



Введение

Проблема обеспечения единства измерений имеет возраст, сопоставимый с возрастом человечества. Как только человек стал обменивать или продавать результаты своего труда, возник вопрос - как велик эквивалент этого труда и как велик продукт, представленный на обмен или продажу. Для характеристики этих величин использовались различные свойства продукта - размеры, - как линейные, так и объемные, - масса или вес, позднее цвет, вкус, состав и т. д. и т. п. Естественно, что в давние времена еще не существовало развитого математического аппарата, не было четко сформулированных физических законов, позволяющих охарактеризовать качество и стоимость товара. Тем не менее проблема справедливой сбалансированной торговли была актуальна всегда. От этого зависело благосостояние общества, от этого же возникали войны.

Первыми средствами обеспечения единства измерений были объекты, которые имеются в распоряжении человека всегда. Так появились первые меры длины, опирающиеся на размеры рук и ног человека. На Руси использовались локоть, пядь, сажень, косая сажень. На Западе - дюйм, фут, сохранившие свое название до сих пор. Поскольку размеры рук и ног у разных людей были разными, то должное единство измерений не всегда удавалось обеспечить. Следующим шагом были законодательные акты различных правителей, предписывающие, например, за единицу длины считать среднюю длину стопы нескольких людей. Иногда правители просто делали две зарубки на стене рыночной площади, предписывая всем торговцам делать копии таких «эталонных мер». В настоящее время такую меру можно видеть на Вандомской площади в Париже в том месте, где когда-то располагался главный рынок Европы.

По мере развития человечества и науки, особенно физики и математики, проблему обеспечения единства измерений стали решать более широко. Появились государственные службы и хранилища мер, с которыми торговцам в законодательном порядке предписывалось сравнивать свои меры. Для определения размеров единиц выбирались размеры объектов, не изменяющиеся со временем. Например, для определения размера единицы длины измерялся меридиан Земли, для определения единицы массы измерялась масса литра воды. Единицы времени с давних времен до настоящего момента связывают с вращением

Земли вокруг Солнца и вокруг собственной оси.

Дальнейший прогресс в обеспечении единства измерений состоял уже в произвольном выборе единиц, не связанных с веществами или объектами. Это связано с тем фактом, что изготовить копию меры (передать размер единицы какой-либо величины) можно с гораздо более высокой точностью, чем повторно независимо воспроизвести эту меру. В самом деле, точность определения длины меридиана и деления его на 40 миллионов частей оказывается очень невысокой. Подробно к этому мы вернемся при определении основных понятий и категорий метрологии. Здесь в кратком историческом экскурсе интересно вспомнить, что программа измерения длины парижского меридиана оказалась более полезной в составлении подробных карт перед наполеоновскими войнами, чем в точном определении единицы длины.

Гигантский скачок в точности измерений механических величин был совершен при внедрении лазеров в измерительную технику. Образно говоря, точность средств измерения стала определяться параметрами отдельного атома. Если выбрать определенный тип атома, определенный изотоп элемента, поместить атомы в резонатор лазера и использовать все преимущества, присущие лазерному излучению, то реально достижимая погрешность воспроизведения единицы длины может сказываться в тринадцатом-четырнадцатом знаках.

История развития науки об обеспечении единства измерений может быть прослежена не только на совершенствовании точности и единообразия определения какой-то одной единицы. Важным моментом является количество единиц физических величин, их отнесение к основным или производным, а также исторический аспект образования дольных и кратных единиц.

По мере совершенствования физики и математики появилась проблема измерения нового класса физических величин. Так при развитии теории электричества встал вопрос - как быть с единицами электромагнитных величин? С одной стороны, новый класс явлений подсказывал необходимость введения новых единиц и величин. С другой - исходно была установлена связь между электромагнитными явлениями и эффектами механическими - законы Кулона и Био-Савара-Лапласа. Точки зрения наиболее авторитетных ученых по этому поводу также разделились. Некоторые считали, что «рассмотрение (электромагнитных явлений) будет более плодотворным, если ввести четвертую, не зависящую от механических единиц» (А. Зоммерфельд). Другие, напротив, считали различные проявления свойств материи единым целым и были противниками введения независимых

электрических величин и единиц. В результате в практике появились системы единиц физических величин, имеющие различное число основных, т. е. произвольно выбранных, физических величин. Подробно на этом мы остановимся в разделе, посвященном единицам физических величин.

