

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПОНЯТИЯ

1.1. Основные термины

Приведем ряд основных терминов, применяемых в метрологии:

физическая величина – одно из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них;

единица измерения физической величины – физическая величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное 1, применяемая для количественного выражения однородных с ней физических величин;

система единиц физических величин – совокупность основных и произвольных единиц физических величин, образованная в соответствии с принципами для заданной системы физических величин;

размер физической величины – количественная определенность физической величины, присущая конкретному материальному объекту, системе, явлению или процессу. Предполагается, что размер физической величины существует объективно (вне зависимости от того измеряем мы эту величину или нет);

значение физической величины – выражение размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц. Конкретное значение физической величины является результатом ее измерения;

истинное значение физической величины – значение физической величины, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую физическую величину;

действительное значение физической величины – значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него. Например, при поверке некоторого (испытываемого) вольтметра его показания сравнивают с показаниями более точного (образцового) вольтметра. В этом случае показания образцового вольтметра принимают за действительное значение напряжения;

измерение физической величины – совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины

с ее единицей и получение значения этой величины (установление значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств);

результат измерения физической величины – значение величины, полученное путем ее измерения – установленное значение величины, характеризующей свойство физического объекта, представляемое действительным числом с принятой размерностью (размерность определяется выбранной единицей измерений);

точность измерений – одна из характеристик измерения, отражающая близость к нулю погрешности результата измерения;

мера точности – погрешность результата измерения – отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины (истинное значение величины неизвестно, его применяют только в теоретических исследованиях, на практике используют действительное значение);

средство измерений – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени;

мера физической величины – средство измерений, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью;

метрологическая характеристика средства измерений – характеристика одного из свойств средства измерений, влияющая на результат измерений и его погрешность;

метрологическое обеспечение измерений – деятельность, направленная на создание эталонных средств измерений, а также разработку и применение метрологических правил и норм, обеспечивающих требуемое качество измерений.

1.2. Постулаты метрологии

В метрологии, как и в любой научной дисциплине, принят ряд постулатов, которые принимаются без доказательств. Важнейшие постулаты следующие:

1. Измерение без априорной информации невозможно;
2. Существует истинное значение измеряемой величины;
3. Истинное значение измеряемой величины отыскать невозможно.

Первый постулат метрологии относится к ситуации перед измерением и говорит о том, что если об интересующем нас свойстве мы ничего не знаем, то не сможем ни выбрать средство, ни метод измерения, ни провести измерение. Вместе с тем, если о нем известно все, то измерение не нужно. Таким образом, измерение обусловлено дефицитом количественной информации о том или ином свойстве объекта или явления и направлено на его уменьшение.

Второй и третий постулаты говорят о том, истинное значение физической величины определить невозможно, оно существует только в рамках принятых моделей. Причина этого неадекватность принятой модели измерения, несовершенство средств и методов измерений, недостаточная тщательность проведения измерений и обработки их результатов, воздействие внешних дестабилизирующих факторов, конечная длительность процесса измерений.

В большинстве случаев достаточно знать действительное значение измеряемой физической величины – значение, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному значению, что для данных целей может быть использовано вместо него.

Еще одним из важнейших положений метрологии является *основное уравнение измерений*, которое представлено в виде

$$x = NQ,$$

где x – результат измерения; N – действительное число; Q – единица измерения величины физической величины X .

Из этого уравнения следует, что любое измерение можно рассматривать как сравнение физической величины с ее единицей.

2. ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Согласно Л. Эйлеру: «Невозможно определить или измерить одну величину иначе, как, приняв в качестве известной другую величину этого же рода и указав соотношение, в котором она находится к ней».

Развитие естественных и технических наук, необходимость обмена результатами привело к созданию систем единиц физических величин (ФВ).

Система физических единиц строится на основе знаний о физических процессах, протекающих в природе – известных физических законах. Так, выбрав произвольно единицы измерения нескольких физических величин и зная физические законы, связывающие их с другими величинами можно получить единицы ФВ.

Впервые понятие системы единиц физических величин ввел К. Гаусс. Согласно его методу сначала устанавливаются (выбираются) несколько произвольных величин, независимых от других. Единицы этих величин называются *основными*.

Важным является выбор основных единиц. С одной стороны, выбор может быть произвольным, с другой, желательно чтобы количество таких единиц было минимальным. Основные единицы выбираются таким образом, чтобы, используя физические законы можно было получить другие – *производные* единицы. Полная совокупность основных и производных единиц образуют *систему единиц ФВ*.

