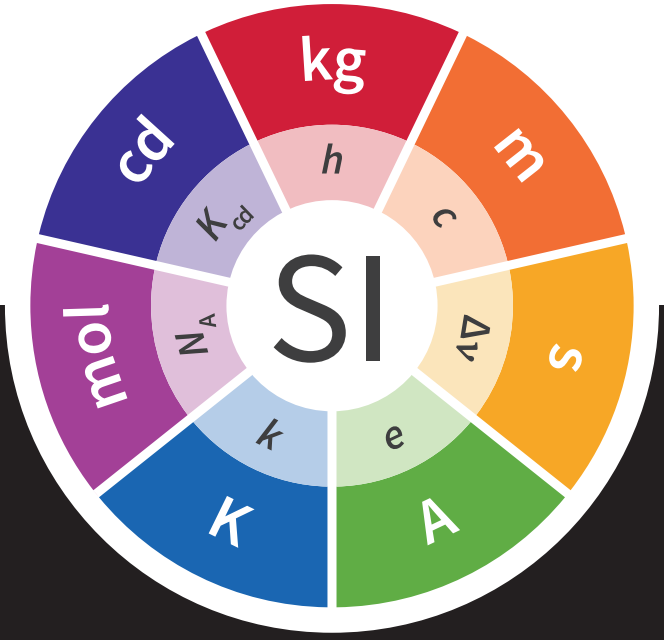
Bureau International des Poids et Mesures

РОССТАНДАРТ

Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии



МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ (SI)

ИЗДАНИЕ 9-е I 2019 г.

Этот документ был составлен после получения разрешения от МБМВ, который сохраняет полное авторское право, охраняемое на международном уровне. МБМВ не несет никакой ответственности за актуальность, точность, полноту или качество информации и материалов, предлагаемых в любом переводе. Единственной официальной версией является оригинал документа, опубликованного МБМВ.

Издание подготовлено Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт).

Над переводом работали: А.Б. Дятлев (ФГУП "ВНИИМ им. Д.И.Менделеева) , Е.П. Зингер (ФГУП «ВНИИМ им.Д.И. Менделеева), Е.Ю.Корзинин (ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»), Е.И.Лунёва (ФГУП «ВНИИМ им.Д.И. Менделеева), Г.В.Битюкова (ФГУП «ВНИИМС»), Л.К.Исаев (ФГУП «ВНИИМС»), М.И.Калинин (ФГУП «ВНИИМС»).

Примечание по авторскому праву.

Брошюра SI распространяется в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе, при условии, что будет дана соответствующая ссылка на автора(ов) и источник произведения, включена ссылка на лицензию Creative Commons и дано указание на то, были ли внесены какие-либо изменения.

РОССТАНДАРТ
Федеральное агентство
по техническому регулированию
и метрологии

109074, г. Москва,
Китайгородский пр., д. 7, стр. 1

info@gost.ru
www.gost.ru

МБМВ
и Метрическая Конвенция

Международное Бюро мер и весов (МБМВ) было основано в соответствии с Метрической Конвенцией, подписанной семнадцатью государствами в Париже 20-го мая 1875 г. во время заключительной сессии дипломатической Конференции по Метру. Конвенция была пересмотрена в 1921 г.

По состоянию на 20 мая 2019 г., членами Конвенции являются пятьдесят девять государств: Аргентина, Австралия, Австрия, Бельгия, Бразилия, Болгария, Канада, Чили, Китай, Колумбия, Хорватия, Чешская Республика, Дания, Египет, Финляндия, Франция, Германия, Греция, Венгрия, Индия, Индонезия, Иран (Исламская Республика), Ирак, Ирландия, Израиль, Италия, Япония, Казахстан, Кения, Корея (Республика), Литва, Малайзия, Мексика, Черногория, Нидерланды, Новая Зеландия, Норвегия, Пакистан, Польша, Португалия, Румыния, Российская Федерация, Саудовская Аравия, Сербия, Сингапур, Словакия, Словения, Южная Африка, Испания, Швеция, Швейцария, Таиланд, Тунис, Турция, Украина, Объединенные Арабские Эмираты, Великобритания, Соединенные Штаты Америки и Уругвай.

Штаб-квартира МБМВ расположена недалеко от Парижа, на территории (43 520 м^2) Павильона барона де Бретейля (парк Сен-Клу), предоставленной в распоряжение Бюро Правительством Французской Республики; ее содержание финансируется государствами-членами Метрической Конвенции.

Задача МБМВ состоит в обеспечении унификации измерений во всем мире, а его цели заключаются в следующем:

- представлять международное измерительное сообщество с целью максимального повышения его эффективности и влияния;
- быть центром научного и технического сотрудничества между государствами-членами, предоставляя возможности для международных сличений с распределением затрат;
- быть координатором всемирной измерительной системы, с целью обеспечения сопоставимости и международного признания результатов измерений.

МБМВ находится в исключительном ведении Международного Комитета мер и весов (МКМВ), который, в свою очередь, подчиняется Генеральной Конференции по мерам и весам (ГКМВ) и отчитывается перед ней по работе, проделанной МБМВ.

Генеральная Конференция обычно проводится каждые четыре года, и в ней участвуют представители всех государств-членов. Задачами заседаний являются:

- обсуждение и принятие мер, необходимых для обеспечения распространения и совершенствования Международной системы единиц (SI), которая является современной формой метрической системы;
- подтверждение результатов новых фундаментальных метрологических определений и различных научных резолюций международного характера;
- принятие всех основных решений по финансированию, организации и развитию МБМВ.

Ассоциированными членами Генеральной Конференции являются сорок две страны и экономики: Албания, Азербайджан, Бангладеш, Беларусь, Боливия, Босния и Герцеговина, Ботсвана, Сообщество стран Карибского бассейна и общий рынок (CARICOM), Китай Тайбэй, Коста-Рика, Куба, Эквадор, Эстония, Эфиопия, Грузия, Гана, Гонконг (Китай), Ямайка, Кувейт, Латвия, Люксембург, Мальта, Маврикий, Молдова (Республика), Монголия, Намибия, Северная Македония, Оман, Панама, Парагвай, Перу, Филиппины, Катар, Сейшельские Острова, Шри-Ланка, Судан, Сирийская Арабская Республика, Танзания (Объединенная Республика), Вьетнам, Замбия и Зимбабве.

В состав МКМВ входят восемнадцать членов, представляющих свои страны; в настоящее время МКМВ собирается каждый год. Сотрудники Комитета представляют правительствам государств-членов ежегодный отчет об административном и финансовом состоянии МБМВ. Основной задачей МКМВ является обеспечение всемирного единообразия единиц измерений. Это осуществляется путем непосредственных действий или подачей предложений на рассмотрение ГКМВ.

Деятельность МБМВ, которая вначале ограничивалась измерениями длины и массы и метрологическим изучением этих величин, была расширена до эталонов в области электричества (1927 г.), фотометрии и радиометрии (1937 г.), ионизирующих излучений (1960 г.), шкал времени (1988 г.) и химии (2000 г.). С этой целью первоначальные лаборатории, построенные в 1876 -1878 гг., в 1929 г. были расширены; в 1963-1964 гг. были построены новые здания для лаборатории ионизирующих излучений, в 1984 г. – для работ с лазером и в 1988 г. – для библиотеки и офисов. В 2001 г. было открыто новое здание для мастерских, офисов и залов заседаний.

В лабораториях МБМВ работают около сорока пяти физиков и инженеров. В основном они проводят метрологические исследования, международные сличения реализаций

единиц и калибровку эталонов. Ежегодный отчет Директора МБМВ содержит подробную информацию о проделанной работе.

После расширения сферы деятельности МБМВ в 1927 г., МКМВ создал органы, известные как Консультативные комитеты, задачей которых является предоставление информации по вопросам, касающимся их тематики, для изучения и консультирования. Эти Консультативные комитеты, которые могут формировать временные или постоянные рабочие группы для изучения специальных тем, отвечают за координацию международных работ, проводимых в порученных им областях, а также за предоставление рекомендаций по единицам, относящимся к их профилю деятельности, для МКМВ.

Консультативные комитеты работают по единым правилам, разработанным для них МКМВ (см. CIPM-D-01, *Rules of procedure for Consultative Committees (CCs) created by CIPM, CC working groups and CC workshops*). Они проводят свои заседания с нерегулярными интервалами. Президент каждого Консультативного комитета назначается МКМВ и обычно является членом МКМВ. Членами Консультативных комитетов могут быть метрологические лаборатории и специализированные институты, одобренные МКМВ, которые направляют делегатов по своему выбору. Кроме того, в его состав входят индивидуальные члены, назначаемые МКМВ, а также представитель МБМВ (см. CIPM-D-01, *Rules of procedure for Consultative Committees (CCs) created by CIPM, CC working groups and CC workshops*). В настоящее время существует десять таких комитетов:

1. Консультативный комитет по электричеству и магнетизму (CCEM), новое название, данное в 1997 г. Консультативному комитету по электричеству (CCE), основанному в 1927 г.;
2. Консультативный комитет по фотометрии и радиометрии (CCPR), новое название, данное в 1971 г. Консультативному комитету по фотометрии, основанному в 1933 г. (в период с 1930 по 1933 гг. вопросами фотометрии занимался CCE);
3. Консультативный комитет по термометрии (CCT), основанный в 1937 г.;
4. Консультативный комитет по длине (CCL), новое название, данное в 1997 г. Консультативному комитету по определению метра (CCDM), основанному в 1952 г.;
5. Консультативный комитет по времени и частоте (CCTF), новое название, данное в 1997 г. Консультативному комитету по определению секунды (CCDS), основанному в 1956 г.;
6. Консультативный комитет по ионизирующим излучениям (CCRI), новое название, данное в 1997 г. Консультативному комитету по эталонам ионизирующих излучений (CCEMRI), основанному в 1958 г. (в 1969 г. этот комитет образовал четыре секции: секция I (рентгеновское и гамма излучение и электроны), секция II (измерение радиоизотопов), секция III (нейтронные измерения), секция IV (эталоны α-излучения); в 1975 г. последняя секция была распущена и ответственность за ее сферу деятельности была возложена на секцию II);
7. Консультативный комитет по единицам (CCU), основанный в 1964 г. (этот комитет заменил Комиссию по Системе единиц, основанную МКМВ в 1954 г.);
8. Консультативный комитет по массе и связанным с ней величинам (CCM), основанный в 1980 г.;
9. Консультативный комитет по количеству вещества: метрология в химии (CCQM), основанный в 1993 г.;
10. Консультативный комитет по акустике, ультразвуку и вибрации (CCAUV), основанный в 1999 г.

Материалы ГКМВ и МКМВ публикуются МБМВ в следующих сериях:

- *Отчеты о заседаниях Генеральной Конференции по мерам и весам;*
- *Отчеты о заседаниях Международного Комитета мер и весов.*

В 2003 г. МКМВ постановил прекратить печать отчетов о заседаниях Консультативных комитетов, которые теперь размещаются на вебсайте МБМВ на языке оригинала.

МБМВ также публикует монографии по специальным метрологическим вопросам и периодически обновляет брошюру под названием Международная система единиц (SI), в которой собраны все решения и рекомендации, касающиеся единиц.

Публикация сборников *Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures* (22 тома, опубликованные в период с 1881 по 1966 гг.) и *Recueil de Travaux du Bureau International des Poids et Mesures* (11 томов, опубликованные в период с 1966 по 1988 гг.) прекращена по решению МКМВ.

Научные труды МБМВ публикуются в открытой научной литературе.

С 1965 г. *Metrologia*, международный журнал, издаваемый под эгидой МКМВ, печатает статьи, посвященные научной метрологии, совершенствованию методов измерений, работе с эталонами и единицами, а также отчеты о деятельности, решения и рекомендации различных структур, созданных в рамках Метрической Конвенции.

МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие к 9-му изданию **7**

1 Введение **10**
1.1 SI и определяющие константы **10**
1.2 Целесообразность использования определяющих констант для определения SI **10**
1.3 Реализация SI **11**

2 Международная система единиц **12**

2.1 Определение единицы величины **12**
2.2 Определение SI **12**
2.2.1 Природа семи определяющих констант **13**
2.3 Определения единиц SI **14**
2.3.1 Основные единицы **15**
2.3.2 Практическая реализация единиц SI **20**
2.3.3 Размерности величин **21**
2.3.4 Производные единицы **22**
2.3.5 Единицы величин, описывающих биологические и физиологические явления **26**
2.3.6 Единицы SI в рамках общей теории относительности **26**

3 Приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц SI **28**

4 Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами SI **30**

5 Написание обозначений и названий единиц и выражение значений величин **31**

5.1 Использование обозначений и названий единиц **31**
5.2 Обозначения единиц **31**
5.3 Названия единиц **32**
5.4 Правила и стилистика выражения значений величин **32**
5.4.1 Значение и числовое значение величины и использование алгебры величин **32**
5.4.2 Обозначение величин и обозначение единиц **33**
5.4.3 Способ записи значения величины **33**
5.4.4 Способы записи чисел и десятичного разделителя **34**
5.4.5 Выражение неопределенности измерения значения величины **34**
5.4.6 Умножение и деление обозначений величин, значений величин или чисел **34**
5.4.7 Умножение и деление обозначений величин, значений величин или чисел **35**
5.4.8 Плоские углы, телесные углы и фазовые углы **35**

Приложение 1. Решения ГКМВ и МКМВ 37

Приложение 2. Практическая реализация определений некоторых важных единиц 85

Приложение 3. Единицы измерения фотохимических и фотобиологических величин 86

Приложение 4. Исторические заметки о развитии Международной системы единиц и ее основных единиц 87

Часть 1. Историческое развитие реализации единиц SI 87

Часть 2. Историческое развитие Международной Системы 89

Часть 3. Исторический взгляд на развитие основных единиц 91

Список сокращений, используемых в настоящем томе 95

Предисловие к 9-му изданию

Международная система единиц, SI, предпочтительно используется во всем мире как основной язык в области науки, техники, промышленности и торговли с момента своего создания в 1960 г. Резолюцией 11-го заседания ГКМВ (Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM).

Данная брошюра публикуется МБМВ с целью распространения и разъяснения SI. В ней перечислены наиболее важные Резолюции ГКМВ и решения МКМВ, касающиеся метрической системы, уходящие корнями к первому заседанию ГКМВ в 1889 году.

SI всегда оставалась практичной и динамичной системой, постоянно развивавшейся на основе новейших научно-технических достижений. В частности, огромный прогресс в области атомной физики и квантовой метрологии за последние 50 лет, позволил дать определения секунды и метра, а также выработать практические представления электрических единиц с использованием преимуществ атомных и квантовых явлений для реализации соответствующих единиц при уровне точности, ограниченном только нашими техническими возможностями, а не самими определениями. Эти научные достижения, наряду с разработками в области измерительной техники, позволили внести изменения в SI, которые описаны в предыдущих изданиях данной брошюры.

Данное 9-е издание Брошюры SI подготовлено после принятия на 26-м заседании ГКМВ далеко идущих изменений. На этом заседании был представлен новый подход к формулированию определений единиц в целом, а также семи основных единиц, в частности, через фиксирование числовых значений для семи «определяющих» констант. Среди них природные фундаментальные константы, такие как постоянная Планка и скорость света, поэтому определения основаны на нашем современном понимании законов физики и отражают это понимание. Впервые стал доступен полный набор определений, которые не используют в качестве основы для сравнения какие-либо эталоны в виде артефактов, материальные свойства или описания измерений. Эти изменения позволили реализовать все единицы с точностью, ограниченной практически только квантовой структурой природы и нашими техническими возможностями, но не самими определениями. Любое действительное уравнение физики, связывающее определяющие константы с единицами, может быть использовано для реализации единицы, создавая, таким образом, возможности для инноваций и повсеместной реализации с возрастающей точностью по мере развития технологий. Это означает, что недавнее переопределение единиц представляет собой исторический и значимый шаг вперед.

Изменения были одобрены ГКМВ в ноябре 2018 г. и вступили в силу 20 мая 2019 г. Эта дата была выбрана потому, что в этот день отмечается Всемирный День Метрологии, знаменующий подписание Метрической Конвенции в 1875 г. Несмотря на то, что изменения имеют большие перспективы, большое внимание было уделено согласованию новых определений с определениями, действующими на момент внесения изменений.

Мы обращаем внимание на то, что с момента своего создания в 1960 г. Международную систему единиц обозначают аббревиатурой «SI». Этот принцип сохранялся в восьми предыдущих изданиях Брошюры и был подтвержден в принятой на 26-м заседании ГКМВ Резолюции 1, которая также подтвердила название данной брошюры: «Международная система единиц» (International System of Units). Эта последовательность в обозначении SI отражает усилия ГКМВ и МКМВ по обеспечению согласованности значений результатов измерений, выраженных в единицах SI, после каждого произведенного изменения.