С исторической точки зрения интересно обратить внимание на сложившуюся практику образования дольных (более мелких) и кратных (более крупных) единиц физических величин. В настоящее время мы пользуемся в основном десятичной системой счета, и действующая международная система единиц физических величин предписывает образовывать дольные и кратные единицы, домножая размер основной единицы на множитель, кратный десяти. Тем не менее, история знает использование самых разнообразных множителей кратности. Например, сажень как мера длины равнялась трем аршинам, 1 фут равнялся 12 дюймам, 1 аршин - 16 вершкам, 1 пуд - 40 фунтам, 1 золотник - 96 долям, 1 верста - 500 саженьям и т.д.

Такая исторически сложившаяся практика образования дольных и кратных величин оказалась крайне неудобной. Поэтому при принятии международной системы единиц СИ на эту проблему обращалось особое внимание. По большому счету десятичная система оказалась неудобной только при исчислении времени, т. к. единицы одноименной величины разного размера оказались кратными 12 (соотношение года и месяца) и 365,25 (соотношение года и суток). Эта кратность обусловлена скоростью вращения Земли и фазами Луны и является наиболее естественной. Дальнейшая замена кратности в соотношении час-минута и минута-секунда с 60 на кратное 10 уже особого смысла не имела. Из других часто употребляемых физических величин и единиц отступления от десятичной системы сохранилось в градусной мере угла, когда окружность делится на 360 градусов, а градус на минуты и секунды.

Совершая исторический экскурс в метрологию, не следует забывать, что все сказанное в полной мере относится только к странам-участницам Метрической конвенции. Во многих странах до сих пор сохраняется своя особая, иногда экзотическая система физических величин и единиц. Среди этих стран, как это ни странно, находятся Соединенные Штаты Америки - современная супердержава. Внутри этой страны до сих пор в обиходе величины и единицы старой Англии. Даже температуру там принято измерять в градусах Фаренгейта.

В связи с вышеизложенным знакомство с системами единиц, отличными от системы СИ, знакомство с различными системами счета единиц при измерениях в настоящее

время носят не только познавательный характер. При расширении международных контактов может оказаться так, что знание альтернативных систем величин и единиц сослужит пользователю добрую службу.

При изложении основополагающих моментов, относящихся к системе СИ, и при рассмотрении отдельных видов измерений мы иногда будем возвращаться к историческим корням выбора тех или иных физических величин. Сейчас важно помнить, что рассматриваемая проблема оптимального выбора физических величин и единиц будет существовать всегда, так как научно-технический прогресс постоянно предоставляет новые возможности в практике измерений. Сегодня это лазеры и синхротронное излучение, и завтра, возможно, появятся новые горизонты, опирающиеся на «теплую сверхпроводимость» или какое-либо замечательное достижение человеческой мысли.

Что такое метрология?

«Метрология — это наука об измерениях» (Международный словарь основных и общих терминов в метрологии). Измерения и метрология важны практически во всех аспектах человеческой деятельности, поскольку они используются везде, начиная от контроля за производством, измерения качества окружающей среды, оценки здоровья и безопасности, а также испытания качества материалов, пищевых продуктов и других товаров для обеспечения честной торговли и защиты потребителя. Приведем несколько примеров.

Термин «метрологическая инфраструктура» используется применительно к метрологическим мощностям страны или региона и подразумевает наличие калибровочных и проверочных служб, метрологических институтов и лабораторий, а также организацию и управление метрологической системы.

Термин «метрология» часто используется в широком смысле, охватывая как теоретические, так и практические аспекты измерений. Если нужно более конкретное определение, то можно использовать следующие термины:

Общая метрология: «Часть метрологии, которая занимается проблемами, общими для всех метрологических вопросов, независимо от измеряемой величины» (Международный словарь терминов, в законодательной метрологии). Общая метрология затрагивает общие теоретические и практические проблемы, касающиеся единиц измерений (т.е. структура системы единиц, или преобразование единиц измерений в формулах); проблемы ошибок при измерениях; проблемы метрологических свойств измерительных инструментов,

применимых независимо от рассматриваемой величины. Иногда, вместо термина «общая метрология» используется «научная метрология».