Кратные и дольные единицы. Для многих практических приложений размерности метрических единиц неудобны, они либо велики, либо малы. Поэтому используют кратные и дольные единицы. В десятичной системе исчисления кратные или дольные единицы получаются путем умножения или деления исходной единицы на число 10 в соответствующей степени. Для наименования кратных и дольных единиц используются приставки. Кратные и дольные определения единиц для десятичной системы приведены в табл. 2.

Таблица 2

Множитель	Приставка		
	Наименование	Обозначение	
		Русское	Международное
$1\,000\,000\,000\,000\,000\,000 = 10^{18}$	экса	Э	E
$1\,000\,000\,000\,000\,000 = 10^{15}$	пета	П	P
$1\,000\,000\,000\,000 = 10^{12}$	тера	Т	T
$1\,000\,000\,000 = 10^9$	гига	Г	G
$1\,000\,000 = 10^6$	мега	М	M
$1\,000 = 10^3$	кило	к	k
$100 = 10^2$	гекто	г	h
$10 = 10^1$	дека	да	da
$0,1 = 10^{-1}$	деци	д	d
$0,01 = 10^{-2}$	санتي	с	c
$0,001 = 10^{-3}$	милли	м	m
$0,000\,001 = 10^{-6}$	микро	мк	μ
$0,000\,000\,001 = 10^{-9}$	нано	н	n
$0,000\,000\,000\,001 = 10^{-12}$	пико	п	p
$0,000\,000\,000\,000\,001 = 10^{-15}$	фемто	ф	f
$0,000\,000\,000\,000\,000\,001 = 10^{-18}$	атто	а	a

Относительные величины и единицы часто используют для измерения физической величины отношение этой величины к одноименной физической величине. Это отношение является безразмерным. К таким относятся атомные или молекулярные массы химических элементов, которые выражаются по отношению к одной двенадцатой массы углерода-12. Отношения величин выражаются:

- в *безразмерных единицах*, когда отношение равно единицам;
- в *процентах*, когда отношение находится в диапазоне до 10^{-2} ;
- в *промилле*, когда отношение находится в диапазоне до 10^{-3} ;
- в *миллионных долях*, при отношении в диапазоне до 10^{-6} и т.д.

Логарифмические величины и единицы широко применяются в технике. В виде логарифмических величин выражаются частотный интервал, ослабление, усиление, уровни звукового давления и др.

Единицей логарифмической величины является бел (Б), который выражается через логарифм отношения одноименных физических величин:

$$1\text{Б} = \lg(x/x_0) \text{ при } x = 10x_0, \quad 1\text{дБ} = 0,1\text{Б}.$$

Часто в измерениях используется дольная единица бела – децибел (дБ) равная 0,1 Б.

На практике в зависимости от рода величин используются следующие формулы:

– $L_P = 10 \lg(P/P_0)$ (дБ) – для энергетических величин (мощности, энергии, плотности энергии и т.п.);

– $L_F = 20 \lg(F/F_0)$ (дБ) – для силовых величин (напряжения, силы тока, давления, напряженности поля и т.п.).

Для образования логарифмической единицы может использоваться не только десятичный логарифм, а также натуральный или по основанию 2, если это удобно для решения практической задачи.

3. СИСТЕМА ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН СИ

Первоначально в разных странах были созданы свои системы единиц. В основном они строились на базе трех единиц физических величин: длина, масса, время и условно назывались механическими. Например, системы: метр, килограмм, секунда (МКС); сантиметр, грамм, секунда (СГС).

Эти системы удобны в применении в механике, однако для электрических и магнитных величин встретились серьезные трудности. Наличие ряда систем создало неудобства при обмене результатами, при пересчете из одной системы единиц в другую, что привело к необходимости создания единой универсальной системы единиц, которая охватывала бы все отрасли науки и была бы принята в международном масштабе.

В 1948 г. на IX Генеральной конференции по мерам и весам было рассмотрено предложение о принятии единой практической системы единиц.

В 1960 г. XI Генеральная конференция по мерам и весам принимает международную систему и присваивает ей наименование «Международная система единиц» (System International – SI, в русской транскрипции – СИ), в которой в качестве основных приняты единицы: *метр, килограмм, секунда, Ампер, Кельвин, кандела*. Позже в качестве основной в систему единиц была введена единица количества вещества – *моль*.