Текст данной Брошюры был подготовлен с целью предоставления полноценного описания SI с некоторыми историческими справками. Она также имеет четыре приложения:

Приложение 1 в хронологическом порядке воспроизводит все решения (Резолюции, Рекомендации, Декларации), принятые ГКМВ и МКМВ с 1889 года по единицам измерений и Международной системе единиц.

Приложение 2 доступно только в электронной версии (***www.bipm.org***). Оно описывает практическую реализацию семи основных единиц и других важных единиц в каждой области измерений. Данное Приложение регулярно обновляется, чтобы оперативно отражать улучшения в экспериментальных методах, доступных для реализации единиц.

Приложение 3 доступно только в электронной версии (***www.bipm.org***). В нем обсуждаются единицы фотохимических и фотобиологических величин.

В Приложении 4 приведены некоторые заметки по истории развития SI.

В заключение, мы выражаем нашу благодарность членам Консультативного комитета по единицам, ККЕ (Comité Consultatif des Unités, CCU) МКМВ, ответственным за составление данной Брошюры. Окончательный текст был одобрен как ККЕ, так и МКМВ.

Март 2019 г.

Б. Инглис

Президент, МКМВ

Й. Ульрих

Президент, ККЕ

М.Дж.Т. Милтон

Директор, МБМВ

Примечание к английскому тексту Брошюры

В 2003 г., во исполнение решения МКМВ 1997 г., 22-е заседание ГКМВ постановило, что «символом десятичного разделителя должна быть либо точка, либо запятая». В соответствии с этим решением, и учитывая практику двух языков (английского и французского), в данном издании точка используется в английской версии, а запятая – во французской. Это не имеет никакого влияния на перевод на другие языки. Имеют место небольшие изменения в написании на языках разных англоязычных стран (например, «metre» и «meter», «litre» и «liter»). В связи с этим представленный здесь английский текст соответствует серии ISO/IEC 80000 «*Quantities and Units,* Величины и единицы». Тем не менее, символы для единиц SI, используемые в данной брошюре, одинаковы на всех языках.

Читателю следует обратить внимание на то, что официальные протоколы заседаний ГКМВ и сессий МКМВ приведены на французском языке. В данной брошюре приводится перевод на английский, но при необходимости получить авторитетную справочную информацию или при наличии сомнений в интерпретации текста следует пользоваться версией текста на французском языке.

1 Введение

1.1 SI и определяющие константы

В этой брошюре представлена информация об определении и использовании Международной системы единиц, известной во всем мире как SI (от французского Système International d'Unités), за которую несет ответственность ГКМВ. В 1960 г. 11-я ГКМВ официально сформировала и определила SI и с тех пор периодически пересматривает ее в соответствии с потребностями пользователей и достижениями науки и техники. Последний и, возможно, наиболее существенный пересмотр SI с момента ее создания был сделан на 26-й ГКМВ (2018 г.) и описывается в данном 9-м издании Брошюры SI. Метрическая Конвенция и ее органы – ГКМВ, МКМВ, МБМВ и Консультативные комитеты описаны в тексте «МБМВ и Метрическая Конвенция» на стр. 2.

SI представляет собой согласованную систему единиц, предназначенную для использования во всех сферах жизни, включая международную торговлю, производство, безопасность, охрану труда, защиту окружающей среды и фундаментальную науку, которая лежит в их основе. Система величин, на которой основана SI, и связывающие их уравнения, опираются на современные представления о природе, знакомые всем ученым, технологам и инженерам.

Определение единиц SI основано на наборе из семи определяющих констант. Вся система единиц может быть получена из фиксированных значений этих определяющих констант, выраженных в единицах SI. Эти семь определяющих констант – фундаментальная особенность определения всей системы единиц. Набор данных констант был признан оптимальным, принимая во внимание предыдущее определение SI, основанное на семи основных единицах, и прогресс в науке.

Для реализации определений могут быть использованы различные экспериментальные методы, описанные Консультативными комитетами МКМВ. Описание способов реализаций называют также «mises en pratique» («практические реализации»). Методы реализации могут пересматриваться в связи с проведением новых экспериментов; поэтому рекомендации по реализации определений не включены в данную брошюру, но доступны для ознакомления на сайте МБМВ.

1.2 Целесообразность использования определяющих констант для определения SI

Исторически единицы SI выражались через основные единицы (с недавнего времени через семь основных единиц). Все остальные единицы, называемые производными единицами, выводились как произведение основных единиц в различных степенях.

Использовались различные типы определений основных единиц: особые свойства артефактов, такие как масса международного прототипа (IPK) для единицы килограмма, особые физические состояния вещества, такие как тройная точка воды для единицы кельвина, описание идеального эксперимента, как в случае ампера и канделы, или физические (естественные) константы, такие как скорость света для определения единицы длины - метра.

Для практического использования единицы должны быть не только определены, но и физически реализованы с целью дальнейшей их передачи. В случае с артефактами, определение и способ реализации одинаковы — этим путем шли древние развитые цивилизации. Несмотря на простоту и ясность таких определений, использование артефактов связано с риском утраты, повреждения или изменения их свойств. Другие

способы определения единиц являются гораздо более абстрактными или идеализированными. При этом реализация оказывается концептуально отделенной от определения, благодаря чему единицы, в принципе, могут быть воспроизведены независимо в любом месте и в любое время. Кроме того, по мере развития науки и технологий, могут быть внедрены новые и более совершенные методы реализации без необходимости переопределения единиц. Эти преимущества — наиболее очевидные в контексте истории определения метра, начиная с артефакта и до трансформации в фиксированное числовое значение скорости света — способствовали принятию решения об определении всех единиц с помощью определяющих констант.

Выбранный набор основных единиц связан не с их уникальностью, а обусловлен исторически сложившейся практикой, и поэтому известен всем пользователям SI. В новом определении SI сохранено описание с точки зрения основных и производных единиц, но оно переформулировано в связи с принятием значений определяющих констант.

1.3 Реализация SI

В соответствии с решением ГКМВ, определения единиц SI представляют собой наивысший референтный уровень прослеживаемости измерений к SI.

Метрологические институты всего мира осуществляют практические реализации определений, обеспечивая тем самым прослеживаемость измерений к SI. Консультативные комитеты предоставляют основу для установления эквивалентности реализаций с целью обеспечения единства измерений во всем мире.

При необходимости, органы по стандартизации могут указывать дополнительную информацию о величинах, единицах и правилах их применения. Всякий раз, когда задействованы единицы SI, такие стандарты должны ссылаться на определения, установленные ГКМВ. Многие подобные уточнения перечислены, например, в стандартах, разработанных Международной организацией по стандартизации и Международной электротехнической комиссией (серия международных стандартов ISO/IEC 80000).

Отдельные страны установили правила, касающиеся использования единиц в сфере национального законодательства, как для общего пользования, так и для конкретных областей, таких как торговля, здравоохранение, общественная безопасность и образование. Практически во всех странах это законодательство основано на SI. За международную гармонизацию технических спецификаций таких законодательств отвечает Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ).

2 Международная система единиц

2.1 Определение единицы величины

Значение величины обычно выражается как произведение числа на единицу. Единица представляет собой конкретную величину рассматриваемого рода и используется как основа для сравнения, а число выражает отношение значения величины к значению единицы. Для конкретной величины могут использоваться разные единицы. Например, значение скорости v может быть выражено как v = 25 м/с или v = 90 км/ч, где метр в секунду и километр в час являются альтернативными единицами для одной и той же величины- скорости.

Например, скорость света в вакууме является физической постоянной и обозначается буквой c. Ее значение в единицах SI определяется соотношением c = 299 792 458 м/с, где 299 792 458 – числовое значение, а м/с – единица.

Прежде чем представить результат измерения, важно адекватно описать измеряемую величину. Описание может быть простым, как в случае длины конкретного стального прута, но может существенно усложниться, когда требуется более высокая точность и необходимо указать дополнительные параметры, такие как температура.

При представлении результата измерения необходимы ***оценочное значение*** измеряемой величины и связанная с этим значением ***неопределенность***. Оба эти параметра выражаются в одних и тех же единицах.

2.2 Определение SI

Как и для любой величины значение фундаментальной константы может быть выражено в виде произведения числа на единицу.

Отношения единиц SI могут быть выражены либо с использованием дробной черты (/), либо с использованием отрицательного показателя степени (-).

Приведенные ниже определения дают точное числовое значение каждой из констант, выраженное в соответствующих единицах SI. Фиксация точного числового значения константы определяет единицу, поскольку произведение числового значения на единицу должно быть равно значению константы, которое полагается постоянным.

Например,
м/с = $мс^{-1}$
моль/моль = моль $моль^{-1}$

Семь констант выбраны таким образом, что любая единица SI может быть представлена либо через саму определяющую константу, либо через произведения или отношения определяющих констант.

Международная система единиц SI - это такая система единиц, в которой

- **частота перехода сверхтонкого расщепления невозмущенного основного состояния атома цезия-133 $\Delta\nu_{Cs}$ равна 9 192 631 770 Гц,**
- **скорость света в вакууме *c* равна 299 792 458 м/с,**
- **постоянная Планка *h* равна $6{,}62607015 \times 10^{-34}$ Дж с,**
- **элементарный заряд *e* равен $1{,}602176634 \times 10^{-19}$ Кл,**
- **постоянная Больцмана *k* равна $1{,}380649 \times 10^{-23}$ Дж/К,**
- **постоянная Авогадро N_A равна $6{,}02214076 \times 10^{23}$ $моль^{-1}$,**
- **световая эффективность монохроматического излучения частотой 540×10^{12} Гц, $K_{кд}$ равна 683 лм/Вт,**

где герц, джоуль, кулон, люмен и ватт, обозначаемые как Гц, Дж, Кл, лм и Вт, соответственно, связаны с единицами секунда, метр, килограмм, ампер, кельвин, моль и кандела, обозначаемыми как с, м, кг, А, К, моль и кд, соответственно, следующими соотношениями: Гц = $с^{-1}$; Дж = кг $м^2$ $с^{-2}$; Кл = А с; лм = кд $м^2$ $м^{-2}$ = кд ср и Вт = кг $м^2$ $с^{-3}$.

Числовые значения семи определяющих констант не имеют неопределенности.

Таблица 1. Семь определяющих констант SI и семь определяемых ими единиц

Определяющая константа	Обозначение	Числовое значение	Единица
частота перехода сверхтонкого расщепления Cs	$\Delta \nu_{Cs}$	9 192 631 770	Hz (Гц)
скорость света в вакууме	c	299 792 458	m s^{-1} (м $с^{-1}$)
постоянная Планка	h	$6{,}62607015 \times 10^{-34}$	J s (Дж с)
элементарный заряд	e	$1{,}602176634 \times 10^{-19}$	C (Кл)
постоянная Больцмана	k	$1{,}380649 \times 10^{-23}$	J K^{-1} (Дж $К^{-1}$)
постоянная Авогадро	N_A	$6{,}02214076 \times 10^{23}$	mol^{-1} ($моль^{-1}$)
световая эффективность	$K_{кд}$	683	lm W^{-1} (лм $Вт^{-1}$)

Сохранение преемственности, насколько это возможно, всегда было неотъемлемой частью любых изменений в Международной системе единиц. Числовые значения определяющих констант были выбраны таким образом, чтобы соответствовать предыдущим определениями настолько, насколько позволяют современные достижения в науке и накопленные знания.

2.2.1 Природа семи определяющих констант

Определяющими константами могут быть как природные фундаментальные константы, так и технические константы.

Использование константы для определения единицы отделяет ее определение от реализации. Благодаря этому появляется возможность разрабатывать, по мере развития технологий, совершенно иные, новые и более совершенные методы воспроизведения без необходимости менять определение.

Технические константы, такие как $K_{кд}$, световая эффективность монохроматического излучения частотой 540×10^{12} Гц, имеют конкретное назначение. В принципе, эти константы могут выбираться свободно, например, так чтобы включать в себя общепринятые физиологические или другие весовые факторы. Напротив, использование природных фундаментальных констант, как правило, не допускает такого выбора, поскольку они связаны с другими константами через уравнения, описывающие законы физики.

Набор из семи определяющих констант был выбран так, чтобы обеспечить фундаментальные, стабильные и универсальные основы для сравнения (references), которые в то же время позволят осуществлять практические реализации с наименьшими неопределенностями. В технических условных обозначениях и спецификациях учитываются также аспекты их исторического развития.

Постоянная Планка h и скорость света в вакууме c должным образом описаны как фундаментальные. Они определяют квантовые эффекты и пространственно-временные свойства, соответственно, и совершенно одинаково влияют на все объекты (частицы и поля).

Элементарный заряд e соответствует константе взаимодействия электромагнитной силы через постоянную тонкой структуры $\alpha = e^2/(2c\varepsilon_0 h)$, где ε_0 – электрическая проницаемость вакуума или электрическая постоянная. Некоторые теории предсказывают изменение α во времени. Однако эксперименты накладывают столь сильные ограничения на максимально возможные изменения α, что любое влияние на предполагаемые практические измерения может быть исключено.

Постоянная Больцмана k является коэффициентом пропорциональности между единицами температуры (кельвин) и энергии (джоуль), поэтому ее числовое значение связано с исторически сложившимися характеристиками температурной шкалы. Температура системы зависит от тепловой энергии, но не обязательно от внутренней энергии системы. В статистической физике постоянная Больцмана связывает энтропию S с числом Ω квантово-механически доступных состояний, $S=k \ln \Omega$.

Частота излучения цезия $\Delta\nu_{Cs}$, частота перехода сверхтонкого расщепления невозмущенного основного состояния атома цезия-133, является характерным атомным параметром, на который могут влиять внешние факторы, такие как электромагнитные поля. Несмотря на это, лежащий в основе переход хорошо понятен, стабилен и является оптимальным выбором в качестве опорного с практической точки зрения. При выборе атомного параметра, такого как $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$, определение не отделяется от реализации, как это происходит в случае с h, c, e или k, но предоставляет основу для сравнения (reference).

Постоянная Авогадро N_{A} является коэффициентом пропорциональности между количеством вещества (с единицей моль) и числом структурных элементов (с единицей один, обозначение 1). Таким образом, она выступает как коэффициент пропорциональности аналогично постоянной Больцмана k.

Световая эффективность монохроматического излучения частотой 540×10^{12} Гц, $K_{\text{кд}}$, является технической константой, которая дает точное числовое соотношение между исключительно физическими характеристиками мощности излучения, воздействующего на человеческий глаз (W), и его фотобиологическим восприятием, определяемым через световой поток, обусловленным спектральной восприимчивостью стандартного наблюдателя (лм) на частоте 540×10^{12} герц.

2.3 Определения единиц SI

До определений, принятых в 2018 году, SI определялась через семь *основных единиц*, а *производные единицы* вычислялись как произведения степеней *основных единиц*. Определение SI путем фиксирования числовых значения семи определяющих констант приводит к тому, что это различие, в принципе, больше не требуется, поскольку все единицы, как *основные*, так и *производные,* могут быть выведены непосредственно из определяющих констант. Тем не менее, концепция основных и производных единиц сохраняется, так как она полезна и исторически хорошо обоснована, учитывая, что стандарты серии ISO/IEC 80000 определяют основные и производные величины, которые, безусловно, соответствуют основным и производным единицам SI, определяемым в данной брошюре.

2.3.1 Основные единицы

Основные единицы SI приведены в Таблице 2.

Таблица 2. Основные единицы SI

Основная величина		Основная единица	
Название	Принятое обозначение	Название	Обозначение
время	*t*	секунда	s (с)
длина	*l, x, r* и т.д.	метр	m (м)
масса	*m*	килограмм	kg (кг)
электрический ток	*I, i*	ампер	A
термодинамическая температура	*T*	кельвин	K
количество вещества	*n*	моль	mol (моль)
сила света	I_v	кандела	cd (кд)

Величины, как правило, обозначаются буквами латинского или греческого алфавита, напечатанными курсивом, и носят *рекомендательный характер*. Обозначения для единиц печатаются прямым шрифтом (roman) и носят *обязательный характер*, см. главу 5.

На основе определения SI через фиксированные числовые значения определяющих констант определения каждой из семи основных единиц выводятся при помощи одной или нескольких определяющих констант, что дает следующий набор определений:

Секунда

Секунда, обозначение с (s), есть единица времени в SI. Она определяется путем принятия фиксированного числового значения частоты перехода сверхтонкого расщепления невозмущенного основного состояния атома цезия-133 $\Delta\nu_{Cs}$ равным 9 192 631 770 при выражении в единице Гц, что соответствует c^{-1}.

