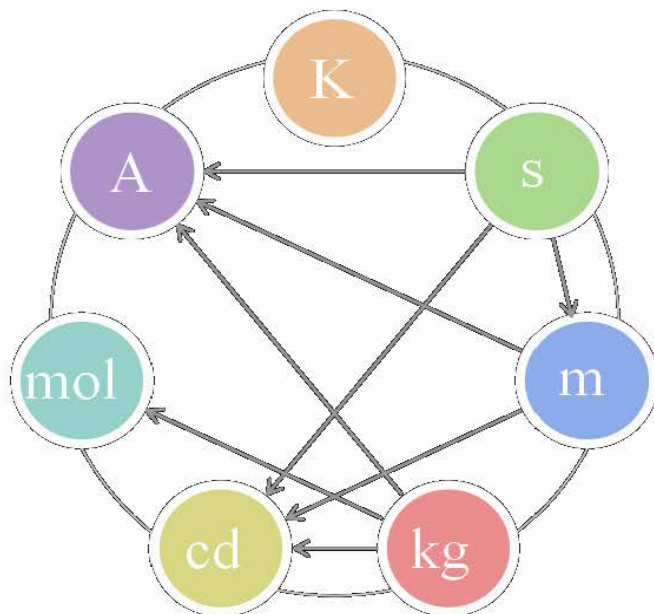


А.Ф. Дресвянников, С.Ю. Ситников, И.Д. Сорокина

ЭТАЛОНЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Учебное пособие



2013

Министерство образования и науки России
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Казанский национальный исследовательский
технологический университет»

А.Ф. Дресвянников, С.Ю. Ситников, И.Д. Сорокина

ЭТАЛОНЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Учебное пособие

Казань
Издательство КНИТУ
2013

УДК 006.915

Д 73

Дресвянников А.Ф.

Эталоны физических величин : учебное пособие / А.Ф. Дресвянников, С.Ю. Ситников, И.Д. Сорокина; М-во образ. и науки России, Казан. нац. иссл. технол. ун-т. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2013. – 144 с.

ISBN 978-5-7882-1444-3

Рассматриваются основные понятия и определения, связанные с эталонами и передачей единицы физической величины от эталона до рабочего средства измерения. Предлагается концепция систем единиц измерений – фундаментальной (теоретической) и практической.

Пособие соответствует государственному образовательному стандарту и авторским курсам «Физические основы измерений», «Методы и средства измерений, испытаний и контроля» направлений подготовки бакалавриата 221700 «Стандартизация и метрология» и 221400 «Управление качеством»

Предназначено для специалистов в области метрологии, стандартизации, управления качеством и рекомендуется как учебное пособие для студентов, обучающихся по специальностям «Стандартизация и метрология» и «Управление качеством». Может быть также использовано специалистами по информационно-измерительной технике.

Подготовлено на кафедре аналитической химии, сертификации и менеджмента качества.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Казанского национального исследовательского технологического университета

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук, проф. *О.Н. Шерстюков*

д-р хим. наук, проф. *Э.А. Мухутдинов*

ISBN 978-5-7882-1444-3

© Дресвянников А.Ф., Ситников С.Ю.,
Сорокина И.Д., 2013

© Казанский национальный исследовательский
технологический университет, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	7
I. ЭТАЛОНЫ И ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН.....	9
1.1. Международная система единиц (СИ) физических величин.....	9
1.2. Международная система единиц и фундаментальные физические константы.....	18
1.3. Эталоны, основные понятия и определения.....	26
II. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭТАЛОННОЙ БАЗЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ.....	45
2.1. Эталон единицы длины (метр).....	46
2.2. Эталон единицы массы (килограмм).....	48
2.3. Эталон единицы времени.....	52
2.4. Эталоны единиц электрических величин.....	58
2.5. Квантовые эталоны единиц электрических величин.....	80
2.6. Эталоны температуры.....	89
2.7. Эталоны световых величин.....	97
2.8. Эталон количества вещества.....	99

III. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ И ПЕРЕДАЧА РАЗМЕРОВ ЕДИНИЦ ВЕЛИЧИН И ШКАЛ ИЗМЕРЕНИЙ.....	108
IV. СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ.....	113
4.1. Классификация стандартных образцов	119
4.2. Разработка стандартных образцов.....	120
4.3. Техническое задание на разработку стандартных образ- цов.....	120
4.4. Подготовка материала стандартных образцов.....	121
4.5. Метрологическая аттестация стандартных образцов.....	123
4.6. Расчет аттестованного содержания стандартных образ- цов и погрешности.....	125
4.7. Характеристика стабильности материала стандартных образцов.....	128
4.8. Разработка технической и нормативной документации на стандартные образцы.....	130
4.9. Утверждение, регистрация и выпуск стандартных об- разцов.....	131
4.10. Применение стандартных образцов.....	133
4.11. Создание аттестованных смесей.....	134
Контрольные вопросы.....	137
Заключение.....	138
Литература.....	140

ПРЕДИСЛОВИЕ

Основой любой формы управления, анализа, прогнозирования, планирования контроля или регулирования является достоверная информация, которая может быть получена только путем измерения требуемых физических величин. В этой связи особое значение приобретают эталоны физических величин, гарантирующие точное воспроизведение и хранение установленных единиц физических величин, а также передачу их размеров применяемым средствам измерения.

Данное издание предназначено для специалистов в области метрологии, стандартизации, управления качеством и рекомендуется как учебное пособие для студентов, обучающихся по специальностям «Стандартизация и метрология» и «Управление качеством». Оно может быть также использовано специалистами по информационно-измерительной технике.

ВВЕДЕНИЕ

Количество измеряемых величин и их диапазон постоянно растут. Так, например, расстояние измеряется в диапазоне от 10^{-10} до 10^{17} м, температура – $0,5-10^6$ К, электрическое сопротивление – $10^{-6}-10^{17}$ Ом, сила электрического тока – $10^{-16}-10^6$ А, мощность – $10^{-15}-10^{10}$ Вт. С ростом диапазона измеряемых величин возрастает и сложность измерений, которые превратились в сложную процедуру подготовки и проведения измерительного эксперимента, обработки и интерпретации полученной информации. Поэтому следует говорить об измерительных технологиях, понимаемых как последовательность действий, направленных на получение измерительной информации требуемого качества.

Основой любой формы управления, анализа, прогнозирования, планирования контроля или регулирования является достоверная информация, которая может быть получена только путем измерения требуемых физических величин. Очевидно, что только высокая и гарантированная точность результатов измерений обеспечивает правильность принимаемых решений. Современная наука и техника позволяют выполнять многочисленные и точные измерения, однако затраты на них становятся соизмеримыми с затратами на исполнительные операции. В этой связи особое значение приобретают эталоны физических величин, гарантирующие точное воспроизведение и хранение установленных единиц физических величин, а также передачу их размеров применяемым средствам измерения.

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- АС – аттестованные смеси
БД – база данных
БДСО – база данных стандартных образцов
ГКМВ – Генеральная конференция по мерам и весам
ГСИ – государственная система обеспечения единства измерений
ГСО – государственный стандартный образец
ГССО – государственная служба стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов
ГЭ – государственный эталон
ККТ – Консультативный комитет по термометрии
ККЭ – Консультативный комитет по электричеству
КХА – количественный химический анализ
МБМВ – Международное бюро мер и весов
МВИ – методика выполнения измерений
МИ – методика измерений
МКМВ – Международный Комитет мер и весов
МКСА – система «метр – килограмм – секунда – ампер»
МОЗМ – Международная организация законодательной метрологии
МОП – металл – оксид – полупроводник
МПТШ – международная практическая температурная шкала
МСО – международный стандартный образец
МТШ – международная температурная шкала
МХ – метрологические характеристики
МЭ – метрологическая экспертиза
НБС – Национальное бюро стандартов
НД – нормативный документ
НМЦ ГССО – Научный методический центр государственной службы стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов
НСП – неисключенная систематическая ошибка

НТКМетр МГС – Научно-техническая комиссия по метрологии международного совета по стандартизации, метрологии и сертификации

