневые авиадвигатели (2–3 м)
	120	Гром над головой
	110	Очень шумный цех
Очень громкий	100	Симфонический оркестр (пик громкости)
	90	Уличный громкоговоритель
	80	Радиоприемник громко (2 м)
Громкий	70	Салон автобуса, зал большого магазина
Умеренный	60	Спокойный разговор (1 метр)
	50	Легковая машина (10–15 м), офис
Слабый	40	Шепот, читальный зал
	30	Шелест бумаги
	20	Больничная палата
Очень слабый	10	Студия радиоцентра, тихий сад
	0	Порог слышимости

5.9. Применение децибелов в системах мобильной связи

Применение децибелов в системах мобильной связи начинается при определении типа связи. Типы средств связи классифицируются по ряду признаков. По способу применения абонентские станции могут быть следующих типов: возимые, носимые, портативные, стационарные. Деление по классам в зависимости от мощности передатчика представлено в табл. 5.8.

Абонентские радиостанции (АР) имеют нормированные значения основных технических параметров [5, 8, 9]. Уровень побочных излучений на антенном выходе АР в активном режиме на частотах, отличных от несущей и вне боковых полос, обусловленных процессом модуляции, не должен превышать указанных в табл. 5.9.

Таблица 5.8. Классы мощности передатчиков

Класс мощности	Номинальная максимальная выходная мощность	
	GSM 900	GSM 1800
1	–	1 Вт (30 дБм)
2	8 Вт (39 дБм)	0,25 Вт (24 дБм)
3	5 Вт (37 дБм)	4 Вт (36 дБм)
4	2 Вт (33 дБм)	–
5	0,8 Вт (29 дБм)	–

Таблица 5.9

Диапазон частот	Уровень излучений, дБм	
	GSM 900	GSM 1800
100 кГц ... 1 ГГц	–36	–36
1 ГГц ... 12,75 ГГц	–30	–
1 ГГц ... 1710 МГц	–	–30
1710 МГц ... 1785 МГц	–	–36
1785 МГц ... 12,75 ГГц	–	–30

Таблица 5.10. Уровни побочных излучений

Диапазон частот	Уровень излучений, дБм
100 кГц ... 880 МГц	–57
880 МГц ... 915 МГц	–59
915 МГц ... 1000 МГц	–57
1 ГГц ... 1710 МГц	–47
1710 МГц ... 1785 МГц	–53
1785 МГц ... 12,75 ГГц	–47

Таблица 5.11. Предельные значения вероятностей ошибки

Тип канала	Вероятность ошибки в статических условиях распространения сигнала	
	GSM 900	GSM 1800
TCH/FS (FER)	$0,122 \cdot \alpha \%$	$0,122 \cdot \alpha \%$
class Ib (RBER)	$0,41/\alpha \%$	$0,41/\alpha \%$
class II (RBER)	2,439 %	2,439 %

Таблица 5.12. Градации уровня сигнала сотовой связи с базовой станцией

до –75 dBm	уверенная или нормальная связь в зданиях
–85... –75 dBm	уверенная связь на улице и в транспорте
–95... –85 dBm	средний уровень сигнала (пограничная зона)
–105... –95 dBm	низкий уровень сигнала (прием не гарантирован)
–110... –105 dBm	мин. уровень сигнала (связь на грани обрыва)

Уровень побочных излучений на антенном выходе АР в дежурном режиме не должен превышать значений, указанных в табл. 5.10.

Одним из главных нормируемых параметров приемника является его чувствительность. Чувствительность приемника оценивается по величине ошибки принимаемого сигнала. При уровнях принимаемых полезных сигналов, указанных в табл. 5.11, вероятность ошибки не должна превышать предельные значения, указанные в этой таблице. В табл. 5.11 $\alpha\%$ — коэффициент скругления спектра фильтра Найквиста в приемнике.

Кроме приведенных в качестве примеров нормируемых параметров, в системах сотовой связи нормируются в децибелах большое количество других параметров, что свидетельствует об актуальности применения относительных единиц в современных системах связи.