Это определение означает точное соотношение $\Delta\nu_{Cs}$ = 9 192 631 770 Гц. Обратное отношение дает точное выражение для единицы секунда через определяющую константу $\Delta\nu_{Cs}$:

$$1\ \mathrm{Hz} = \frac{\Delta\nu_{Cs}}{9\ 192\ 631\ 770} \qquad \text{или} \qquad 1\ \mathrm{c} = \frac{9\ 192\ 631\ 770}{\Delta\nu_{Cs}}$$

Следствием из этого определения является то, что секунда равна продолжительности 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями невозмущенного основного состояния атома цезия-133.

Ссылка на невозмущенное состояние атома дана для разъяснения того, что определение секунды в SI основывается на изолированном атоме цезия, то есть невозмущённым каким-либо внешним полем, таким, как, например, фоновое излучение черного тела.

Определённая таким образом секунда – это единица собственного времени в рамках общей теории относительности. Для обеспечения скоординированной временной шкалы сигналы от разных первичных часов из разных местоположений объединяются, что требует корректировки с учетом релятивистских сдвигов частоты цезия (см. раздел 2.3.6).

МКМВ принял различные вторичные представления секунды, основанные на отобранных спектральных линиях атомов, ионов или молекул. Невозмущенные частоты этих линий могут быть определены с относительной неопределенностью не хуже, чем при реализации секунды, основанной на частоте сверхтонкого перехода цезия-133, но некоторые из них могут быть воспроизведены с большей стабильностью.

Метр

Метр, обозначение м (m), есть единица длины в SI. Он определяется путем принятия фиксированного числового значения скорости света в вакууме *c* равным 299 792 458 при выражении в единице м с$^{-1}$, где секунда определяется через частоту перехода в цезии $\Delta\nu_{Cs}$.

Это определение подразумевает точное соотношение c = 299 792 458 м с$^{-1}$. Обратное соотношение дает точное выражение для единицы метр через определяющие константы c и $\Delta\nu_{Cs}$:

$$1\ \text{м} = \left(\frac{c}{299\,792\,458}\right)\ \text{с} = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458}\,\frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}} \approx 30,633319\,\frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}$$

Из этого определения следует, что один метр — это длина пути, пройденного светом в вакууме за интервал времени, равный 1/ 299 792 458 секунды.

Килограмм

Килограмм, обозначение кг (kg), есть единица массы в SI. Он определяется путем принятия фиксированного числового значения постоянной Планка *h* равным 6,62607015 × 10^{-34} при выражении в единице Дж/с, что соответствует кг м^2 с$^{-1}$, где метр и секунда определяются через с и $\Delta\nu_{Cs}$.

Это определение подразумевает точное соотношение h = 6,62607015 × 10^{-34} кг м^2 с$^{-1}$. Обратное соотношение дает точное выражение для единицы килограмм через определяющие константы h, c и $\Delta\nu_{\text{Cs}}$:

$$1\ \text{кг} = \left(\frac{h}{6{,}62607015\times10^{-34}}\right)\ \text{м}^{-2}\text{с}$$

что равнозначно

$$1\ \text{кг} = \frac{(299\,792\,458)^2}{(6{,}62607015\times10^{-34})(9\,192\,631\,770)}\,\frac{h\Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2} \approx 1{,}4755214\times10^{40}\,\frac{h\Delta\nu_{Cs}}{c^2}.$$

Эффект этого определения состоит в определении единицы: кг м^2 с$^{-1}$ (единицы как величины «действие», так и величины «момент импульса».) Вместе с определениями секунды и метра это приводит к определению единицы массы, выраженной через постоянную Планка h.

Предыдущее определение килограмма фиксировало значение массы международного прототипа килограмма, *m(K)*, равным точно одному килограмму, а значение постоянной Планка h определялось экспериментально. Данное определение точно фиксирует числовое значение h, и теперь экспериментально должна определяться масса прототипа.

В данном определении числовое значение постоянной Планка таково, что на момент его принятия килограмм был равен массе международного прототипа, *m(K)* = 1 кг, с относительной стандартной неопределенностью 1 × 10^{-8}, которая являлась стандартной неопределенностью совокупности наилучших оценок значения постоянной Планка на тот момент.

Обратите внимание, что с помощью данного определения, в принципе, могут быть реализованы первичные эталоны в любой шкале масс.

Ампер

Ампер, обозначение A (A), есть единица электрического тока в SI. Он определяется путем принятия фиксированного числового значения элементарного заряда *e* равным 1,602176634 × 10^{-19} при выражении в единице Кл, что соответствует A с, где секунда определяется через $\Delta\nu_{Cs}$.

Это определение подразумевает точное соотношение e = 1,602176634 × 10^{-19} A с. Обратное соотношение дает точное выражение для единицы ампер через определяющие константы e и $\Delta\nu_{Cs}$:

$$1\ \mathrm{A} = \left(\frac{e}{1{,}602176634 \times 10^{-19}}\right)\ \mathrm{c}^{-1}$$

что равнозначно

$$1\ \mathrm{A} = \frac{1}{(9\ 192\ 631\ 770)(1{,}602176634 \times 10^{-19})}\Delta\nu_{Cs}e\ \approx 6{,}789687 \times 10^{8}\Delta\nu_{Cs}e.$$

Из этого определения следует, что один ампер — это сила электрического тока, соответствующая потоку 1/(1,602176634 × 10^{-19}) элементарных зарядов в секунду.

Предыдущее определение ампера было основано на силе взаимодействия двух проводников с током и соответствовало фиксации значения магнитной проницаемости вакуума μ_0 (также известной как магнитная постоянная) равным точно 4π × 10^{-7} Гн $м^{-1}$ = 4π × 10^{-7} Н A^{-2}, где Гн и Н обозначают когерентные производные единицы генри и ньютон соответственно. Новое определение ампера фиксирует значение e вместо μ_0. В результате, μ_0 должно определяться экспериментально.

Из этого также следует, что поскольку диэлектрическая проницаемость вакуума ε_0 (также известная как электрическая постоянная), волновое сопротивление вакуума Z_0 и адмитанс (полная проводимость) вакуума Y_0, равные $1/\mu_0 c^2$, $\mu_0 c$ и $1/\mu_0 c$ соответственно, также должны определяться экспериментально и иметь ту же относительную стандартную неопределенность, как и μ_0, поскольку c известна точно. Произведение $\varepsilon_0\mu_0 = 1/c^2$ и отношение $Z_0/\mu_0 = c$ остаются точными. На момент принятия настоящего определения ампера, μ_0 равна 4π × 10^{-7} Гн/м с относительной стандартной неопределенностью 2,3 × 10^{-10}.

Кельвин

Кельвин, обозначение К (K), есть единица термодинамической температуры в SI. Он определяется путем принятия фиксированного числового значения постоянной Больцмана, *k* равным 1,380649 × 10^{-23} при выражении в единице Дж $К^{-1}$, что соответствует кг $м^2$ $с^{-2}$ $К^{-1}$, где килограмм, метр и секунда определяются через *h*, *c* и $\Delta\nu_{Cs}$.

Это определение подразумевает точное соотношение k = 1,380649 × 10^{-23} кг $м^2$ $с^{-2}$ $К^{-1}$. Обратное соотношение дает точное выражение для единицы кельвин через определяющие константы k, h и $\Delta\nu_{Cs}$:

$$1\ \text{К} = \left(\frac{1{,}380649}{k}\right) \times 10^{-23}\,\text{кг м}^2\ \text{с}^{-2}$$

что равнозначно

$$1\ \text{К} = \frac{1{,}380649 \times 10^{-23}}{(6{,}62607015 \times 10^{-34})(9\ 192\ 631\ 770)} \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{k} \approx 2{,}2666653 \frac{\Delta\nu_{Cs} h}{k}.$$

Из этого определения следует, что один кельвин равен такому изменению термодинамической температуры, при котором изменение тепловой энергии kT равно 1,380649 × 10^{-23} Дж.

Предыдущее определение кельвина устанавливало температуру тройной точки воды $T_{\text{ТТВ}}$ равной 273,16 К. Поскольку новое определение фиксирует числовое значение k, $T_{\text{ТТВ}}$ теперь должна определяться экспериментально. На момент принятия этого определения $T_{\text{ТТВ}}$ была равна 273,16 К с относительной неопределенностью 3,7 × 10^{-7}, полученной на основе измерений k, предшествующих переопределению.

С учетом истории развития температурных шкал, в установившейся практике до сих пор принято выражать термодинамическая температуру, T, с точки зрения ее отличия от опорной температуры T_0 = 273,15 К, близкой к точке замерзания воды. Эта разность называется температурой Цельсия, t, и определяется уравнением

$$t = T - T_0.$$

Единицей температуры Цельсия является градус Цельсия, обозначаемый °C, который, по определению, равен по величине кельвину. Разность или интервал температур могут быть выражены в кельвинах или в градусах Цельсия, причем числовое значение для разности температур в обоих случаях будет одинаковым. Однако, числовое значение температуры Цельсия, выраженное в градусах Цельсия, связано с числовым значением термодинамической температуры, выраженным в градусах Кельвина, соотношением

$$t/(°C) = T/K - 273{,}15$$

(см. раздел 5.4.1 для объяснения используемых здесь обозначений).

Кельвин и градус Цельсия являются единицами Международной температурной шкалы 1990 года (МТШ-90), принятой МКМВ в 1989 г. в Рекомендации 5 (CI-1989, PV, 57, 115). Обратите внимание, что МТШ-90 определяет две величины, T_{90} и t_{90}, которые являются близкими приближениями к соответствующим термодинамическим температурам T и t.

Также отметим, что при таком определении первичная реализация кельвина может быть осуществлена, в принципе, в любой точке температурной шкалы.

Моль

Моль, обозначение моль (mol), есть единица количества вещества в SI. Один моль содержит точно 6,02214076 × 10^{23} структурных элементов. Это число есть фиксированное числовое значение постоянной Авогадро, N_A, выраженное в единице моль$^{-1}$ и называемое числом Авогадро.

Количество вещества в системе, обозначение *n*, является мерой количества конкретных структурных элементов. Структурными элементами могут быть атомы, молекулы, ионы, электроны и любые другие частицы или определенные группы частиц.

Это определение подразумевает точное соотношение N_A = 6,02214076 × 10^{23} моль$^{-1}$. Обратное соотношение дает точное выражение для моля через определяющую константу N_A:

$$1 \text{ моль} = \left(\frac{6{,}02214076 \times 10^{23}}{N_A}\right).$$

Из этого определения следует, что моль – это количество вещества системы, содержащее 6,02214076 × 10^{23} определенных структурных элементов.

Предыдущее определение моля фиксировало значение молярной массы углерода-12, $M(^{12}\text{C})$, равное точно 0,012 кг/моль. Согласно новому определению $M(^{12}\text{C})$ больше не известна точно и должна определяться экспериментально. Значение, выбранное для N_A, таково, что на момент принятия настоящего определения моля, $M(^{12}\text{C})$ равна 0,012 кг/моль с относительной стандартной неопределенностью 4,5 × 10^{-10}.

Молярная масса любого атома или молекулы *X* по-прежнему может быть получена из относительной атомной массы из уравнения

$$M(X) = A_r(X)\left[M\left(^{12}\text{C}\right)/12\right] = A_r(X)M_u,$$

кроме того, молярная масса любого атома или молекулы *X* также связана с массой структурного элемента *m(X)* через зависимость

$$M(X) = N_A m(X) = N_A A_r(X) m_u.$$

В этих уравнениях M_u – молярная массовая постоянная, равная $M(^{12}\text{C})/12$, а m_u – атомная единица массы, равная $m(^{12}\text{C})/12$. Они связаны с постоянной Авогадро соотношением

$$M_u = N_A m_u.$$

В названии «количество вещества» слово «вещество» обычно заменяется словами, характеризующими рассматриваемое вещество, например, «количество хлористого водорода, HCl» или «количество бензола, C_6H_6». Важно дать точное описание структурных элементов (что подчеркнуто в определении моля); предпочтительно указать молекулярную химическую формулу вещества. Хотя слово «количество» имеет более общее словарное определение, для краткости можно сокращать полное наименование «количество вещества» до просто «количество». Это также относится и к производным величинам, таким как «концентрация количества вещества», которую можно назвать просто «молярной концентрацией». В области клинической химии название «концентрация количества вещества» обычно сокращается до «концентрация вещества».

Кандела

Кандела, обозначение кд (cd), в SI есть единица силы света в заданном направлении. Она определяется путем принятия фиксированного числового значения световой эффективности монохроматического излучения частотой 540 × 10^{12} Гц, $K_{КД}$, равным 683 в единице лм $Вт^{-1}$ или кд ср $кг^{-1}$ $м^{-1}$ $с^3$, где килограмм, метр и секунда определяются через h, c и $\Delta\nu_{Cs}$.

Это определение подразумевает точное соотношение $K_{кд}$ = 683 кд ср $кг^{-1}$ $м^{-2}$ $с^3$ для монохроматического излучения частотой 540 × 10^{12} Гц. Обратное соотношение дает точное выражение для канделы через определяющие константы $K_{кд}$, h и $\Delta\nu_{Cs}$:

$$1\ \text{кд} = \left(\frac{K_{\text{КД}}}{683}\right) \text{кг м}^2\text{с}^{-3}\text{ср}^{-1}$$

что равнозначно

$$1\ \text{кд} = \frac{1}{(6{,}62607015\times10^{-34})(9192631770)^2 683}(\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{\text{КД}}$$
$$\approx 2{,}614830\times10^{10}(\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{\text{КД}}$$

Из этого определения следует, что одна кандела равна силе света в заданном направлении от источника, который излучает монохроматическое излучение с частотой 540 × 10^{12} Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср. Определение стерадиана приведено ниже в таблице 4.

2.3.2 Практическая реализация единиц SI

Наиболее точные экспериментальные методы реализации единиц с использованием уравнений физики известны как первичные методы. Важным свойством первичных методов является возможность измерять величину в заданных единицах, используя при измерении только величины, не содержащие данную единицу. В настоящей формулировке SI основа определений отличается от использовавшейся ранее, поэтому для практической реализации единиц SI могут использоваться новые методы.

Раньше каждое определение подразумевало конкретные условия или физические состояния, что устанавливает фундаментальный предел точности реализации, но теперь пользователь может выбирать любое удобное уравнение физики, связывающее определяющие константы с измеряемой величиной. Это гораздо более общий способ определения основных единиц измерения, и он не ограничен современным состоянием науки или технологии. Будущий прогресс может привести к другим способам реализации единиц с более высокой точностью. Такой способ определения, в принципе, не ограничивает точность реализации. Исключением остается определение секунды, в котором, на данный момент, сохраняется указание на конкретный микроволновый переход в цезии. Для более полного объяснения реализации единиц SI см. Приложение 2.

2.3.3 Размерности величин

Физические величины могут быть организованы в систему размерностей, где используемая система определяется по согласованию. Каждая из семи основных единиц SI рассматривается как имеющая собственную размерность. Обозначения для основных величин и обозначения для их размерностей приведены в Таблице 3.

Таблица 3. Основные величины и размерности SI

Основная величина	Общепринятое обозначение величины	Обозначение размерности
время	t	T
длина	l, x, r и т.д.	L
масса	m	M
электрический ток	I, i	I
термодинамическая температура	T	Θ
количество вещества	n	N
сила света	I_v	J

Все остальные величины, за исключением счётных, являются производными величинами и могут быть выражены через основные величины в соответствии с уравнениями физики. Размерности производных величин записываются в виде произведений степеней размерностей основных величин с помощью уравнений, которые связывают производные величины с основными. В общем случае размерность любой величины Q записывается в виде размерного произведения:

$$\dim Q = \mathrm{T}^{\alpha}\mathrm{L}^{\beta}\mathrm{M}^{\gamma}\mathrm{I}^{\delta}\Theta^{\varepsilon}\,\mathrm{N}^{\zeta}\mathrm{J}^{\eta}$$

где показатели степени α, β, γ, δ, ε, ζ и η, которые, в основном, являются малыми целыми числами и могут быть положительными, отрицательными или нулевыми, называются показателями размерности.

Существуют величины Q, для которых в определяющем уравнении все показатели размерности для размерности Q равны нулю. Это верно, в частности, для любой величины, определяемой как отношение двух величин одного и того же рода. Например, показатель преломления – это отношение двух скоростей, а относительная диэлектрическая проницаемость – это отношение диэлектрической проницаемости среды к диалектической проницаемости вакуума. Эти величины являются просто числами. Соответствующей единицей является число «один», обозначаемое как 1, но она редко записывается в явной форме (см. 5.4.7).