НЭ – нормальный элемент

ОСО – отраслевой стандартный образец

РМГ – рекомендации по межгосударственной стандартизации

РСИ – рабочие средства измерений

РСК – Российская система калибровки

РОЧМ – радиооптический частотный мост

РЭ – рабочий эталон

СВЧ – сверхвысокочастотное излучение

СГС – симметричная (или гауссова) система

СИ – международная система единиц физических величин

СКО – среднее квадратическое отклонение

СО – стандартный образец

СОП – стандартный образец предприятия

ТЗ – техническое задание

ТУ – технические условия

УВТ – установки высшей точности

ФВ – физическая величина

ФФК – фундаментальные физические константы

ЭДС – электродвижущая сила

ISO REMCO – Комитет по стандартным образцам Международной организации по стандартизации

КОOMET – Евро-азиатское сотрудничество национальных метрологических учреждений

XRCD-метод – X-Ray Crystal Density Method – рентгеноспектральный метод определения кристаллографической плотности

I. ЭТАЛОНЫ И ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

1.1. Международная система единиц (СИ) физических величин

Согласно стандарту ГОСТ 16263-70 «ГСИ. Метрология. Термины и определения»: «*физическая величина (величина)*» – свойство, общее в качественном отношении многим физическим объектам (физическим системам, их состояниям и происходящим в них процессам), но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта».

Совокупность основных и производных единиц ФВ, образованная в соответствии с определенными принципами, называется системой единиц физических величин. Единица основной ФВ является основной единицей данной системы.

Единая международная система единиц (СИ) была принята XI Генеральной конференцией по мерам и весам в 1960 г. На территории нашей страны СИ действует с 1 января 1982 г. в соответствии с ГОСТ 8.417-2002 «ГСИ. Единицы физических величин». В качестве основных единиц приняты метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, моль и кандела (табл. 1).

Таблица 1

Основные и дополнительные единицы физических величин системы СИ (SI)

Величина			Единица		
Наименование	Размерность	Рекомендуемое обозначение	Наименование	Обозначение	
				русское	международное
<i>Основные</i>					
Длина	<i>L</i>	<i>l</i>	метр	м	m
Масса	<i>M</i>	<i>m</i>	килограмм	кг	kg
Время	<i>T</i>	<i>t</i>	секунда	с	s

Окончание табл. 1

Сила электрического тока	I	I	ампер	А	А
Термодинамическая температура	Q	T	кельвин	К	К
Количество вещества	N	n, ν	моль	моль	mol
Сила света	J	J	кандела	кд	cd
<i>Дополнительные</i>					
Плоский угол	–	–	радиан	рад	rad
Телесный угол	–	–	стерадиан	ср	sr

Производная единица – это единица производной ФВ системы единиц, образованная в соответствии с уравнениями, связывающими ее с основными единицами или же с основными и уже определенными производными. Производные единицы СИ, наименование и обозначение которых образованы с использованием основных единиц СИ, приведены в табл. 2 и табл. 3.

Таблица 2

Примеры производных единиц СИ, наименования и обозначения которых образованы с использованием наименований и обозначений основных единиц СИ

Величина		Единица		
Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	
			русское	международное
Площадь	L^2	квадратный метр	м ²	m ²
Объем, вместимость	L^3	кубический метр	м ³	m ³
Скорость	LT^{-1}	метр в секунду	м/с	m/s

Окончание табл. 2

Ускорение	LT^2	метр на секунду в квадрате	m/c^2	m/s^2
Волновое число	L^{-1}	метр в минус первой степени	m^{-1}	m^{-1}
Плотность	L^3M	килограмм на кубический метр	$кг/м^3$	kg/m^3
Удельный объем	L^3M^{-1}	кубический метр на килограмм	$м^3/кг$	m^3/kg
Плотность тока	$L^{-2}I$	ампер на квадратный метр	A/m^2	A/m^2
Напряженность магнитного поля	$L^{-1}I$	ампер на метр	A/m	A/m
Молярная концентрация компонента	$L^{-3}N$	моль на кубический метр	$моль/м^3$	mol/m^3
Яркость	$L^{-2}J$	кандела на квадратный метр	$кд/м^2$	cd/m^2