Существуют различные специальные области метрологии. Некоторые примеры:

- Метрология массы, которая связана с измерением масс;
- Метрология размерности, которая связана с измерениями длин и углов;
- Метрология температуры, которая касается измерений температур;
- Химическая метрология, которая связана со всеми видами измерений в химии.

Промышленная метрология связана с измерениями в производстве и с процедурами управления качеством. Типичные вопросы — это процедуры и интервалы калибровки, контроль за процессами измерений, и управление измерительным оборудованием. Данный термин часто используется для описания метрологической деятельности в промышленности.

Законодательная метрология. Этот термин относится к обязательным техническим требованиям. Служба законодательной метрологии проверяет выполнение этих требований для того, чтобы гарантировать корректность измерений в областях, представляющих общественный интерес, таких как, торговля, здравоохранение, окружающая среда и безопасность. Масштабы охвата законодательной метрологии зависят от национальных регламентов и могут быть разными в различных странах.

Что означает «точность» и «неопределенность» в измерениях?

Измерение — это сравнение неизвестного значения величины со стандартной единицей той же величины и выражение результата в виде доли или кратного числа этой единицы. Это сравнение, сделанное с помощью измерительного инструмента, никогда не бывает совершенным. Инструмент является точным до какой-то степени и точность его самого является определенной только в тех пределах, которые выражаются количественно как неопределенность. Это можно проиллюстрировать следующим примером: единица массы, килограмм, определяется его международным эталоном, металлическим цилиндром, хранящимся в Международном бюро мер и весов (МБМВ). Копии этого эталона используются в качестве национальных эталонов килограмма.

Копии не являются совершенными и их массы слегка отличаются от международного эталона. Предположим, что масса копии X равняется $1 \text{ кг} + 0,01 \text{ мг}$, поэтому точность копии - $0,01 \text{ мг}$. Но эта информация не является полной, потому что разница между значениями массы эталона и его копии была определена измерительным инструментом (весами), и измерительный процесс также несовершенен. Всегда имеются какие-то случайные различия (например, маленькие отклонения в условиях окружающей среды) и некоторое несовершенство измерительных приборов.

Повторяемые измерения при явно идентичных условиях будут показывать (слегка) различные результаты. Вместо $1 \text{ кг} + 0,01 \text{ мг}$, весы могут показать $1 \text{ кг} + 0,009 \text{ мг}$ или $1 \text{ кг} + 0,011 \text{ мг}$ или другие значения. Неопределенность измерения можно оценить применяя статистические методы, приведенные в «Руководстве по выражению неопределенности измерения» (GUM). Полный результат массы копии X показывает: $m = 1,000\ 000\ 01 \text{ кг} \pm 0,002 \text{ мг}$. Значение неопределенности $\pm 0,002 \text{ мг}$ показывает, что измерения, сделанные при явно идентичных условиях, будут давать результат в интервале от $1,000\ 000\ 01 \text{ кг} - 0,002 \text{ мг}$ до $1,000\ 000\ 01 \text{ кг} + 0,002 \text{ мг}$ с определенной вероятностью (обычно 95%). Предполагается, что 95 из 100 измерений будут находиться в данном интервале.

Оценка неопределенности измерения имеет возрастающую важность, потому что она дает возможность тем, кто использует результаты измерения, оценить надежность этих результатов. Без такой оценки результаты измерения не могут быть сравнимы ни между собой, ни с эталонными, приведенными в спецификациях или стандартах. Предположим, что масса копии X была определена с использованием других весов в другом месте и получен результат $m(X) = 1,000\ 000 \text{ кг}$. Означает ли это точно 1 кг ? Может быть, чувствительность этих весов не так высока как чувствительность других? Какая имеется разница между двумя этими результатами? На эти вопросы нельзя ответить, потому что отсутствует информация по неопределенности.

Для того, чтобы получить сравнимые результаты из оценок неопределенностей измерения, эксперты из семи международных организаций, занимающихся метрологией или стандартизацией, разработали «Руководство по выражению неопределенности измерения», (GUM). Руководство устанавливает основные правила для оценки и выражения неопределенности в измерении, которая может быть соблюдена на различных уровнях точности и в различных областях применения, от магазина до фундаментальных исследований. Некоторые базовые идеи, заложенные в концепции, приведены ниже. Однако, как говорится в

Руководстве: «Оценка неопределенности - это ни рутинная, ни чисто математическая задача, она зависит от детальных знаний природы величины (которую необходимо измерить) и самого измерения».