Существуют также величины, которые не могут быть выражены через семь основных единиц SI, но при этом исчисляются. К таким величинам относятся число молекул, число клеточных или биомолекулярных объектов (например, копии конкретной последовательности нуклеиновой кислоты) или степень вырождения в квантовой механике. Исчисляемые величины также являются величинами с единицей «один».

Единица «один» является нейтральным элементом любой системы единиц – она необходима и входит в состав автоматически. Включать ее формальным образом по общему решению не требуется. Таким образом, формальная прослеживаемость к SI может быть установлена с помощью соответствующих проверенных методик измерения.

Плоские и телесные углы, выраженные в радианах и стерадианах, соответственно, в SI рассматриваются как величины с единицей «один» (см. пункт 5.4.8). Обозначения rad

(рад) и sr (ср) записываются при необходимости, чтобы подчеркнуть, что в случае с радианами и стерадианами рассматриваемая величина является или включает в себя соответственно плоский или телесный угол. Для стерадианов, например, это подчеркивает различие между единицами потока и интенсивности в радиометрии и фотометрии. Однако в математике и в других областях науки издавна практикуется отношения рад = 1 и ср = 1. В силу исторических причин радиан и стерадиан рассматриваются как производные единицы, как описано в разделе 2.3.4.

Особенно важно иметь четкое описание любой величины с единицей измерения «один» (см. раздел 5.4.7), которая выражается в виде отношения величин одного и того же вида (например, отношения длин или доли количества) или счета (например, количество фотонов или распадов).

2.3.4 Производные единицы

Производные единицы определяются как произведения степеней основных единиц. Если числовой коэффициент такого произведения равен единице, производные единицы называются *когерентными производными единицами*. Основные и когерентные производные единицы SI образуют когерентный набор, называемый *когерентными единицами SI*. В данном случае термин «когерентный» означает, что уравнения связи между числовыми значениями величин принимают такую же форму, как уравнения связи между самими величинами.

Некоторым когерентным производным единицам SI даны специальные названия. В Таблице 4 приведены 22 единицы SI со специальными названиями. Вместе с семью основными единицами (Таблица 2) они образуют основу набора единиц SI. Остальные единицы SI представляют собой комбинации некоторых из этих 29 единиц.

Важно отметить, что любая из семи основных единиц и 22 единиц SI со специальными названиями может быть выведена непосредственно из семи определяющих констант. Фактически, единицы семи определяющих констант включают в себя как основные, так и производные единицы.

ГКМВ приняла ряд приставок для использования при формировании десятичных кратных и дольных когерентных единиц SI (см. Главу 3). Они применимы для выражения значений величин, которые намного больше или намного меньше когерентной единицы. Однако, при использовании приставок с единицами SI, результирующие единицы уже не являются когерентными, так как приставка подразумевает числовой коэффициент, отличный от единицы. Приставки могут использоваться с любой из 29 единиц SI со специальными названиями, за исключением основной единицы килограмм, о чем подробнее говорится в Главе 3.

Таблица 4. 22 единицы SI со специальными названиями и обозначениями

Производная единица	Специальное название единицы	Единица в основных единицах[(a)]	Единица, выраженная через другие единицы SI
плоский угол	радиан[(b)]	рад = м/м	
телесный угол	стерадиан[(c)]	ср = $м^2/м^2$	
частота	герц[(d)]	Гц = $с^{-1}$	
сила	ньютон	Н = кг м $с^{-2}$	
давление, напряжение	паскаль	Па = кг $м^{-1}$ $с^{-2}$	
энергия, работа, количество теплоты	джоуль	Дж = кг $м^2$ $с^{-2}$	Н м
мощность, поток излучения	ватт	Вт = кг $м^2$ $с^{-3}$	Дж/с
электрический заряд	кулон	Кл = А с	

разность электрических потенциалов[e]	вольт*	В = кг м^2 с$^{-3}$А$^{-1}$	Вт/А
емкость	фарад	Ф = кг$^{-1}$ м$^{-2}$ с^4 А^2	Кл/В
электрическое сопротивление	ом	Ом = кг м^2 с$^{-3}$ А$^{-2}$	В/А
электрическая проводимость	сименс	См = кг$^{-1}$ м$^{-2}$ с^3 А^2	А/В
магнитный поток	вебер	Вб = кг м^2 с$^{-2}$ А$^{-1}$	В с
магнитная индукция	тесла	Тл = кг с$^{-2}$ А$^{-1}$	Вб/м^2
индуктивность	генри	Гн = кг м^2 с$^{-2}$ А$^{-2}$	Вб/А
температура Цельсия	градус Цельсия[f]	°С = К	
световой поток	люмен	лм = кд ср[g]	кд ср
освещенность	люкс	лк = кд ср м$^{-2}$	лм/м^2
активность радионуклида[d, h]	беккерель	Бк = с$^{-1}$	
поглощенная доза, керма	грэй	Гр = м^2 с$^{-2}$	Дж/кг
эквивалентная доза	зиверт[i]	Зв = м^2 с$^{-2}$	Дж/кг
каталитическая активность	катал	кат = моль с$^{-1}$	

* В вольтах измеряется также электродвижущая сила (ЭДС) – electromotive force, EMF (Прим. ред.)

(*a*) Порядок обозначений для основных единиц в данной Таблице отличается от порядка в 8-м издании на основании решения 21-го заседания CCU (2013 г.) вернуться к первоначальному порядку, приведенному в Резолюции 12 11-го заседания ГКМВ (1960 г.), в которой ньютон записывался как кг м с$^{-2}$, а джоуль как кг м^2 с$^{-2}$, а Дж с как кг м$^{-2}$ с $^{-1}$. Намерение состояло в том, чтобы отразить физику соответствующих уравнений величин, хотя для некоторых более сложных производных единиц это может быть невозможно.

(*b*) Радиан является когерентной единицей плоского угла. Один радиан – это угол, стягиваемый в центре окружности дугой, длина которой равна её радиусу. Это также - единица измерения фазового угла. Для периодических явлений фазовый угол увеличивается на 2π рад за один период. Радиан раньше считался дополнительной единицей SI, но эта категория была отменена в 1995 г.

(*c*) Стерадиан является когерентной единицей телесного угла. Один стерадиан – это телесный угол с вершиной в центре сферы, стягиваемый областью сферической поверхности, площадь которой равна квадрату радиуса. Как и радиан, стерадиан ранее считался дополнительной единицей SI.

(*d*) Герц должен использоваться только для периодических явлений, а беккерель – только для вероятностных процессов, относящихся к активности радионуклида.

(*e*) Разность электрических потенциалов во многих странах также называется «voltage» (напряжение), а в некоторых странах – «electric tension, электрическое напряжение» или просто «tension».

(*f*) Градус Цельсия используется для выражения температуры Цельсия. Числовое значение разницы температур или температурного интервала, выражаемое в градусах Цельсия или Кельвина, одинаково.

(*g*) В фотометрии название «стерадиан» и его обозначение «ср» в выражениях для единиц обычно сохраняются.

(*h*) Активность радионуклида иногда называют радиоактивностью, что неверно.

(*i*) См. Рекомендацию 2 МКМВ об использовании зиверта (PV, 2002, 70, 205).

Семь основных единиц и 22 единицы со специальными названиями и обозначениями могут использоваться в комбинациях для выражения единиц других производных величин. Поскольку количество величин безгранично, не представляется возможным предоставить полный список производных величин и единиц. В Таблице 5 приведены некоторые примеры производных величин и соответствующих когерентных производных единиц, выраженных через основные единицы. Кроме этого, в Таблице 6 даны примеры когерентных производных единиц, названия и обозначения которых включают в себя производные единицы. Полный набор единиц SI включает в себя как когерентный набор, так и кратные и дольные единицы, сформированные с использованием приставок SI.

Таблица 5. Примеры когерентных производных единиц SI, выраженных через основные единицы

Производная величина	Типичное обозначение величины	Производная единица в основных единицах SI
площадь	A	$м^2$
объем	V	$м^3$
скорость	v	$м\ с^{-1}$
ускорение	a	$м\ с^{-2}$
волновое число	σ	$м^{-1}$
плотность, массовая плотность	ρ	$кг\ м^{-3}$
поверхностная плотность	ρ_A	$кг\ м^{-2}$
удельный объем	υ	$м^3\ кг^{-1}$
плотность электрического тока	j	$А\ м^{-2}$
напряженность магнитного поля	H	$А\ м^{-1}$
концентрация количества вещества	c	$моль\ м^{-3}$
массовая концентрация	ρ, γ	$кг\ м^{-3}$
освещенность	L_V	$кд\ м^{-2}$

Таблица 6. Примеры когерентных производных единиц SI, названия и обозначения которых включают в себя производные единицы со специальными названиями и обозначениями

Производная величина	Название когерентной производной единицы	Обозначение	Производная единица в основных единицах SI
динамическая вязкость	паскаль-секунда	Па с	$кг\ м^{-1}\ с^{-1}$
момент силы	ньютон-метр	Н м	$кг\ м^2\ с^{-2}$
поверхностное натяжение	ньютон на метр	$Н\ м^{-1}$	$кг\ с^{-2}$
угловая скорость	радиан в секунду	$рад\ с^{-1}$	$с^{-1}$
угловое ускорение	радиан в секунду в квадрате	$рад/с^2$	$с^{-2}$
поверхностная плотность теплового потока	ватт на метр в квадрате	$Вт/м^2$	$кг\ с^{-3}$
теплоемкость, энтропия	джоуль на кельвин	$Дж\ К^{-1}$	$кг\ м^2\ с^{-2}\ К^{-1}$
удельная теплоемкость, удельная энтропия	джоуль на килограмм-кельвин	$Дж\ К^{-1}\ кг^{-1}$	$м^2\ с^{-2}\ К^{-1}$
удельная энергия	джоуль на килограмм	$Дж\ кг^{-1}$	$м^2\ с^{-2}$
теплопроводность	ватт на метр-кельвин	$Вт\ м^{-1}\ К^{-1}$	$кг\ м\ с^{-3}\ К^{-1}$
плотность энергии	джоуль на метр кубический	$Дж\ м^{-3}$	$кг\ м^{-1}\ с^{-2}$
напряженность электрического поля	вольт на метр	$В\ м^{-1}$	$кг\ м\ с^{-3}\ А^{-1}$
плотность электрического заряда	кулон на метр кубический	$Кл\ м^{-3}$	$А\ с\ м^{-3}$
поверхностная плотность заряда,	кулон на метр в квадрате	$Кл\ м^{-2}$	$А\ с\ м^{-2}$
плотность потока электрического заряда	кулон на метр в квадрате	$Кл\ м^{-2}$	$А\ с\ м^{-2}$
электрическое смещение			
диэлектрическая проницаемость	фарад на метр	$Ф\ м^{-1}$	$кг^{-1}\ м^{-3}\ с^4\ А^2$
магнитная проницаемость	генри на метр	$Гн\ м^{-1}$	$кг\ м\ с^{-2}\ А^{-2}$
молярная энергия	джоуль на моль	$Дж\ моль^{-1}$	$кг\ м^2\ с^{-2}\ моль^{-1}$

молярная энтропия, молярная теплоемкость	джоуль на моль-кельвин	Дж $К^{-1}$ $моль^{-1}$	кг $м^2$ $с^{-2}$ $моль^{-1}$ $К^{-1}$
экспозиционная доза (рентгеновского и гамма-излучения)	кулон на килограмм	Кл $кг^{-1}$	А с $кг^{-1}$
мощность поглощенной дозы	грей в секунду	Гр $с^{-1}$	$м^2$ $с^{-3}$
сила излучения	ватт на стерадиан	Вт $ср^{-1}$	кг $м^2$ $с^{-3}$
энергетическая яркость	ватт на стерадиан-метр в квадрате	Вт $ср^{-1}$ $м^{-2}$	кг $с^{-3}$
концентрация каталитической активности	ката на метр кубический	кат $м^{-3}$	моль $с^{-1}$ $м^{-3}$

Важно подчеркнуть, что каждая физическая величина имеет только одну когерентную единицу SI, даже если эта единица может быть выражена в различном виде с помощью нескольких специальных названий и обозначений.

Обратное, однако, неверно, так как в целом несколько разных величин могут иметь одну и ту же единицу SI. Например, для величин теплоемкости и энтропии используется единица SI джоуль на кельвин. Аналогично, для основной величины электрического тока, так же как и для производной величины магнитодвижущей силы, единицей SI является ампер. Поэтому важно не использовать только единицу для описания величины. Это относится не только к техническим текстам, но и, например, к средствам измерения (т.е. показания прибора должны указывать как единицу, так и измеряемую величину).

На практике, в случае некоторых величин предпочтение отдается использованию определенных специальных названий единиц, чтобы обеспечить различие между разными величинами с одной и той же размерностью. Пользуясь этим допущением, можно вспомнить процесс определения такой величины. Например, величина крутящего момента представляет собой векторное произведение радиус-вектора положения и вектора силы. Единица SI при этом – ньютон-метр. Несмотря на то, что крутящий момент имеет ту же размерность, что и энергия (единица SI – джоуль), джоуль никогда не используется для выражения крутящего момента.

Международная электротехническая комиссия (IEC) ввела специальное название для единицы реактивной мощности – вар (var). С точки зрения когерентных единиц SI, вар идентичен вольт-амперу.

Единица SI для частоты – это герц, единица SI для угловой скорости и угловой частоты – это радиан в секунду, а единица SI для активности – это беккерель, то есть отсчет в секунду. И хотя формально правильно записывать все три как обратную секунду, использование разных названий подчеркивает различную природу этих величин. Особенно важно проводить четкое различие между частотами и угловыми частотами, поскольку их числовые значения по определению отличаются в 2π раз[1]. Пренебрежение этим фактом может привести к погрешности в 2π. Обратите внимание, что в некоторых странах значения частоты принято выражать в «цикл/с» или «cps» вместо единицы измерения Гц, а «цикл» и «cps» не являются единицами измерения SI. Также отметим, что принято использовать термин «частота» для величин, выраженных в рад/с, хотя это и не рекомендуется. Напротив, рекомендуется, чтобы величины, называемые «частота», «угловая частота» и «угловая скорость», всегда задавались в единицах Гц или рад/с, а не $с^{-1}$.

В области измерений ионизирующих излучений вместо обратной секунды используется единица SI беккерель. Для поглощенной дозы и эквивалентной дозы вместо джоуля и килограмма применяются единицы SI грэй и зиверт. Названия «беккерель», «грэй» и «зиверт» были введены специально из-за опасности для здоровья человека, которая может возникнуть при использовании обратной секунды и джоуля на килограмм при неверном выборе этих единиц для трактовки различных привлеченных величин.

[1] см. ISO 80000-3

Особую осторожность следует проявлять при выражении температур или разности температур. Разность температур в 1 К равна разнице температур в 1 °C, но в случае абсолютных температур необходимо учитывать разницу в 273,15 К. Единица градус Цельсия когерентна только при выражении разности температур.

2.3.5 Единицы величин, описывающих биологические и физиологические явления

Четыре единицы SI в Таблицах 2 и 4, содержат физиологические весовые коэффициенты: кандела, люмен, люкс и зиверт.

Люмен и люкс выводятся из основной единицы канделы. Как и кандела, они несут в себе информацию о человеческом зрении. Кандела была принята в качестве основной единицы в 1954 г. как признание важности света в повседневной жизни. Более подробную информацию о единицах и условных обозначениях, используемых для определения фотохимических и фотобиологических величин, можно найти в Приложении 3.

Ионизирующее излучение передает энергию облучаемому веществу. Отношение переданной энергии к массе называется поглощенной дозой D. По решению МКМВ в 2002 г. величина эквивалентной дозы $H = Q\ D$ представляет собой произведение поглощенной дозы D и числового коэффициента Q, который учитывает биологическую эффективность излучения и зависит от энергии и типа излучения.

Существуют единицы величин, не относящиеся к SI, которые описывают биологические явления и включают в себя весовые коэффициенты. Здесь приведены два примера:

Звук вызывает колебания давления в воздухе, накладываемые на нормальное атмосферное давление, которые воспринимаются человеческим ухом. Чувствительность уха зависит от частоты звука, но это не простая функция изменения давления или частоты. Поэтому в акустике, чтобы примерно рассчитать способ восприятия звука, используются величины частотной коррекции. Например, они используются для измерений в области защиты органов слуха. Влияние ультразвуковых акустических волн ставит аналогичные измерительные задачи перед медицинской диагностикой и терапией.

В области медицинской диагностики и терапии для количественной оценки биологической активности определенных веществ также используется класс единиц, которые пока еще не могут быть выражены в единицах SI. Это объясняется тем, что механизм специфического биологического действия этих веществ еще недостаточно изучен, чтобы его можно было измерить с точки зрения физико-химических параметров. Ввиду их важности для охраны здоровья и безопасности, Всемирная организация здравоохранения – ВОЗ (WHO) взяла на себя ответственность по определению Международных единиц ВОЗ - WHO IU - для биологической активности таких веществ.