Список литературы

1. *Шумилин Н.П.* Специальные измерения в проводной связи. — М.: Связь, 1974. — 344 с.
2. ГОСТ 24204-80 «Единица децибел для измерения уровней, затуханий и усиления в технике проводной связи».
3. ГОСТ 26120-84 «Акустика авиационная. Термины и определения».
4. IEEE Alexander Graham Bell Medal.
<https://www.ieee.org/about/awards/medals/bell.html>
5. РД, 45.151-2000 Программа и методика технических испытаний системы сотовой радиотелефонной связи стандарта GSM при приемке и вводе в эксплуатацию законченного строительством объекта связи.
6. *Линдсей П., Норман Д.* Переработка информации у человека. — М.: Мир, 1974.
7. *Иофе В.К., Янпольский А.А.* Расчетные графики и таблицы по электроакустике. — М.: Госэнергоиздат, 1954.
8. РД 45.187-2001 «Абонентские радиостанции систем сотовой подвижной связи стандарта GSM 900/1800».
9. РД 45.301-2002 «Средства измерений электросвязи сетей подвижной связи стандарта GSM 900/1800».
10. *Зельдин Е.А.* Децибелы. — М.: Энергия, 1972.

Оглавление

Глава 1. История создания метрической системы мер	3
Глава 2. История измерения времени	20
2.1. Изобретение морского хронометра	20
2.2. Электрические часы	29
2.3. Атомные часы	31
Глава 3. Единицы измерения физических величин	33
3.1. Общий подход к выбору единиц измерения физических величин	33
3.2. Воспроизведение и передача размера единиц физических величин. Эталоны и образцовые средства измерения	34
3.3. Формулы размерности	37
3.4. Шкалы	38
3.5. Основные единицы системы СИ	47
3.6. Единицы физических величин, применяющиеся в системах инфокоммуникаций	79
Глава 4. Единицы измерения физических величин в основной системе СГС и производных системах СГСЭ, СГСМ и СГСГ	111
4.1. Система единиц СГС	111
4.2. Единица измерения магнитной индукции в системе СГС ..	112
4.3. Единица измерения магнитного потока в системе СГС	115
4.4. Единица измерения напряженности магнитного поля в системе СГС	117
4.5. Единица измерения магнитодвижущей силы в системе СГС	120
Глава 5. Относительные единицы измерений	123
5.1. Краткая история относительных единиц измерений	123
5.2. Причины применения логарифмических единиц в настоящее время	128
5.3. Причины применения относительных единиц в инфокоммуникациях	129
5.4. Определение единицы «децибел»	130
5.5. Стандартные обозначения	135
5.6. Параметры канала ТЧ и типовых сетевых трактов	137
5.7. Измерение параметров металлических кабелей	138
5.8. Применение децибелов в акустике	140
5.9. Применение децибелов в системах мобильной связи	145
Список литературы	148

Массовая радиобиблиотека; Вып. 1292

Научно-популярное издание

Хромой Борис Петрович

ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Редактор А. А. Терещенко

Компьютерная верстка А. А. Терещенко

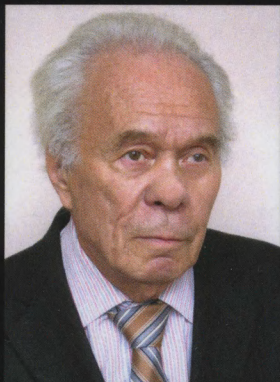
Обложка художника В. Г. Ситникова

Адрес издательства в Интернет www.techbook.ru

Подписано в печать 09.06.2019. Формат 60×90/16. Печать цифровая. Уч.-изд. л. 9,38

Тираж 500 экз. (2-й завод 50 экз.) Изд №190792

ООО «Научно-техническое издательство «Горячая линия – Телеком»



ХРОМОЙ БОРИС ПЕТРОВИЧ

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи
и информатики» (МТУСИ),
академик Международной академии информатизации,
Заслуженный деятель науки Российской Федерации.
Удостоен почетного звания «Почетный метролог».
Области научных и профессиональных интересов:
теория метрологии, практическое применение
метрологии в инфокоммуникационных системах,
исторические аспекты развития метрологии.

С научной, технической и исторической точек зрения рассмотрены основные существующие системы единиц измерения физических величин. С учетом того, что названия большинства из них выбраны в соответствии с фамилиями известных ученых, внесших существенный вклад в развитие мирового прогресса, большое внимание уделено историческим аспектам формирования систем единиц измерения на международном уровне.

Отдельная глава посвящена относительным единицам измерения – децибелам, поскольку логарифмический метод оценки измеряемых величин широко применяется на практике, особенно в технике связи.

Для широкого круга читателей.

Сайт издательства:

www.techbook.ru

ISBN 978-5-9912-0792-8



9 785991 207928