Правила учитывают, что неопределенность в результате измерения обычно состоит из нескольких компонентов, которые могут быть сгруппированы в две категории, в зависимости от способа оценки их численных значений. Одна категория состоит из случайных ошибок, появляющихся из непредсказуемых изменений, которые оказывают влияние на величину, такие как окружающая температура и давление воздуха. Другая категория состоит из несовершенным образом скорректированных систематических эффектов. Руководство описывает математическое рассмотрение этих двух категорий компонентов, вносящих вклад в неопределенность измерения.

Важно знать точность измерительных инструментов для того, чтобы сделать правильный выбор. Точность измерительного инструмента - то есть, его способность давать меру, близкую к «истинному» значению, представленному стандартом, - часто выражается как процент пределов измерений. Это значение используют, чтобы характеризовать класс точности инструмента. Вольтметр класса 1 означает, что ошибка показания инструмента должна быть не больше, чем 1% измеряемого интервала. Если измеряемый интервал - от 0 до 100 В, то можно ожидать погрешность в 1 В для любого инструмента в данном интервале измерений. Измерения в области нижнего предела измерений будут приводить к более высокой относительной неточности, к примеру, точность измерения 5 В равняется 20%. Это ставит вопрос о том, является ли точность в 1 В для измерения 5 В достаточной для применения в нужном случае.

Если нет, то нужно использовать другой измерительный инструмент или другой интервал измерений для того же самого инструмента. Предположим, что можно установить интервал измерений от 0 до 10 В. Точность в этом интервале будет 0,1 В. Тогда показания прибора в 5 В будут точными до 0,1 В или 2% от 5 В.

Что означает прослеживаемость?

Прослеживаемость (привязка к эталонам) подразумевает, что измерение может быть соотнесено с национальным или международным эталоном, и что это соотношение задокументировано. Измерительный инструмент должен быть откалиброван по эталону, который сам является прослеживаемым.

Концепция прослеживаемости является важной, потому что дает возможность сравнить точность измерений в соответствии со стандартизированной процедурой

оценки неопределенности измерения. Прослеживаемость измерения и оборудования для испытаний является требованием ИСО 9001:2000 и может быть оговорена для контроля за измерительными инструментами.

В Международном словаре основных и общих терминов, используемых в метрологии, прослеживаемость определяется как:

«Свойство результата измерения или значения, посредством которого оно может быть отнесено с заявленными эталонами, обычно национальными или международными, через непрерывную цепь сравнений, все из которых имеют указанные значения неопределенности.»

ПРИМЕЧАНИЯ:

1. Концепция часто выражается через прилагательное прослеживаемый,
2. Непрерывная цепь сравнений называется цепью прослеживаемости.

Единицы измерения самой высокой точности реализуются международными эталонами, некоторые из которых хранятся в МБМВ. Национальные эталоны, хранимые национальными институтами по метрологии, должны сравниваться с международными. Результат этого сравнения, точность национального эталона с оцененной неопределенностью, будет указана в документе (сертификате).

Национальный эталон служит для калибровки исходных эталонов более низкой точности. Исходные эталоны хранятся в национальных институтах метрологии для калибровок, которые не требуют высочайшей точности, и в калибровочных лабораториях. Опять же, результат указывается в документе.

Подобным же способом исходные эталоны используются для калибровки других эталонов более низкой точности, например, рабочих эталонов. Такая же процедура применяется при калибровке измерительных инструментов с помощью рабочих инструментов. И опять же, точность и неопределенность измерения должны быть указаны в сертификате. Эти данные могут быть использованы для оценки неопределенности измерения. Это может быть уместным для измерений, проводимых для проверки соответствия спецификациям.

Прослеживаемость достигается неразрывной цепью сравнений относительно международных эталонов. Если для определенной величины в МБМВ нет готового международного эталона, то международный эталон признается международным соглашением, чтобы служить в интернациональном масштабе основой для

присваивания значений другим эталонам рассматриваемой величины. Обычно значение международного эталона определяется сличением между собой национальных эталонов наивысшего качества.