2.3.6 Единицы SI в рамках общей теории относительности

Практическая реализация единицы и процесс сличения требует наличия системы уравнений в рамках теоретического описания. В некоторых случаях эти уравнения учитывают релятивистские эффекты.

Для эталонов частоты возможно проводить сличения на расстоянии с помощью электромагнитных сигналов. Для интерпретации результатов требуется привлекать общую теорию относительности, так как она учитывает, среди прочего, относительное смещение частоты между эталонами, составляющее примерно 1×10^{-16} на метр разности высот на поверхности земли. При сличении лучших эталонов частоты влияние такого масштаба должно быть скорректировано.

При сравнениях практических реализаций локально, то есть в небольшой области пространства-времени, влияниями искривления пространства-времени, описанными с помощью общей теорией относительности, можно пренебречь. Если реализации имеют одни и те же пространственно-временные координаты (например, движение и ускорение или гравитационное поле), релятивистскими эффектами можно пренебречь полностью.

3 Приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц SI

Для использования с единицами SI установлены приставки десятичных кратных и дольных единиц в диапазоне от 10^{24} до 10^{-24}. В Таблице 7 представлены названия и обозначения для этих кратных и дольных приставок.

Приставки печатаются прямым шрифтом, как и обозначения единиц, вне зависимости от шрифта, используемого в остальном тексте, без пробела между ними и символом для единицы. Все кратные приставки пишутся с большой буквы, а дольные – с маленькой, за исключением da (дека), h (гекто) и k (кило). Названия всех приставок печатаются строчными буква, кроме тех, что стоят в начале предложения.

Приставки SI относятся только к степеням 10. Их нельзя использовать для обозначения степеней 2 (например, один килобит представляет собой 1000 бит, а не 1024). Для степеней 2 рекомендуются к использованию следующие названия и обозначения приставок:

киби	Ki (Ки)	2^{10}
меби	Mi (Ми)	2^{20}
гиби	Gi (Ги)	2^{30}
теби	Ti (Ти)	2^{40}
пеби	Pi (Пи)	2^{50}
эксби	Ei (Эи)	2^{60}
зеби	Zi (Зи)	2^{70}
йоби	Yi (Йи)	2^{80}

Таблица 7. Приставки SI

Степень	Название	Обозначение		Степень	Название	Обозначение	
		междунар.	русское			междунар.	русское
10^{1}	дека	da	да	10^{-1}	деци	d	д
10^{2}	гекто	h	г	10^{-2}	санти	c	с
10^{3}	кило	k	к	10^{-3}	милли	m	м
10^{6}	мега	M	М	10^{-6}	микро	µ	мк
10^{9}	гига	G	Г	10^{-9}	нано	n	н
10^{12}	тера	T	Т	10^{-12}	пико	p	п
10^{15}	пета	P	П	10^{-15}	фемто	f	ф
10^{18}	экса	E	Э	10^{-18}	атто	a	а
10^{21}	зетта	Z	З	10^{-21}	зепто	z	з
10^{24}	иотта	Y	И	10^{-24}	иокто	y	и

Совокупность символов, образованная приставкой и обозначением единицы, представляет собой новое неделимое обозначение единицы (кратная или дольная единица), которое может быть возведено в положительную или отрицательную степень или объединено с другими обозначениями единиц, чтобы сформировать составные обозначения единиц.

Примеры: пм (пикометр), ммоль (миллимоль), ГОм (гигаом), ТГц (терагерц)

$2{,}3\ см^3 = 2{,}3\ (см)^3 = 2{,}3\ (10^{-2}\ м)^3 = 2{,}3 \times 10^{-6}\ м^3$

$1\ см^{-1} = 1\ (см)^{-1} = 1(10^{-2}\ м)^{-1} = 10^{2}\ м^{-1} = 100\ м^{-1}$

Таким же образом, названия приставок неотделимы от названий единиц, к которым они прикреплены. Так, например, миллиметр, микропаскаль и меганьютон – это все отдельные слова.

Составные обозначения для приставок, то есть образованные наложением двух или более обозначений для приставок, не допускаются. Это правило также применяется к двум или нескольким составным названиям приставок.

Обозначения для приставок не могут ни записываться отдельно, ни присоединяться к цифре 1, обозначению единицы «один». Точно так же названия приставок не могут присоединяться к названию единицы один, то есть к слову «один».

Килограмм – это единственная когерентная единица SI, чье название и обозначение по историческим причинам включает в себя приставку. Названия и обозначения для кратных и дольных единиц массы образуются путем присоединения названия и обозначения приставки к названию единицы «грамм» и обозначению единицы «г» соответственно. Например, 10^{-6} кг записывается как миллиграмм, мг, а не микрокилограмм, мккг.

4 Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами SI

SI представляет собой согласованную на международном уровне референтную систему, в терминах которой выражаются все другие единицы. Важным преимуществом когерентных единиц SI является то, что при подстановке конкретных величин в уравнения для величин, переводные множители для единиц не требуются.

Тем не менее, общепризнанным остается тот факт, что некоторые единицы, не входящие в SI, до сих пор широко используются и будут использоваться на протяжении многих лет. Вследствие этого, МКМВ утвердил некоторые внесистемные единицы SI - они перечислены в Таблице 8. Следует понимать, что при использовании этих единиц некоторые преимущества SI утрачиваются. С некоторыми из внесистемных единиц можно использовать приставки SI, но, например, не с внесистемными единицами времени.

Таблица 8. Внесистемные единицы SI, разрешенные к использованию с SI

Величина	Название единицы	Обозначение	Значение в единицах SI
время	минута	мин	1 мин = 60 с
	час	ч	1 ч = 60 мин = 3600 с
	день	д	1 д = 24 ч = 86400 с
длина	астрономическая единица[(a)]	а.е.	1 а.е. = 149 597 870 700 м
плоский и фазовый угол	градус	°	1° = (π/180) рад
	минута	'	1' = (1/60)° = (π/108000) рад
	секунда[(b)]	"	1″ = (1/60)′ = (π/ 648 000) рад
площадь	гектар[(c)]	га	1 га = 1 гм^2 = 10^4 м^2
объем	литр[(d)]	л, Л	1 л = 1 Л = 1 дм^3 = 10^3 см^3 = 10^{-3} м^3
масса	тонна[(e)]	т	1 т = 10^3 кг
	дальтон[(f)]	Да	1 Да = 1,660539040 (20) × 10^{-27} кг
энергия	электрон-вольт[(g)]	эВ	1 эВ = 1,602176634 × 10^{-19} Дж
величины логарифмического соотношения	непер[(h)]	Нп	см. по тексту
	бел[(h)]	Б	
	децибел[(h)]	дБ	

Гал (обозначается Гал, Gal) – это единица ускорения, не принадлежащая SI, используемая в геодезии и геофизике для выражения ускорения под действием силы тяжести.
Гал = 1 см с$^{-2}$ = 10^{-2} м с$^{-2}$

(*a*) По решению XXVIII Генеральной ассамблеи Международного астрономического союза (Резолюция B2, 2012 г.)

(*b*) Для некоторых применений, например, в астрономии, малые углы измеряются в угловых секундах (т.е. в секундах плоского угла), обозначаемых как ″, миллиарксекундах, микроарксекундах и пикоарксекундах, обозначаемых, соответственно, как mas, μas и pas, где угловая секунда (arcsecond) является альтернативным названием для секунды плоского угла.

(*c*) Единица «гектар» и ее обозначение, га, были приняты МКМВ в 1879 г. (PV, 1879, 41). Гектар используется для выражения площади земельного участка.

(*d*) Литр и его обозначение, строчная «л», были приняты МКМВ в 1879 г. (PV, 1879, 41). Альтернативное обозначение, заглавная «Л», было принято на 16-м заседании ГКМВ (1979, Резолюция 6; CR, 101 и журнал *Metrologia*, 1980, **16**, 56-57), чтобы избежать путаницы между латинской буквой «l» и цифрой 1.

(*e*) Тонна и ее обозначение, т, были приняты МКМВ в 1879 г. (PV, 1879, 41). В некоторых англоязычных странах эту единицу иногда называют «метрическая тонна».

(*f*) Дальтон (Да, Da) и атомная единица массы (u) являются альтернативными названиями (и обозначениями) для одной и той же единицы, равной 1/12 массы свободного атома углерода-12 в покое и в его основном состоянии. Это значение дальтона рекомендовано в поправке в CODATA 2014. Оно будет обновлено в новом согласовании данных CODATA 2018 г., чтобы учесть значение постоянной Планка 2017 г. *h,* ныне зафиксированное как точное. Это на порядок уменьшит неопределенность 2014 г.

(*g*) Электрон-вольт – это кинетическая энергия, полученная электроном при прохождении через разницу потенциалов в 1 вольт в вакууме. Электро-вольт часто сочетают с приставками SI.

(*h*) При использовании этих единиц важно указывать характер величины и указывать любое используемое опорное значение.

В Таблице 8 также представлены единицы величин логарифмических соотношений, непер, бел и децибел. Они используются для передачи информации о характере логарифмического соотношения рассматриваемой величины. Непер, Нп, используется для выражения значений величин, чьи числовые значения основаны на использовании неперианского (натурального) логарифма, $\ln = \log_e$. Бел и децибел, Б и дБ, где 1 дБ = (1/10) Б, используются для выражения значений величин логарифмического отношения, числовые значения которых основаны на десятичном логарифме, $\lg = \log_{10}$. Выражение $L_X = m$ дБ = (m/10) Б (где m – это число) толкуется как означающее $m = 10 \lg(X/X_0)$. Единицы непер, бел и децибел были приняты МКМВ для использования совместно с Международной системой единиц, но сами единицами SI не являются.

Существует еще много единиц, не относящихся к SI, которые либо представляют исторический интерес, либо до сих пор используются в определенных областях измерения (например, баррель нефти) или в определенных странах (дюйм, фут и ярд). МКМВ не видит причин для продолжения использования этих единиц в современной научно-технической деятельности. Тем не менее, очевидно, что важно иметь возможность помнить отношение этих единиц к соответствующим единицам SI, и это будет иметь место на протяжении еще многих лет.

5 Написание обозначений и названий единиц и выражение значений величин

5.1 Использование обозначений и названий единиц

Основные принципы написания обозначений единиц и чисел были разработаны 9-й ГКМВ (1948 г., Резолюция 7). Впоследствии они дорабатывались ISO, IEC и другими международными организациями, поэтому в настоящее время существуют общие правила для написания и использования названий и обозначений единиц, названий и обозначений приставок, а также обозначений величин. Также имеются правила для выражения значений величин. Соблюдение этих правил и стилистики, наиболее важные из которых представлены в данной главе, повышает удобочитаемость научных и технических текстов.

5.2 Обозначения единиц

Обозначения единиц печатаются прямым шрифтом, вне зависимости от шрифта, используемого в остальном тесте. Они печатаются строчными буквами, за исключением обозначений единиц, полученных из имен собственных, которые печатаются с заглавной буквы.

Как исключение, принятое 16-й ГКМВ (1979 г., Резолюция 6), в международных документах литр может обозначаться как строчной буквой l (л), так и заглавной буквой L во избежание возможной путаницы с числом 1 (один).

При использовании кратных и дольных приставок, они являются частью единицы и записываются с ней слитно. Приставка никогда не используется отдельно, а составные приставки не используется вообще.

Обозначения единиц представляют собой математические объекты, а не аббревиатуры. Следовательно, точка после них не ставится, кроме случаев, когда обозначение стоит в конце предложения. У обозначений нет множественного числа, и нельзя использовать обозначения единиц и названия единиц в одном выражении, так как названия единиц не являются математическими объектами.

При перемножении и делении символов единиц к ним применяются обычные правила алгебраического умножения и деления. Умножение обозначается либо пробелом, либо интерпунктом (точка по центру высоты строки), поскольку в противном случае некоторые приставки могут быть приняты за обозначения единиц. Деление обозначается горизонтальной линией, косой чертой (/) или отрицательной степенью. При использовании нескольких обозначений единиц, во избежание двусмысленности, следует соблюдать осторожность и использовать, например, скобки и отрицательные степени. В выражениях без скобок косую черту нельзя использовать более одного раза.

Недопустимо использовать сокращения для обозначений и названий единиц, такие как сек (как для «с», так и для «секунда»), кв. мм (как для мм^2, так и для «миллиметр в квадрате»), куб. см (как для см^3, так и для «кубический сантиметр») или mps (как для м/с, так и для «метр в секунду»). Использование правильных обозначений для единиц SI обязательно в частности, и для всех единиц в целом, как было указано в предыдущих главах этой Брошюры. Таким образом, можно будет избежать двусмысленности и путаницы в значениях величин.

5.3 Названия единиц

Названия единиц обычно печатаются прямым шрифтом и рассматриваются как обычные существительные. В английском* языке названия единиц начинаются со строчной буквы (даже если обозначение единицы пишется с заглавной), кроме названий единиц, стоящих в начале предложения, или, когда используются только заглавные буквы, например, в заголовках. Согласно этому правилу, название единицы, обозначаемой °C, записывается как «градус Цельсия» (единица «градус» начинается со строчной буквы, а модификатор «Цельсий» начинается с заглавной, так как это имя собственное).

Несмотря на то, что значения величин обычно выражаются с помощью обозначений чисел и единиц, если по какой-либо причине вместо обозначения единицы удобнее использовать ее название, то название единицы можно привести целиком.

Если название единицы используется вместе с кратной или дольной приставкой, то между названием приставки и названием единицы ни пробел, ни дефис не ставится. Название приставки и название единицы пишутся слитно (см. Главу 3).

При образовании названия производной единицы с помощью совмещения названий отдельных единиц, для разделения имен отдельных единиц используется пробел или дефис.

5.4 Правила и стилистика выражения значений величин

5.4.1 Значение и числовое значение величины; операции над величинами

Величины обычно обозначаются одной буквой, напечатанной курсивом, а дополнительная информация указывается верхним или нижним индексом или в скобках. Например, C – рекомендованное обозначение для теплоемкости, C_{m} – для молярной теплоемкости, $C_{\mathrm{m},p}$ – для молярной теплоемкости при постоянном давлении, и $C_{\mathrm{m},V}$ - для молярной теплоемкости при постоянном объеме.

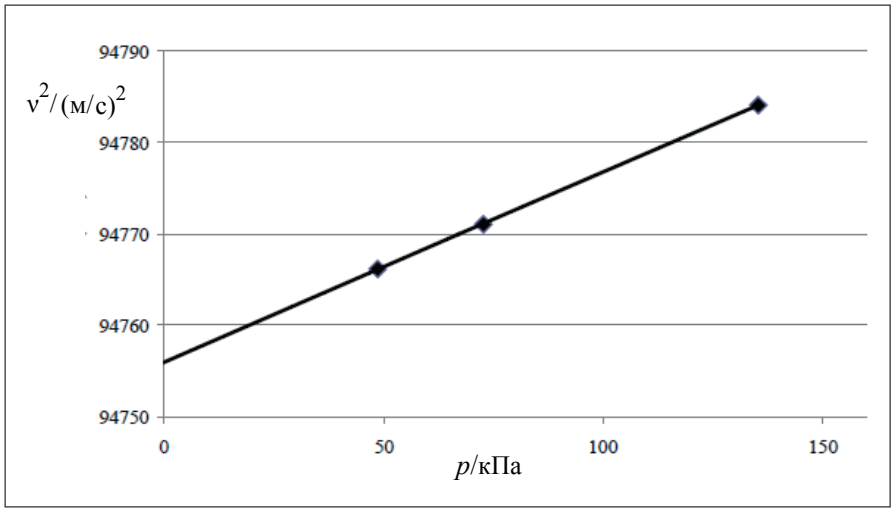
Рекомендованные названия и обозначения для величин перечислены во многих справочных материалах, таких как стандарты серии ISO/IEC 80000 «Величины и единицы» (*Quantities and units*), Красная книга IUPAP SUNAMCO «Обозначения, единицы и номенклатура в физике» (IUPAP SUNAMCO Red Book *Symbols, Units and Nomenclature in Physics*) и Зеленая книга IUPAC «Величины, единицы и обозначения в физико-химии» (IUPAC Green Book *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry*). Однако обозначения для величин носят рекомендательный характер (в отличие от обозначений единиц, для которых правильное использование обязательно). В некоторых случаях для обозначения величины авторы могут предпочесть использовать символ по своему выбору, например, во избежание путаницы при использовании одного и того же обозначения для двух разных величин. В таких случаях обозначения необходимо четко объяснить. Тем не менее, ни название величины, ни используемое для нее обозначение, не подразумевает выбор какой-либо определенный единицы.