Таблица 3

**Производные единицы СИ,
имеющие специальное название**

Величина		Единица		
Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	Выражение через единицы СИ
Плоский угол	1	радиан	рад	$m^2 \cdot m^{-2} = 1$
Телесный угол	1	стерадиан	ср	$m^2 \cdot m^{-2} = 1$
Частота	T^{-1}	герц	Гц	s^{-1}
Сила, вес	LMT^{-2}	ньютон	Н	$m \cdot кг \cdot c^{-2}$
Мощность	L^2MT^{-3}	ватт	Вт	$m^2 \cdot кг \cdot c^{-3}$

Окончание табл. 3

Давление, механическое напряжение	$L^{-1}MT^{-2}$	паскаль	Па	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
Энергия, работа, количество теплоты	L^2MT^{-2}	джоуль	Дж	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Количество электричества	TI	кулон	Кл	$c \cdot A$
Электрическое напряжение, потенциал, электродвижущая сила	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	вольт	В	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
Электрическая емкость	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	фарад	Ф	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot c^4 \cdot A^2$
Электрическое сопротивление	$L^2MT^{-3}I^{-2}$	ом	Ом	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
Электрическая проводимость	$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$	сименс	См	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot c^3 \cdot A^2$
Поток магнитной индукции	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	вебер	Вб	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Магнитная индукция	$MT^{-2}I^{-1}$	тесла	Тл	$kg \cdot c^{-2} \cdot A^{-1}$
Индуктивность	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	генри	Гн	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
Световой поток	J	люмен	лм	кд·ср
Освещенность	$L^{-2}J$	люкс	лк	$m^{-2} \cdot кд \cdot ср$
Активность радионуклида	T^{-1}	беккерель	Бк	c^{-1}
Поглощенная доза ионизирующего излучения	L^2T^{-2}	грей	Гр	$m^2 \cdot c^{-2}$
Эквивалентная доза излучения	L^2T^{-2}	зиверт	Зв	$m^2 \cdot c^{-2}$
Активность катализатора	NT^{-1}	катал	кат	моль/с

Для установления производных единиц следует:

- выбрать ФВ, единицы которых принимаются в качестве основных;
- установить размер этих единиц;
- выбрать определяющее уравнение, связывающие величины, измеряемые основными единицами, с величиной, для которой устанавливается производная единица. При этом символы всех величин, входящих в определяющее уравнение, должны рассматриваться не как сами величины, а как их именованные числовые значения;
- приравнять единице (или другому постоянному числу) коэффициент пропорциональности K_e , входящий в определяющее уравнение. Это уравнение следует записывать в виде явной функциональной зависимости производной величины от основных.

Установленные таким способом производные единицы могут быть использованы для введения новых производных величин. Поэтому в определяющие уравнения наряду с основными единицами могут входить и производные, единицы которых определены ранее.

Производные единицы бывают когерентными и неkohерентными. *Когерентной* называется производная единица ФВ, связанная с другими единицами системы уравнением, в котором числовой множитель принят равным единице. Например, единицу скорости получают с помощью уравнения, определяющего скорость прямолинейного и равномерного движения точки: $v = L/t$, где L – длина пройденного пути, t – время движения. Подстановка вместо L и t их единиц в СИ дает $v = 1$ м/с. Следовательно, единица скорости является когерентной.

Если уравнение связи содержит числовой коэффициент, отличный от единицы, то для образования когерентной единицы СИ в правую часть уравнения подставляют величины со значениями в единицах СИ, дающие после умножения на коэффициент общее числовое значение, равное единице. Например, если для образования когерентной единицы энергии применяют уравнение $E = 0,5mv^2$, где m – масса тела, v – его скорость, то когерентную единицу энергии можно образовать двумя путями:

$$\ell = 0,5 (2mv^2) = 0,5 (1 \text{ м/с})^2 = 1 (\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2) = 1 \text{ Дж};$$

$$E = 0,5m (2v^2) = 0,5 (1 \text{ кг})(2 \text{ м/с})^2 = 1 (\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2) = 1 \text{ Дж}.$$

На XX Генеральной конференции мер и весов (1995 г.) единицы плоского и телесного углов – радиан и стерadian исключены из