Что такое эталон?

Эталон (стандарт измерения) может быть физической мерой, измерительным инструментом, стандартным образцом или измерительной системой, предназначенной для того, чтобы определять, реализовывать, сохранять или воспроизводить единицу или одно или более значений величины, чтобы служить в качестве эталона. Например, единице массы придана физическая форма в виде цилиндрического куска металла весом 1 кг; а отградуированные блоки представляют определенные значения длины.

Иерархия эталонов начинается с международного эталона как вершины и идет вниз до рабочего эталона. Определение этих терминов, которое дается в Международном словаре основных и общих терминов в метрологии, приведено ниже:

Международный эталон - это:

эталон, признанный международным соглашением для того, чтобы служить в международном масштабе в качестве базы для присваивания значений другим стандартам измерения рассматриваемой величины.

Хранителем международных эталонов является Международное бюро мер и весов (МБМВ) в Севре, недалеко от Парижа. Самым старым используемым стандартом измерения является эталон килограмма.

Национальный эталон - это:

эталон, признанный национальным законодательством, чтобы служить в данной стране в качестве базы для присваивания значений другим стандартам измерения рассматриваемой величины.

Обычно хранителем национальных эталонов является национальная лаборатория, называемая национальным метрологическим институтом, национальным бюро стандартов или национальным бюро весов и мер. Некоторые страны не имеют национальных эталонов.

Первичный эталон - это:

эталон, который широко признается как имеющий высочайшие метрологические качества, и значения которого принимаются без ссылок на другие эталоны той же величины.

Примеры первичных эталонов - приборы Джозефсона для реализации величины «вольт» или стабилизирующие лазеры с интерферометрами для реализации величины «длина». Эти приборы используются в качестве национальных эталонов многими национальными метрологическими институтами и некоторыми первоклассно оборудованными калибровочными лабораториями.

Вторичный эталон - это:

эталон, значение которого присваивается путем сравнения с первичным эталоном той же величины. Обычно первичные эталоны используются для калибровки вторичных.

Рабочий эталон - это:

эталон, который используется для обычной калибровки или поверки материальных мер, измерительных инструментов или стандартных образцов.

Обычно рабочий эталон калибруется на основании вторичного эталона. Рабочий эталон, используемый в повседневной работе для обеспечения правильности проведения измерений, называется проверочным эталоном.

Не существует общего требования в отношении точности рабочего эталона. В одном месте он может быть достаточно хорош в качестве исходного эталона, или даже в качестве национального эталона в другом месте.

Существуют классы весов, начиная с E1 - как наивысшего класса, за ним следуют E2, F1, F2, M1, M2, M3. Набор весов класса точности E2 может служить в качестве рабочего эталона в калибровочной лаборатории для калибровки набора весов класса точности F1 или ниже. Набор E2 может служить в качестве стандартного образца в другой лаборатории, калибрующей, в основном, весы точностью класса F2 или ниже. Набор весов класса точности E2 может быть использован в качестве национального эталона в стране, где нет спроса на более точные измерения массы, чем F1.

Нужно отметить, что точность некоторых измерительных инструментов, используемых в промышленности, является настолько высокой, что существует необходимость в калибровке даже первичных эталонов.

Исходный эталон - это:

эталон, обладающий, как правило, наивысшими метрологическими свойствами, имеющийся в распоряжении в данном месте или в данной организации, в соответствии с которым, получают размер единицы при измерениях, выполняемых в этом месте.

Калибровочные лаборатории используют исходные эталоны для калибровки своих рабочих эталонов.

Эталон сравнения - это:

эталон, используемый в качестве промежуточного для сравнения эталонов.

Резисторы используются как эталоны сравнения для сравнения эталонов напряжения. Веса используются для сравнения рычажных весов.

Передвижной эталон - это:

эталон, иногда специальной конструкции, предназначенный для транспортировки, и используемый для сравнения эталонов между собой.

Портативный, работающий на цезиевой батарее эталон частоты, может быть использован как передвижной эталон частоты. Калиброванные динамометрические элементы (ячейки нагрузки) используются в качестве передвижных эталонов силы.

В чем разница между калибровкой, поверкой, регулировкой и градуированием?