Обозначения единиц рассматриваются как математические объекты. При выражении значения величины как произведения числового значения и единицы, как с числовым значением, так и с единицей можно оперировать по обычным правилам алгебры. Эта процедура рассматривается как счисление величин или алгебра величин. Например, уравнение p = 48 кПа может в равной степени быть записано как p/кПа = 48. Обычно в таком виде соотношения записываются в заголовках таблиц, чтобы сама таблица содержала только числа. Например, таблица квадрата скорости в зависимости от давления может быть представлена следующим образом:

* и русском *(прим. переводчика)*

p/кПа	v^2/(м/с)^2
48,73	94766
72,87	94771
135,42	94784

Аналогичным образом могут обозначаться оси графика, чтобы точки на нем отмечались только числами, как на примере ниже.



5.4.2 Обозначение величин и обозначение единиц

Обозначения единиц не должны нести в себе конкретной информации о величине и не должны быть единственным источником информации о величине. Единицы никогда не снабжаются дополнительной информацией о природе величины; любая дополнительная информация о природе величины должна быть присвоена обозначению величины, а не обозначению единицы.

Например: максимальная разность электрических потенциалов U_{max} = 1000 В но не U = 1000 $В_{max}$. Массовая доля меди в образце кремния w(Cu) = 1,3 × 10^{-6}, но не 1,3 × 10^{-6} w/w.

5.4.3 Способ представления значения величины

Числовое значение всегда записывается перед единицей через пробел. Таким образом, величина является произведением числа и единицы. Пробел между числом и единицей рассматривается как знак умножения (так же, как пробел между единицами подразумевает умножение). Единственными исключениями из этого правила являются обозначения градуса, минуты и секунды для плоского угла, °, ′, и ″, соответственно, которые от численного значения величины пробелом не отделяются.

m = 12,3 г, где m используется для обозначения величины массы, а φ = 30° 22′ 8″, где φ используется для обозначения величины плоского угла.

Это правило означает, что, при записи значения температуры Цельсия t, перед обозначением °C для градуса Цельсия ставится пробел.

t = 30,2 °C, но не t = 30,2 °C и не t = 30,2° C

Даже если значение величины используется как прилагательное, между числовым значением и обозначением единицы ставится пробел. Обычные правила грамматики применяются только когда название единицы записывается прописью, поэтому в английском* языке между числом и единицей ставится дефис.

резистор 10 кОм
35-миллиметровая пленка

В любом выражении используется только одна единица. Исключением из этого правила является выражение значений времени и плоских углов с использованием внесистемных единиц SI. Для плоского угла предпочтительна запись в десятичной форме, поэтому принято писать 22,20°, а не 22° 12′, за исключением таких областей, как навигация, картография, астрономия и измерение очень малых углов.

l = 10,234 м, но не l = 10 м 23,4 см

* и русском *(прим. переводчика)*

5.4.4 Способы записи чисел и десятичного разделителя

Знак, используемый для разделения целой части числа и его десятичной части, называется десятичным разделителем. По решению 22-го заседания ГКМВ (2003 г., Резолюция 10) десятичный знак «должен быть либо точкой, либо запятой». Знак выбирается в соответствии с языком контекста.

Если число находится в интервале между -1 и +1, то перед десятичным разделителем всегда ставится ноль.

-0,234, но не -,234

По решению 9-й ГКМВ (1948 г., Резолюция 7) и 22-й ГКМВ (2003 г., Резолюция 10), если число содержит много знаков, они могут быть разделены пробелами в группы по три для облегчения чтения. Между группами по три знака нельзя ставить ни точки, ни запятые. Однако, если до или после десятичного разделителя стоит всего 4 цифры, разделять их не принято. Группировка знаков подобным образом является вопросом выбора, и не всегда применятся даже в специализированных приложениях, таких как технические чертежи, финансовые отчеты и программы, выполняемые компьютером.

43 279,168 29
но не 43.279.168.29

либо 3279,1683
либо 3 279,168 3

При записи чисел в таблицу, формат в столбце меняться не должен.

5.4.5 Выражение неопределенности измерения значения величины

Неопределенность, связанная с оцениваемым значением величины, должна вычисляться и выражаться в соответствии с документом JCGM 100:2008 (GUM 1995 с незначительными исправлениями) «Оценка измерительных данных – Руководство по выражению неопределенности измерений» (*Evaluation of measurement data - Guide to expression of uncertainty in measurement)*. Стандартная неопределенность, связанная с величиной x, обозначается как $u(x)$. Удобный способ представления стандартной неопределенности приведен в следующем примере:

$$m_{\mathrm{n}} = 1{,}674\ 927\ 471\ (21) \times 10^{-27}\ \text{кг},$$

где m_{n} – обозначение величины (в данном случае – масса нейтрона), а число в скобках – это числовое значение стандартной неопределенности оцениваемой величины m_{n}, относящееся к последним цифрам указанного значения; в данном случае $u(m_{\mathrm{n}}) = 0{,}000\ 000\ 21 \times 10^{-27}$ кг. Если вместо стандартной неопределенности $u(x)$ используется расширенная неопределенность $U(x)$, то необходимо указать охват вероятности p и коэффициент охвата k.

5.4.6 Умножение и деление обозначений величин, значений величин или чисел

При умножении или делении символов величин, может использоваться любой из следующих методов:

$$ab,\ a\ b,\ a \cdot b,\ a \times b,\ a/b,\ \frac{a}{b},\ a\ b^{-1}.$$

При умножении значений величин используется либо знак умножения ×, либо скобки; использование точки недопустимо. При умножении чисел следует использовать только знак умножения.

При делении значений величин с помощью косой черты, во избежание двусмысленности используются скобки.

Примеры:

$F = ma$ для силы равно масса на ускорение

(53 м/с) × 10,2 с
или (53 м/с)(10,2 с)

25 × 60,5
но не 25 · 60,5

(20 м)/(5 с) = 4 м/с

(a/b)/c, но не a/b/c

5.4.7 Написание значений величин, выражаемых числами

Как обсуждалось в Разделе 2.3.3, значения величин с единицей «один» выражаются просто в виде чисел. Обозначение единицы 1 или название «один» не указываются. Поскольку приставки SI не могут быть привязанными ни к обозначению 1, ни к названию единицы «один», для записи очень больших или маленьких безразмерных величин используются степени 10.

m = 1,51,
но не n = 1.51 × 1,
где n – обозначение величины для показателя преломления.

Величины, которые являются отношениями величин одного и того же типа (например, отношения длин и доли количества вещества), могут выражаться в единицах (м/м, моль/моль), чтобы лучше понимать выражаемую величину и, при желании, чтобы сделать возможным использование приставок SI (мкм/м, нмоль/моль). Счетные величины так выражаться не могут, так как это просто числа.

Международно признанный знак % (процент) может использоваться в рамках SI. При использовании % между знаком и числом ставится пробел. Следует использовать знак %, а не его название «процент». В текстах знак % обычно подразумевает сотую часть. Не следует использовать такие выражения как «процент массы», «процент объема», или «процент количества вещества»; в названии или обозначении величины должна содержаться дополнительная информация о величине.

Также используется термин ppm (parts per million), означающий 10^{-6} соответствующего значения, или 1 на 10^{-6}, или миллионная часть. Это аналогично значению процента как сотой части. Кроме этого, используются термины parts per billion (миллиардная часть) и parts per trillion (триллионная часть) с соответствующими сокращениями ppb и ppt, значения которых зависят от языка. По этой причине сокращений ppb и ppt следует избегать.

В англоговорящих странах считается, что миллиард составляет 10^9, а триллион – 10^{12}; однако, иногда миллиард может интерпретироваться как 10^{12}, а триллион как 10^{18}. Сокращение ppt также иногда читается как тысячная часть (parts per thousand), усиливая путаницу.

5.4.8 Плоские углы, телесные углы и фазовые углы

Когерентная единица SI для плоского угла и фазового угла – это радиан, обозначается рад, а для телесного угла – стерадиан, обозначается ср.

При принятии SI в 1960 году 11-й ГКМВ, была создана категория «Дополнительные единицы», чтобы учесть радиан и стерадиан. Десятилетия спустя ГКМВ постановила «толковать дополнительные единицы SI, а именно радиан и стерадиан, как безразмерные производные единицы, названия и обозначения которых при необходимости могут, но не обязательно, использоваться в выражениях для других производных величин SI» и тем самым устранить класс дополнительных единиц (Резолюция 8 20-й ГКМВ (1995 г.).

Плоский угол, выраженный в радианах, между двумя прямыми, исходящими из общей точки, представляет собой длину дуги s, очерченной между прямыми радиус-вектором r, выходящим из общей точки, деленную на радиус-вектор, $\theta = s/r$ рад. Фазовый угол (часто называемый просто фазой) – это аргумент любого комплексного числа. Это угол между положительной действительной осью и радиусом полярного представления комплексного числа в плоскости комплексной переменной.

Один радиан соответствует углу, для которого $s = r$, таким образом, 1 рад = 1. Мера прямого угла в точности равна числу $\pi/2$.

Использование градуса является исторической традицией. Преобразование между радианами и градусами определяется соотношением 360° = 2π рад. Обратите внимание, что градус, обозначаемый как °, не есть единица SI.

Телесный угол, выраженный в стерадианах, соответствует отношению площади между площадью A поверхности сферы радиусом r и квадратом радиуса, $\Omega = A/r^2$ ср. Один стерадиан соответствует телесному углу, для которого $A = r^2$, следовательно, 1 ср = 1.

Единицы измерения рад и ср представляют собой отношение двух длин и двух квадратов длин, соответственно. Однако следует подчеркнуть, что рад и ср должны использоваться только для выражения углов и телесных углов, но не для выражения соотношений длин и квадратов длин в целом.

МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ (SI)

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Приложение 1. Решения ГКМВ и МКМВ

В данном Приложении представлены решения ГКМВ и МКМВ, которые имеют непосредственное отношение к определениям единиц SI, приставкам, используемым с единицами SI, и правилам записи обозначений единиц и чисел. Это неполный свод решений ГКМВ и МКМВ. Полное собрание отчётов и протоколов содержится в двух последовательно изданных сборниках – «Годовые отчёты Генеральной Конференции по мерам и весам» (*Comptes Rendus des Séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures* (CR) и «Протоколы Международного Комитета мер и весов» (*Procès-Verbaux des Séances du Comité International des Poids et Mesures* (PV) или более поздние решения можно найти в журнале *Metrologia*.

Поскольку SI не является статичной принятой системой единиц, а эволюционирует с развитием науки об измерениях, то некоторые решения были отменены или изменены, а другие решения были дополнены уточнениями. Решения, которые были подвергнуты таким изменениям, отмечены звездочкой (*) и имеют примечания со ссылкой на соответствующее решение об изменении.

Исходный текст каждого решения (или его перевод) напечатан другим шрифтом (без засечек) обычного размера, чтобы он отличался от основного текста. Звёздочки и примечания, которые не являются частью текста оригинала, добавлены МБМВ, чтобы сделать текст более понятным.

В данном Приложении решения ГКМВ и МКМВ перечислены в хронологическом порядке с 1889 по 2018 год с целью сохранить последовательность их принятия. Однако, чтобы упростить поиск определенных решений, относящихся к конкретным темам, ниже приводится содержание с указанием страниц с описанием конкретных заседаний, на которых были приняты эти решения.

Содержание Приложения 1

Решения, относящиеся к определению SI		**стр.**
9-я ГКМВ, 1948 г.:	решение о создании SI	**46**
10-я ГКМВ, 1954 г.:	решение о первых шести основных единицах	**48**
МКМВ 1956 г.:	решение о принятии названия «Международная система единиц» / “Système International d’Unités”	**49**
11-я ГКМВ, 1960 г.:	утверждает сокращение “SI”, названия приставок от тера до пико, утверждает дополнительные единицы рад и ср, создает перечень некоторых производных единиц	**50**
МКМВ, 1969 г.:	Декларация, касающаяся основных, дополнительных, производных и когерентных единиц, а также использование приставок	**55**
МКМВ, 2001 г.:	“SI units” и “units of the SI”	**65**
23-я ГКМВ, 2007 г.:	возможное переопределение некоторых основных единиц Международной системы единиц, SI	**73**
24-я ГКМВ, 2011 г.:	возможный будущий пересмотр Международной системы единиц, SI	**74**
25-я ГКМВ, 2014 г.:	будущий пересмотр Международной системы единиц, SI	**80**
26-я ГКМВ, 2018 г.:	пересмотр Международной системы единиц, SI (вступает в силу 20 мая 2019 г.)	**82**

Решения, относящиеся к базовым единицам SI

Длина

1-я ГКМВ, 1889 г.:	утверждение прототипа метра	**43**
7-я ГКМВ, 1927 г.:	определение и использование прототипа метра	**44**
10-я ГКМВ, 1954 г.:	метр принят в качестве основной единицы	**48**
11-я ГКМВ, 1960 г.:	переопределение метра как излучение криптона-86	**49**
15-я ГКМВ, 1975 г.:	рекомендует значение скорости света	**57**
17-я ГКМВ, 1983 г.:	переопределение метра через скорость света, реализация определения метра	**60**
МКМВ, 2002 г.:	определяет правила практической реализации определения метра	**66**
МКМВ, 2003 г.:	пересмотр перечня рекомендуемых излучений	**68**
МКМВ, 2005 г.:	пересмотр перечня рекомендуемых излучений	**70**
МКМВ, 2007 г.:	пересмотр перечня рекомендуемых излучений	**71**
23-я ГКМВ, 2007 г.:	пересмотр *mise en pratique* определения метра и разработка новых оптических эталонов частоты	**71**
МКМВ, 2009 г.:	обновления к перечню эталонных частот	**74**
24-я ГКМВ, 2011 г.:	возможный будущий пересмотр Международной системы единиц, SI	**74**

		стр.
24-я ГКМВ, 2011 г.:	пересмотр *mise en pratique* определения метра и разработка новых оптических эталонов частоты	**78**
МКМВ, 2013 г.:	обновление перечня эталонных частот	**78**
26-я ГКМВ, 2018 г.:	пересмотр Международной системы единиц, SI (вступает в силу 20 мая 2019 г.)	**82**

Масса

1-я ГКМВ, 1889 г.:	утверждение прототипа килограмма	**43**
3-я ГКМВ, 1901 г.:	декларация о различении массы и веса, а также об условном значении g_n	**44**
10-я ГКМВ, 1954 г.:	килограмм принят в качестве основной единицы	**48**
МКМВ, 1967 г.:	декларация о применении приставок к грамму	**53**
21-я ГКМВ, 1999 г.:	будущее переопределение килограмма	**64**
23-я ГКМВ, 2007 г.:	возможное переопределение некоторых основных единиц Международной системы единиц, SI	**73**
24-я ГКМВ, 2011 г.:	возможный будущий пересмотр Международной системы единиц, SI	**74**
25-я ГКМВ, 2014 г.:	будущий пересмотр Международной системы единиц, SI	**80**
26-я ГКМВ, 2018 г.:	пересмотр Международной системы единиц, SI (вступает в силу 20 мая 2019 г.)	**82**

Время

10-я ГКМВ, 1954 г.:	секунда принята в качестве основной единицы	**48**
МКМВ, 1956 г.:	определение секунды как части тропического года 1900	**48**
11-я ГКМВ, 1960 г.:	ратифицирует определение секунды, утвержденное МКМВ в 1956 г.	**49**
МКМВ, 1964 г.:	объявляет сверхтонкий переход цезия-133 рекомендуемым эталоном	**52**
12-я ГКМВ, 1964 г.:	уполномочивает МКМВ исследовать атомные и молекулярные эталоны частоты	**52**
13-я ГКМВ, 1967/68 г.:	определяет секунду через переход цезия	**53**
CCDS, 1970 г.:	определяет Международное атомное время, TAI	**54**
14-я ГКМВ, 1971 г.:	просит МКМВ определить и утвердить Международное атомное время, TAI	**56**
15-я ГКМВ, 1975 г.:	одобряет использование Всемирного скоординированного времени, UTC	**57**
МКМВ, 2006 г.:	вторичные воспроизведения секунды	**70**
23-я ГКМВ, 2007 г.:	пересмотр *mise en pratique* определения метра и разработка новых оптических эталонов частоты	**71**
МКМВ, 2009 г.:	Обновление перечня эталонных частот	**74**
24-я ГКМВ, 2011 г.:	возможный будущий пересмотр Международной системы единиц, SI	**74**
24-я ГКМВ, 2011 г.:	пересмотр *mise en pratique* определения метра и разработка новых оптических эталонов частоты	**78**
МКМВ, 2013 г.:	обновление перечня эталонных частот	**78**