Производные единицы. Производные единицы могут быть выражены через основные с помощью известных физических законов.

Размерность производной единицы определяется математическим выражением, связывающим эту единицу с основными и показывающим, во сколько раз изменится производная единица при изменении основных единиц.

Если с изменением основной единицы в n раз производная единица изменится в n^p раз, то говорят, что данная производная единица обладает размерностью p относительно основной единицы. (Например, размерность площади равна двум – m^2 , а размерность объема трем – m^3 относительно единицы длины м.).

Формула размерности производной единицы представляет собой одночлен, составленный из размерностей основных единиц, причем эти размерности (степени) могут быть положительными, отрицательными, целыми и дробными. Размерности обладают следующими свойствами:

1. Если числовое значение величины A равно произведению величин B и C , то размерность A равна произведению размерностей B и C – $[A]=[B] \cdot [C]$;

2. Если числовое значение величины A равно отношению величин B и C , то размерность A равна отношению размерностей B и C – $[A]=[B]/[C]$;

3. Если числовое значение величины A равно степени n числового значения величины B , то размерность A равна степени n размерности B – $[A]=[B]^n$.

Эти свойства используются при преобразовании формул размерности.

В табл. 1 приведены выражения некоторых производных единиц через основные единицы системы СИ.

Таблица 1

Величина	Название единицы измерения	Обозначение	Выражение через основные единицы системы СИ
Сила	ньютон	Н	$кг \cdot м/с^2$
Энергия	джоуль	Дж	$Н \cdot м = кг \cdot м^2/с^2$
Мощность	ватт	Вт	$Дж/с = кг \cdot м^2/с^3$
Давление	паскаль	Па	$Н/м^2 = кг \cdot м^{-1} \cdot с^{-2}$
Заряд	кулон	Кл	$А \cdot с$
Напряжение	вольт	В	$Дж/Кл = кг \cdot м^2 \cdot с^{-3} \cdot А^{-1}$
Сопротивление	ом	Ом	$В/А = кг \cdot м^2 \cdot с^{-3} \cdot А^{-2}$

4. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ШКАЛЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Измерению подлежат различные проявления свойств тел, веществ, явлений, процессов. 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. Измерительная шкала – одно из ключевых понятий метрологии.

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

Измерение – сравнение конкретного проявления измеряемого свойства (величины) со шкалой измерений этого свойства (величины) в целях получения результата измерений (оценки свойства или значения величины).

Упорядоченным множеством чисел или системой логически связанных знаков (обозначений) являются, например, множество обозначений цветов, совокупность классификационных символов или понятий, множество баллов оценки состояний объекта, множество действительных чисел и т.д.

Элементы множеств проявления свойств объекта находятся в определенных логических отношениях между собой. Такими отношениями могут быть:

- «эквивалентность» (равенство) или «сходство» (близость) этих элементов;
- «порядок» их количественная различимость («больше», «меньше»),
- «пропорциональность» во сколько раз больше или меньше;
- «аддитивность» возможность суммирования значений;
- допустимость выполнения определенных математических операций сложения, вычитания, умножения деления с элементами множеств и т.д.

Эти особенности элементов множеств проявлений свойств определяют типы соответствующих им измерительных шкал. В теории измерений различают пять основных типов шкал: наименований, порядка, разностей (интервалов), отношений и абсолютные шкалы. Каждый тип шкалы обладает определенными признаками, основные из которых рассматриваются ниже.

4.1. Неметрические измерительные шкалы

В этих шкалах нельзя ввести понятия единицы измерения; в них отсутствует нулевой элемент, эти шкалы, по существу, качественные.

Шкалы наименований – отражают качественные свойства. Их элементы характеризуются только отношениями эквивалентности (равенства) и сходства конкретных качественных проявлений свойств.

Примерами таких шкал является шкала классификации (оценки) цвета объектов по наименованиям (красный, оранжевый, желтый, зеленый и т.д.), опирающаяся на стандартизованные атласы цветов, систематизированные по сходству. Измерения в шкале цветов выполняются путем сравнения при определенном освещении образцов цвета из атласа с цветом исследуемого объекта и установления эквивалентности их цветов.