Определения терминов, приведенные далее, взяты из соответствующих международных словарей.

Калибровка - комплекс операций, которые устанавливают, при специальных условиях, соотношения между значениями величины, показываемыми измерительным инструментом или измерительной системой, или значениями, представленными в стандартном образце и соответствующими значениями, реализованными в эталоне.

ПРИМЕЧАНИЯ

1. Результат калибровки позволяет либо присвоить значения измеряемых величин показаниям, либо определить поправки к показаниям.

2. Калибровка может также определить другие метрологические свойства, такие как эффект влияния величины.

3. Результат калибровки может быть зарегистрирован в документе, иногда называемом сертификатом калибровки или отчетом о калибровке.

- Международный словарь основных и общих терминов метрологии

Во время калибровки разница между показанием инструмента, который нужно откалибровать, и эталоном будет определяться в численном выражении и будет задокументирована. Вообще, результат используется не для регулирования инструмента, а для корректировки значений показаний. Пример, жидкостно-стеклянные термометры калибруются в ванне с соответствующей жидкостью путем сравнения показаний эталонного термометра с показаниями термометра, который необходимо откалибровать. Разность показаний будет задокументирована и использована для корректировки во время температурных измерений.

Поверка измерительного оборудования

Процедура (отличная от утверждения типового образца), которая включает проверку и маркировку и/или выпуск сертификата поверки, который удостоверяет и подтверждает, что измерительный инструмент соответствует требованиям нормативного законодательства.

- Международный словарь терминов в законодательной метрологии, 2 изд.

Успешная поверка обычно подтверждается документом с печатью или специальной биркой (пломбой), или тем и другим, что доказывает, что инструмент может быть использован для измерений, регулируемых законодательством, например, в торговле или для защиты окружающей среды. Часть поверки состоит в определении учтен ли предписываемый предел погрешности. Результат - «да» или «нет». Например, весы, используемые на рынках, регулярно проверяются относительно стандартных весов. Если они работают в указанных пределах погрешности, они будут опломбированы. Пломба указывает на соответствие законодательным требованиям. Весы, в которых предел погрешности превышен, должны быть отрегулированы и затем только опломбированы. Если регулировка невозможна, они будут либо конфискованы, либо с них будет удалена пломба, подтверждающая корректность их работы, это значит, что весы больше не соответствуют законодательным требованиям.

В промышленности простые измерительные устройства, часто проверяют без определения точных значений погрешности, вынося решение, просто годен ли инструмент для использования, или нет, что зависит от того находится ли его погрешность в пределах, установленных спецификацией, или нет.

Регулировка (измерительного инструмента)

Операция по приведению измерительного инструмента в рабочее состояние, пригодное для использования.

ПРИМЕЧАНИЕ

Регулировка может быть автоматической, полуавтоматической или ручной.

- Международный словарь основных и общих терминов в метрологии

Многие инструменты могут быть «обнулены» поворотом потенциометра или другого устройства. Некоторые инструменты имеют встроенные устройства для регулировки чувствительности до правильного значения. Такое устройство может, например, быть эталонным весом в электронных весах.

Градуирование (измерительного инструмента)

Операция по нанесению положений градуировочных отметок измерительного инструмента (в некоторых случаях только определенных главных отметок), по отношению к соответствующим значениям измеряемой величины.

- Международный словарь основных и общих терминов в метрологии

Типичное применение градуирования (нанесения отметок) — это определение объема жидкости в резервуаре с помощью увязывания объемных отметок на погружаемом стержне с уровнем жидкости в резервуаре.

Заключение

Рассмотрев содержание метрологии в целом как раздела науки, посвященной обеспечению единства измерений, становится очевидным, что мы имеем дело в основном с понятиями физики, поскольку под единицами величины всегда подразумевались величины физические. Тем не менее, обращаясь к известному афоризму Д.И. Менделеева, вынесенного эпитафией к данной работе, можно

сказать, что любая наука должна включать в себя измерительные процедуры. В самом деле, многие современные области науки обратились к измерению физических величин. Без измерений физических величин немыслима современная химия, биология, медицина, экология и целый ряд других наук, в развитии которых необходимо «размышлять о природе вещей», т. е. привлекать понятия и категории физики и, следовательно, метрологии в том ключе, в котором изложено ее содержание в данной книге.