МКМВ, 2015 г.:	обновление перечня эталонных частот	**81**
26-я ГКМВ, 2018 г.:	пересмотр Международной системы единиц, SI (вступает в силу 20 мая 2019 г.)	**82**

Электрические единицы

МКМВ, 1946 г.:	определения когерентных электрических единиц в системе метр-килограмм-секунда (МКС) (вступает в силу 1 января 1948 г.)	**45**
10-я ГКМВ, 1954 г.:	ампер принят в качестве основной единицы	**46**
14-я ГКМВ, 1971 г.:	принимает название сименс, S, для электрической проводимости	**56**
18-я ГКМВ, 1987 г.:	предстоящая корректировка воспроизведений вольта и ома	**61**
МКМВ, 1988 г.:	определено условное значение постоянной Джозефсона (вступает в силу 1 января 1990 г.)	**62**
МКМВ, 1988 г.:	определено условное значение постоянной фон Клитцинга (вступает в силу 1 января 1990 г.)	**62**
23-я ГКМВ, 2007 г.:	возможное переопределение некоторых основных единиц Международной системы единиц, SI	**73**
24-я ГКМВ, 2011 г.:	возможный будущий пересмотр Международной системы единиц, SI	**74**
25-я ГКМВ, 2014 г.:	будущий пересмотр Международной системы единиц, SI	**80**
26-я ГКМВ, 2018 г.:	пересмотр Международной системы единиц, SI (вступает в силу 20 мая 2019 г.)	**82**

Термодинамическая температура

9-я ГКМВ, 1948 г.:	принимает тройную точку воды в качестве опорной точки для термодинамической температуры, принимает значение для нуля Цельсия как 0.01 градуса ниже тройной точки	**45**
МКМВ, 1948 г.:	принимает название градус Цельсия для температурной шкалы Цельсия	**46**
10-я ГКМВ, 1954 г.:	определяет термодинамическую температуру таким образом, что тройная точка воды составляет 273,16 градусов Кельвина точно, определяет стандартную атмосферу	**47**
10-я ГКМВ, 1954 г.:	градус Кельвина принят в качестве основной единицы	**48**
13-я ГКМВ, 1967/68 г.:	принимает официальное определение Кельвина, K	**54**
МКМВ, 1989 г.:	Международная температурная шкала 1990 г., МТШ-90	**63**
МКМВ, 2005 г.:	примечание, добавленное к определению кельвина относительно изотопного состава воды	**69**
23-я ГКМВ, 2007 г.:	уточнение определения кельвина, единицы термодинамической температуры	**72**
23-я ГКМВ, 2007 г.:	возможное переопределение некоторых основных единиц Международной системы единиц, SI	**73**
24-я ГКМВ, 2011 г.:	возможный будущий пересмотр Международной системы единиц, SI	**74**

		стр.
25-я ГКМВ, 2014 г.:	будущий пересмотр Международной системы единиц, SI	**78**
26-я ГКМВ, 2018 г.:	пересмотр Международной системы единиц, SI (вступает в силу 20 мая 2019 г.)	**82**
Количество вещества		
14-я ГКМВ, 1971 г.:	определение моля, обозначение моль, в качестве седьмой основной единицы и правила его использования	**57**
21-я ГКМВ, 1999 г.:	принимает специальное название катал, кат	**65**
23-я ГКМВ, 2007 г.:	о возможном переопределении некоторых основных единиц Международной системы единиц, SI	
24-я ГКМВ, 2011 г.:	возможный будущий пересмотр Международной системы единиц, SI	**74**
25-я ГКМВ, 2014 г.:	будущий пересмотр Международной системы единиц, SI	**80**
26-я ГКМВ, 2018 г.:	пересмотр Международной системы единиц, SI (вступает в силу 20 мая 2019 г.)	**82**
Сила света		
МКМВ, 1946 г.:	определение фотометрических единиц, новая свеча и новый люмен (вступает в силу 1 января 1948 г.)	**44**
10-я ГКМВ, 1954 г.:	кандела принята в качестве основной единицы	**48**
13-я ГКМВ, 1967/68 г.:	определяет канделу, кд, через излучатель с характеристиками абсолютно «черного тела»	**54**
16-я ГКМВ, 1979 г.:	переопределяет канделу через монохроматическое излучение	**58**
24-я ГКМВ, 2011 г.:	возможный будущий пересмотр Международной системы единиц, SI	**74**
26-я ГКМВ, 2018 г.:	пересмотр Международной системы единиц, SI (вступает в силу 20 мая 2019 г.)	**82**
Решения, относящиеся к производным и дополнительным единицам SI		
Производные единицы SI		
12-я ГКМВ, 1964 г.:	принимает использование кюри в качестве внесистемной единицы SI	**53**
13-я ГКМВ, 1967/68 г.:	перечисляет примеры производных единиц	**55**
15-я ГКМВ, 1975 г.:	принимает специальные названия беккерель, Бк, и грэй, Гр	**57**
16-я ГКМВ, 1979 г.:	принимает специальное название зиверт, Зв	**59**
МКМВ, 1984 г.:	решает уточнить взаимосвязь между поглощенной дозой (единица SI грэй) и эквивалентной дозой (единица SI зиверт)	**61**
МКМВ, 2002 г.:	изменяет связь между поглощенной дозой и эквивалентной дозой	**67**
Дополнительные единицы		
МКМВ, 1980 г.:	решает толковать дополнительные единицы как безразмерные производные единицы	**59**
20-я ГКМВ, 1995 г.:	решает отменить класс дополнительных единиц и утверждает интерпретацию МКМВ, в рамках которой они	**64**

Решения, касающиеся терминологии и единиц, принятых для использования с SI		**стр.**
Приставки SI		
12-я ГКМВ, 1964 г.:	решает добавить фемто и атто к списку приставок	**53**
15-я ГКМВ, 1975 г.:	решает добавить пета и экса к списку приставок	**58**
19-я ГКМВ, 1991 г.:	решает добавить зетта, зепто, иотта и йокто к списку приставок	**64**
Обозначения единиц и числа		
9-я ГКМВ, 1948 г.:	утверждает правила для написания и печати обозначений единиц	**47**
Названия единиц		
13-я ГКМВ, 1967/68 г.:	отменяет использование микрона и новой канделы как единиц, принятых к использованию наравне с единицами SI	**55**
Знак десятичной дроби		
22-я ГКМВ, 2003 г.:	решает разрешить использование точки или запятой в качестве знака десятичной дроби	**68**
Единицы, принятые к использованию с SI: например, литр		
3-я ГКМВ, 1901 г.:	определяет литр как объем 1 кг воды	**43**
11-я ГКМВ, 1960 г.:	просит МКМВ сообщить о различиях между литром и кубическим дециметром	**51**
МКМВ, 1961 г.:	рекомендует выражать объем в единицах SI, а не в литрах	**52**
12-я ГКМВ, 1964 г.:	отменяет прежнее определение литра, рекомендует использовать литр в качестве специального названия для кубического дециметра	**52**
16-я ГКМВ, 1979 г.:	решает, в качестве исключения, разрешить как l, так и L в качестве обозначений литра	**59**

1-я ГКМВ, 1889 г.

- **Утверждение международных прототипов метра и килограмма** (CR, 34 – 38)*

Генеральная конференция по мерам и весам,

принимая во внимание

- «Отчет Президента Международного комитета» и «Отчет Международного комитета мер и весов», которые показывают, что, благодаря сотрудничеству между французской секцией Международной комиссии по метрологии и МКМВ, фундаментальные измерения международного и национального прототипов метра и килограмма были выполнены с точностью и надежностью, обеспечиваемые современным уровнем научных достижений;
- что международный и национальный прототипы метра и килограмма изготовлены из сплава платины с 10-процентным содержанием иридия с точностью до 0,0001;
- равенство длины международного Метра и равенство массы международного Килограмма с длиной Метра и массой Килограмма, хранящихся в Архивах Франции;
- что различия между национальными Метрами и международным Метром находятся в пределах 0,01 миллиметра, и что эти различия определяются на основе шкалы водородного термометра, которая всегда может быть воспроизведена благодаря стабильности водорода при условии обеспечения идентичных условий;
- что различия между национальными Килограммами и международным Килограммом лежат в пределах 1 миллиграмма;
- что международный Метр и Килограмм и национальные Метры и Килограммы соответствуют требованиям Метрической конвенции,

Определение метра было отменено в 1960 г. на 11-м заседании ГКМВ (Резолюция 6, см. с. 48)

утверждает

A. В отношении международных прототипов:

1. Прототип метра, выбранный МКМВ. Этот прототип, при температуре таяния льда, отныне будет представлять собой метрическую единицу длины.

2. Прототип килограмма, принятый МКМВ. Этот прототип отныне будет представлять собой метрическую единицу массы.

3. Водородный термометр со шкалой Цельсия, по которому были установлены уравнения для прототипа Метра.

B. В отношении национальных прототипов:

…

3-я ГКМВ, 1901 г.

- **Декларация об определении литра** (CR, 38 – 39)*

…

Конференция объявляет

1. Единицей объема для измерений высокой точности считать объем, занимаемый чистой водой массой 1 кг при максимальной плотности и при нормальном атмосферном давлении: этот объем называется «литр».

2. …

Это определение было отменено в 1964 г. на 12-м заседании ГКМВ (Резолюция 6, см. с. 51)

- **Декларация о единице массы и об определении веса; условная величина g_n** (CR, 70)

Принимая во внимание решение МКМВ от 15 октября 1887 г., согласно которому килограмм был определен как единица массы;

Принимая во внимание решение, содержащееся в Утверждении прототипов Метрической системы, единогласно принятой Генеральной конференции по мерам и весам 26 сентября 1889 г.;

Принимая во внимание необходимость положить конец двусмысленности, которая все ещё существует в современной практике в отношении значения слова «вес», иногда используемого для обозначения массы, иногда для механической силы;

Конференция постановляет

1. килограмм – это единица массы; он равен массе международного прототипа килограмма:*
2. слово «вес» обозначает величину, имеющую ту же природу, что и «сила»: вес тела является произведением его массы и ускорения, вызванного силой тяжести; в частности, стандартный вес тела является произведением его массы и стандартного ускорения под действием силы тяжести;
3. значение, принятое в Международной службе мер и весов для стандартного ускорения под действием силы тяжести, составляет 980,665 см/с^2, значение, уже установленное в законодательствах некоторых стран. **

* Это определение было отменено в 2018 г. на 26-м заседании ГКМВ (Резолюция 1, см. с. 81)

** Это значение g_n было общепринятым опорным значением для расчета уже устаревшей единицы килограмм-сила.

7-я ГКМВ, 1927 г.

- **Определение метра с помощью международного Прототипа** (CR, 49)*

Единицей длины является метр, определяемый как расстояние при 0° между осями двух центральных линий, отмеченных на платино-иридиевом стержне, хранящемся в Международном бюро мер и весов и объявленном прототипом метра на 1-й Генеральной конференции по мерам и весам, при этом этот стержень находится под нормальным атмосферным давлением и лежит на двух цилиндрах диаметром не менее одного сантиметра, симметрично расположенных в одной горизонтальной плоскости на расстоянии 571 мм друг от друга.

* Это определение было отменено в 1960 г. на 11-м заседании ГКМВ (Резолюция 6, см. с. 48)

МКМВ, 1946 г.

- **Определения для фотометрических величин** (PV, **20**, 119-122)*

Резолюция

...

4. Фотометрические единицы могут быть определены следующим образом:

Новая свеча (единица силы света). – Значение новой свечи таково, что яркость полного излучателя при температуре затвердевания платины составляет 60 новых свечей на квадратный сантиметр.

Новый люмен (единица светового потока). – Новый люмен – это световой поток, излучаемый в единичном телесном угле (стерадиан) равномерным точечным источником с силой света в 1 новую свечу.

5. …

* Оба определения, содержащиеся в данной Резолюции, были ратифицированы в 1948 г. 9-й ГКМВ, которая также утвердила название «кандела», данное «новой свече» (CR, 54). Позднее, классификатор люмена «новый» был также отменен.

Это определение было изменено в 1967 г. на 13-м заседании ГКМВ (Резолюция 5, см. с. 53–54)

▪ **Определения для электрических величин** (PV, **20**, 132-133)

Определения, содержащиеся в данной Резолюции, были ратифицированы в 1948 г. 9-й ГКМВ (CR, 49), которая также утвердила название «ньютон» (Резолюция 7, см. с. 46) для единицы силы MKS.

Резолюция 2

...

4. (A) Определения механических единиц, которые вводят определения электрических величин:

Единица силы. – Единица силы [в системе МКС (метр, килограмм, секунда)] – есть сила, которая придает массе 1 кг ускорение 1 метр в секунду в секунду.

Джоуль (единица энергии или работы). – Джоуль – есть работа, совершаемая, когда точка приложения единицы силы 1 МКС [ньютон] перемещается на расстояние 1 метр в направлении приложения силы.

Ватт (единица мощности). – Ватт – есть мощность, которая за 1 секунду дает энергию в 1 джоуль.

В 1954 г. на 10-м заседании ГКМВ (Резолюция 6, см. с. 47) была введена практическая система единиц измерения для международного использования. Ампер был назначен основной единицей в этой системе.

(B) Определения электрических величин. МКМВ принимает следующие положения, определяющие теоретические значения электрических величин:

Ампер (единица электрического тока). – Ампер – есть такой постоянный ток, который, если его поддерживать в двух прямых параллельных проводниках бесконечной длины с незначительным поперечным сечением, размещенных на расстоянии 1 м в вакууме, будет создавать между этими проводниками силу, равную 2×10^{-7} единицы силы МКС [ньютон] на метр длины. *

Это определение ампера было отменено в 2018 г. решением 26-й ГКМВ (Резолюция 1, см. с.81)

Вольт (единица разницы потенциалов и электродвижущей силы). – Вольт – это разница потенциалов между двумя точками электрического провода, несущего постоянный ток в 1 ампер при мощности, рассеянной между этими точками, равной 1 ватт.

Ом (единица электрического сопротивления). – Ом – есть электрическое сопротивление между двумя точками проводника, при котором постоянная разница потенциалов в 1 вольт, приложенная к этим точкам, создает в проводнике ток в 1 ампер, причем проводник не содержит какой-либо электродвижущей силы.

Кулон (единицы количества электричества). – Кулон – есть количество электричества, передаваемое за 1 секунду током в 1 ампер.

Фарад (единица емкости). – Фарад – есть емкость конденсатора, между двумя обкладками которого возникает разность потенциалов в 1 вольт при сообщении им заряда в 1 кулон.

Генри (единица электрической индуктивности). – Генри – есть индуктивность замкнутой цепи, в которой вырабатывается электродвижущая сила в 1 вольт при равномерном изменении электрического тока в цепи со скоростью 1 ампер в секунду.

Вебер (единица магнитного потока). – Вебер – есть магнитный поток, который в сцепленном контуре на один оборот будет создавать электродвижущую силу в 1 вольт при его убывании до нуля с постоянной скоростью в течение 1 секунды.

9-я ГКМВ, 1948 г.

▪ **Тройная точка воды; термодинамическая шкала с одной фиксированной точкой; единица количества теплоты (джоуль)** (CR, 55 и 63)

Кельвин был переопределен в 2018 г. решением 26-й ГКМВ (Резолюция 1, см. с.81)

Резолюция 3

1. Учитывая современные технологии, тройная точка воды способна обеспечить термометрическую опорную точку, воспроизводимую с точностью выше, чем можно получить из точки плавления льда.

   Следовательно, Консультативный комитет по термометрии и калориметрии (CCTC) считает, что ноль термодинамической (стоградусной) шкалы должен быть определен как температура на 0,0100 градуса ниже температуры тройной точки воды.

2. CCTC принимает принцип абсолютной термодинамической шкалы с единственной фундаментальной фиксированной точкой, которая в настоящее время представлена тройной точкой чистой воды, абсолютная температура которой будет зафиксирована позднее.

   Введение этой новой шкалы не повлияет на использование Международной шкалы, которая остается рекомендуемой практической шкалой.

3. Единица количества теплоты есть джоуль.

Примечание: требуется, чтобы результаты калориметрических экспериментов выражались в джоулях как можно чаще. Если эксперименты проведены путем сличения с повышением температуры воды (и что по какой-либо причине невозможно избежать использования калорий), необходимо предоставить информацию для пересчета в джоули. МКМВ, по рекомендации СТСС, должен подготовить таблицу наиболее точных значений в джоулях на градус, которые можно получить из экспериментов по удельной теплоемкости воды.

Таблица, подготовленная по данному запросу, была утверждена и опубликована МКМВ в 1950 г. (PV, 22, 92).