Шкалы порядка – описывают свойства, для которых имеют смысл не только отношения эквивалентности, но и порядка по возрастанию или убыванию количественного проявления свойства. Характерным примером шкал порядка являются существующие шкалы чисел твердости тел, шкалы баллов землетрясений, шкалы баллов ветра, шкала ЕГЭ. Шкалы порядка допускают монотонные преобразования, в них может быть или отсутствовать нулевой элемент.

4.2. Метрические измерительные шкалы

Основной признак этих шкал – наличие единицы измерения. Особенности метрических типов шкал систематизированы и приведены в табл.3.

Таблица 3

Шкала	Эквивалентность	Порядок	Пропорциональность	Наличие нуля	Единица измерения	Операции	Аддитивность
Разностей	есть	есть	нет	условный	размерная	сложение, вычитание для интервалов	для интервалов
Отношений	есть	есть	есть	естественный	размерная	умножение, деление, вычитание	не для всех величин
Абсолютная	есть	есть	есть	естественный	безразмерная	арифметические операции, логарифмирование	есть

Шкалы разностей (интервалов) – отличаются от шкал порядка тем, что для описываемых ими свойств имеют смысл не только отношения эквивалентности и порядка, но и суммирования интервалов (разностей) между различными количественными проявлениями свойств.

Шкалы разностей имеют условные (принятые по соглашению) единицы измерений и условные нули. К этому типу шкал относятся и шкалы температур по Цельсию, Фаренгейту, Реомюру.

Характерный пример – шкала интервалов времени. Интервалы времени (например, периоды работы, периоды учебы) можно складывать и вычитать, но складывать даты каких-либо событий бессмысленно.

Шкалы отношений. К множеству количественных проявлений в этих шкалах применимы отношения эквивалентности и порядка, пропорциональности (шкалы отношений 1-го рода – пропорциональные шкалы), а во многих случаях и суммирования (шкалы отношений 2-го рода – аддитивные шкалы).

К шкалам отношений 1-ого рода применимы только операции вычитания, деления, умножения, но не суммирования. Пример – термодинамическая температурная шкала, можно определять разности и отношения температур различных объектов, но сумма температур не имеет физического смысла.

В шкалах отношений 2-го рода (аддитивных) возможна операция суммирования, например, шкала массы. Допустимо вычислять не только разности и отношения масс различных объектов, но и их суммы.

Абсолютные шкалы – обладают всеми признаками шкал отношений, но дополнительно в них существует естественное однозначное определение безразмерной единицы измерений. Такие шкалы используются для измерений относительных величин (отношений одноименных величин: коэффициентов усиления, ослабления, КПД, коэффициентов отражений и поглощений и т.д.). Эти шкалы допускают любые арифметические операции и логарифмирование.

4.3. Логарифмические измерительные шкалы

Логарифмические шкалы – логарифмическое преобразование шкал, часто применяемое на практике, приводит к изменению типа шкал. Практическое распространение получили логарифмические шкалы на основе применения систем десятичных, натуральных логарифмов, логарифмов с основанием два.

Логарифм есть число безразмерное, поэтому перед логарифмированием преобразуемая размерная величина в начале обращается в безразмерную путем ее деления на принятое по соглашению произвольное (опорное) значение той же величины, после чего выполняется операция логарифмирования.

В зависимости от типа шкалы, подвергнутой логарифмическому преобразованию, логарифмические шкалы могут быть двух видов. При логарифмическом преобразовании абсолютных шкал получаются абсолютные логарифмические

шкалы, называемые иногда логарифмическими шкалами с плавающим нулем, т.к. в них не фиксируется опорное значение. Примерами таких шкал являются шкалы усиления (ослабления) сигнала в дБ. Для значений величин в абсолютных логарифмических шкалах допустимы операции сложения и вычитания.

При логарифмическом преобразовании шкал отношений и интервалов получается логарифмическая шкала интервалов с фиксированным нулем, соответствующим принятому опорному значению преобразуемой шкалы.

К этим шкалам в общем случае нельзя прямо применять ни одно арифметическое действие; сложение и вычитание величин, выраженных в значениях таких шкал, должно проводиться путем нахождения их антилогарифмов, выполнения необходимых арифметических операций и повторного логарифмирования результата.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Метрология, стандартизация и сертификация. Учебник для вузов /Б.Я. Авдеев, В.В. Алексеев, Е.М. Антонюк и др. Под редакцией В.В. Алексеева. М.: Академия, 2007.

2. Росстандарт. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. <http://www.fundmetrology.ru>.