- **Принятие «градуса Цельсия» [МКМВ, 1948 г.** (PV, **21**, 88) **и 9-я ГКМВ, 1948 г.** (CR, 64)**]**

Из трех названий (“degree centigrade”, “centesimal degree”, “degree Celsius”), предложенных для обозначения градуса температуры, МКМВ выбрал “degree Celsius” (градус Цельсия) (PV, 21, 88).

Это название было также принято 9-й ГКМВ (CR, 64).

- **Предложение по созданию практической системы единиц измерения** (CR, 64)

Резолюция 6

Генеральная конференция по мерам и весам (ГКМВ),

учитывая

- что Международный союз по физике обратился к МКМВ с просьбой принять для международного использования практическую систему Système International d’Unités; что Международный союз по физике рекомендует систему МКС и одну электрическую единицу абсолютной практической системы, но не рекомендует физикам отказываться от системы CGS;
- что ГКМВ сама получила от Правительства Франции аналогичную просьбу, сопровождаемую проектом для использования в качестве основы для обсуждения при разработке полной спецификации единиц измерения;

поручает МКМВ:

- запросить мнение научного, технического и образовательного сообществ всех стран (фактически предлагая им французский документ в качестве основы);
- собрать и изучить ответы;
- выработать рекомендации для единой практической системы единиц измерения, пригодной для принятия всеми странами, присоединившимися к Метрической Конвенции.

- **Написание и печать обозначений единиц и чисел** (CR, 70) *

Резолюция 7

Принципы

Для обозначений единиц используется прямой латинский шрифт, как правило, строчные буквы; однако, если обозначение происходит от имени собственного, оно записывается с заглавной буквы. После обозначений точка не ставится.

В числах, для отделения целой части от десятичной, используется запятая (французская практика) или точка (британская практика). Цифры могут быть сгруппированы по три для удобства чтения; между группами ни запятые, ни точки не ставятся.

Единица	Обозначение	Единица	Обозначение
метр	м	ампер	А
квадратный метр	$м^2$	вольт	В
кубический метр	$м^3$	ватт	Вт
микрон	мк (μ)	ом	Ом
литр	л	кулон	Кл
грамм	г	фарад	Ф
тонна	т	генри	Гн
секунда	с	герц	Гц
эрг	эрг	пуаз	П
дина	дин	ньютон	Н
градус Цельсия	°С	кандела (новая кандела) кд	
абсолютный градус °К		люкс	лк
калория	кал	люмен	лм
бар	бар	стильб	сб
час	ч		

Примечания

1. Обозначения, отмеченные точкой перед наименованием единиц, означают, что они уже были приняты решениями МКМВ.
2. Обозначение для стера, единицы объема лесоматериалов, должно быть «ст», а не «с», которое было ранее приписано ему решением МКМВ.
3. Для обозначения температурного интервала или разницы температур, но не температуры, следует писать слово «градус» полностью или в сокращённом виде «град».

* ГКМВ отменила некоторые решения по единицам и терминологии, в частности, микрон, абсолютный градус, а также термины «градус» и «град» на 13-м заседании в 1967-68 гг. (Резолюции 7 и 3, см. с.170 и 169 соответственно), и литр: 16-я ГКМВ, 1979 г. (Резолюция 6, см. с. 58).

10-я ГКМВ, 1954 г.

- **Определение термодинамической шкалы температур** (CR, 79) *

Резолюция 3

10-е заседание ГКМВ решает определить термодинамическую шкалу температур, выбрав тройную точку воды в качестве фундаментальной реперной точки и присвоив ей температуру 273,16 градуса Кельвина точно.

* 13-я ГКМВ в 1967 г. четко определила кельвин (Резолюция 4, см. с. 53).

* Кельвин был переопределен 26-й ГКМВ в 2018 г. (Резолюция 1, см. с. 81).

- **Определение стандартной атмосферы** (CR, 79)

Резолюция 4

10-е заседание Генеральной конференции по мерам и весам, отметив, что определение стандартной атмосферы, данное 9-й ГКМВ при определении Международной температурной шкалы, привело ряд физиков к убеждению, что настоящее определение стандартной атмосферы действительно только для точных работ в области термометрии,

заявляет, что она принимает для общего использования следующее определение:

1 стандартная атмосфера = 1 013 250 дин на квадратный сантиметр, то есть 101 325 ньютонов на квадратный метр

- **Практическая система единиц** (CR, 80) *

* Название единицы «градус кельвина» было заменено на «кельвин» в 1967 г. 13-й ГКМВ *Резолюция 3, см. с. 53).

Резолюция 6

В соответствии с пожеланием, выраженным 9-й ГКМВ в Резолюции 6 о создании практической системы единиц измерений для международного пользования, 10-я ГКМВ

решает принять в качестве основных следующие единицы:

длина	метр
масса	килограмм
время	секунда
электрический ток	ампер
термодинамическая температура	градус Кельвина
сила света	кандела

МКМВ, 1956 г.

- **Определение единицы времени (секунды)** (PV, **25**, 77) *

* Это определение было отменено 13-й ГКМВ в 1967 г (Резолюция 1, см. с. 52).

Резолюция 1

В силу полномочий, предоставленных ему Резолюцией 5 10-й ГКМВ, МКМВ,

принимая во внимание,

1. что 9-я Генеральная Ассамблея Международного астрономического союза (Дублин, 1955 г.) заявила о своей поддержки концепции связывания секунды с тропическим годом,
2. что, согласно решениям 8-й Генеральной Ассамблеи Международного астрономического союза (Рим, 1952 г.), секунда эфемеридного времени (ET-Ephemeris Time) представляет собой отношение:

$$\frac{12\,960\,276\,813}{408\,986\,496} \times 10^{-9} \text{ тропического года для 0 января 1900 в 12 ч ET}$$

решает

«Секунда – есть отношение 1/31 556 925,9747 тропического года для 0 января 1900 в 12 ч эфемеридного времени».

▪ **Международная система единиц (**PV, **25,** 83)

Резолюция 3

Международный Комитет мер и весов,

учитывая

- задачу, поставленную перед ним Резолюцией 6 9-й ГКМВ, по созданию практической системы единиц измерений, подходящей для принятия всеми странами, присоединившимися к Метрической Конвенции,
- документы, полученные от двадцати одной страны в ответ на запрос 9-й ГКМВ,
- Резолюцию 6 10-й ГКМВ, устанавливающую основные единицы создаваемой системы,

рекомендует

1. дать название «Международная система единиц» (“Système International d’Unités”) системе, базирующейся на основных единицах, принятых 10-й ГКМВ, а именно:

   [далее следует перечень шести основных единиц и их обозначений, приведенный в Резолюции 12 11-й ГКМВ (1960 г.)].

2. использовать единицы, приведенные в следующей таблице, не исключая другие, которые могут быть добавлены позднее:

   [далее следует таблица единиц, приведенная в параграфе 4 Резолюции 12 11-й ГКМВ (1960 г.)].

11-я ГКМВ, 1960 г.

▪ **Определение метра (**CR, 85**)***

Резолюция 6

* Это определение было отменено 17-й ГКМВ в 1983 г. (Резолюция 1, см. с. 59).

11-я Генеральная конференция по мерам и весам,

считая,

- что международный Прототип не определяет метр с точностью, отвечающей современным требованиям метрологии,
- что крайне желательно иметь естественный неразрушаемый эталон,

постановляет

1. что метр есть длина, равная 1 650 763,73 длинам волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между $2p_{10}$ и $5d_5$ уровнями атома криптона-86,
2. отменить определение метра, действующее с 1889 г., основанное на международном платино-иридиевом Прототипе,
3. хранить международный Прототип метра, принятый 1-й ГКМВ в 1889 г. в МБМВ в условиях, определенных в 1889 г.

▪ **Определение единицы времени (секунды) (**CR, 86**) ***

* Это определение было отменено 13-й ГКМВ в 1967 г. (Резолюция 1, см. с. 52).

Резолюция 9

11-я Генеральная конференция по мерам и весам,

принимая во внимание

- полномочия, предоставленные МКМВ 10-й ГКМВ для определения основной единицы времени,
- решение, принятое МКМВ в 1956 г.,

утверждает следующее определение:

«Секунда равна 1/31 556 925.9747 части тропического года на 0 января 1900 в 12 часов эфемеридного времени».

▪ **Международная система единиц (**CR, 87)*

* Позднее ГКМВ отменила некоторые свои решения и расширила перечень приставок, см. ниже.

Резолюция 12

11-я Генеральная конференция по мерам и весам,

учитывая

- Резолюцию 6 10-й ГКМВ, в которой были приняты шесть основных единиц, на которых основывается практическая система измерений для международного использования:

длина	метр	м
масса	килограмм	кг
время	секунда	с
электрический ток	ампер	А
термодинамическая температура	градус Кельвина	°К
сила света	кандела	кд

Название и обозначение единицы термодинамической температуры было изменено 13-й ГКМВ в 1967 г. (Резолюция 3, см. с. 53)

- Резолюцию 3, принятую МКМВ в 1956 г.,
- рекомендации, принятые МКМВ в 1958 г., по аббревиатурам для названия системы и приставкам, для образования кратных и дольных единиц,

постановляет

1. называть систему, базирующуюся на шести основных единицах, приведенных выше, Международной системой единиц (“Système International d’Unités”);
2. принять международное сокращение названия системы: SI;
3. образовывать названия кратных и дольных единиц при помощи следующих приставок:

Седьмая основная единица, моль, была принята 14-й ГКМВ в 1971 г. (Резолюция 3, см. с. 56)

Множитель	Приставка	Обознач.	Множитель	Приставка	Обознач.
$1\,000\,000\,000\,000 = 10^{12}$	тера	Т	$0{,}1 = 10^{-1}$	деци	д
$1\,000\,000\,000 = 10^{9}$	гига	Г	$0{,}01 = 10^{-2}$	санти	с
$1\,000\,000 = 10^{6}$	мега	М	$0{,}001 = 10^{-3}$	милли	мл
$1\,000 = 10^{3}$	кило	к	$0{,}000\,01 = 10^{-6}$	микро	мк
$100 = 10^{2}$	гекто	г	$0{,}000\,000\,001 = 10^{-9}$	нано	н
$10 = 10^{1}$	дека	да	$0{,}000\,000\,000\,001 = 10^{-12}$	пико	п

Другие приставки были приняты 12-й ГКМВ в 1964 г. (Резолюция 8, см. с.52), 15-й ГКМВ в 1975 г. (Резолюция 10, см. с. 57) и 19-й ГКМВ в 1991 г. (Резолюция 4, см. с. 63).

4. Перечисленные далее единицы используются в системе, не исключая использования других, которые могут быть добавлены позднее

Дополнительные единицы

плоский угол	радиан	рад
телесный угол	стерадиан	ср

20-я ГКМВ в 1995 г. отменила класс дополнительных единиц в SI (Резолюция 8, см. с. 63). Сейчас они считаются производными единицами.

Производные единицы

площадь	квадратный метр	$м^2$		13-я ГКМВ в 1967 г. (Резолюция 6, см. с. 54) определила другие единицы, которые следует добавить в перечень. В принципе, этот список производных единиц не имеет ограничений.
объем	метр кубический	$м^3$		
частота	герц	Гц	1/с	
плотность массы (плотность)	килограмм на метр кубический	$кг/м^3$		
скорость	метр в секунду	м/с		
угловая скорость	радиан в секунду	рад/с		
ускорение	метр в секунду в квадрате	$м/с^2$		
угловое ускорение	радиан в секунду в квадрате	$рад/с^2$		
сила	ньютон	Н	$кг \cdot м/с^2$	
давление (механическое напряжение)	ньютон на квадратный метр	$Н/м^2$		
кинематическая вязкость	метр квадратный в секунду	$м^2/с$		
динамическая вязкость	ньютон-секунда на метр квадратный	$Н \cdot с/м^2$		Современная практика заключается в использовании фразы amount of heat (количество теплоты), а не quantity of heat, потому что слово quantity имеет другое значение в метрологии
работа, энергия, количество тепла	джоуль	Дж	$Н \cdot м$	
мощность	ватт	Вт	Дж/с	
количество электричества (*см. пояснения*)	кулон	Кл	$А \cdot с$	
электрическое напряжение, разность потенциалов, электродвижущая сила	вольт	В	Вт/А	Современная практика заключается в использовании фразы amount of electricity (количество электричества), а не quantity of electricity (см. примечание выше).
напряженность электрического поля	вольт на метр	В/м		
электрическое сопротивление	ом	Ом	В/А	
емкость	фарад	Ф	$Ф \cdot с/В$	
магнитный поток	вебер	Вб	$В \cdot с$	
индуктивность	генри	Гн	$В \cdot с/А$	
плотность магнитного потока	тесла	Тл	$Вб/м^2$	
напряженность магнитного поля	ампер на метр	А/м		
электродвижущая сила	ампер	А		
световой поток	люмен	лм	$кд \cdot ср$	
яркость	кандела на квадратный метр	$кд/м^2$		
освещенность	люкс	лк	$лм/м^2$	

▪ **Кубический дециметр и литр (CR, 88)**

Резолюция 13

11-я Генеральная Конференция по мерам и весам ,

учитывая,

- что кубический дециметр и литр не равны, а отличаются приблизительно на 28×10^{-6},
- что определения физических величин, с использованием измерений объема, становятся всё более и более точными, увеличивая риск путаницы между кубическим дециметром и литром,

просит МКМВ изучить эту проблему и представить свои заключения на 12-й ГКМВ.

МКМВ, 1961 г.

- **Кубический дециметр и литр (**PV**, 29,** 34**)**

Рекомендация

МКМВ рекомендует выражать результаты точных измерений объема в единицах Международной системы, а не в литрах.

МКМВ, 1964 г.

- **Атомные и молекулярные стандарты частоты** (PV, 32, 26)

Заявление

Международный Комитет мер и весов,

уполномоченный Резолюцией 5 12-й ГКМВ назначить атомные или молекулярные стандарты частоты для временного использования при измерениях времени в физике,

заявляет, что стандартом, который следует использовать, является переход между сверхтонкими уровнями $F = 4$, $M = 0$ и $F = 3$, $M = 0$ в основном состоянии $^2S_{1/2}$ атома цезия-133, невозмущенного внешними полями, и этому переходу приписывается значение 9 192 631 770 герц.

12-я ГКМВ, 1964 г.

- **Атомный стандарт частоты** (CR, 93)

Резолюция 5

12-я Генеральная Конференция по мерам и весам ,

принимая во внимание

- что 11-я ГКМВ в Резолюции 10 отметила, в интересах точной метрологии, необходимость срочного принятия атомного или молекулярного стандарта интервала времени,
- что, несмотря на результаты, достигнутые для цезиевых атомных стандартов частоты, еще не настало время для принятия ГКМВ нового определения секунды, основной единицы Международной системы (Système International d'Unités), в связи с перспективой получения новых значимых результатов проводимых в настоящее время исследований,

учитывая также, что не желательно откладывать переход к измерениям времени в физике, основанным на атомных или молекулярных стандартах частоты,

уполномочивает МКМВ назначить атомный или молекулярный стандарт частоты для текущего использования,

просит организации и лаборатории, компетентные в данной области, проводить работы, необходимые для нового определения секунды.

- **Литр (**CR, 93**)**

Резолюция 6

12-я Генеральная Конференция по мерам и весам ,

учитывая Резолюцию 13, принятую 11-й ГКМВ в 1960 г. и Рекомендацию, принятую МКМВ в 1961 г.,

1. **отменяет** определение литра, данное в 1901 г. 3-й ГКМВ,
2. **заявляет**, что слово «литр» следует использовать как специальное наименование кубического дециметра,
3. **рекомендует** не использовать название «литр» при представлении результатов высокоточных измерений объема.

- **Кюри (**CR, 94**)***

* Название "беккерель" (Бк, Bq) было принято 15-й ГКМВ в 1975 г. (Резолюция 8, см. с. 56) для единицы активности в СИ: 1 Ки = 3,7 x 10^{10} Бк

Резолюция 7

12-я Генеральная Конференция по мерам и весам,

принимая во внимание, что во многих странах кюри долгое время применялась как единица активности радионуклидов,

признавая, что в Международной системе единиц (СИ), единицей этой активности является секунда в минус первой степени ($с^{-1}$),

решает сохранить кюри как единицу активности, не входящую в SI, равную 3.7×10^{10} $с^{-1}$. Обозначением этой единицы является Ки (Ci).

На заседании 1997 г. МКМВ уточнил, что это определение относится к атому цезия, покоящемуся при термодинамической температуре 0 K. Формулировка определения секунды была изменена 26-й ГКМВ в 2018 году (Резолюция 1, см. с. 197).

- **Приставки SI фемто и атто (**CR, 94**)***

Резолюция 8

12-я Генеральная Конференция по мерам и весам

решает добавить в список приставок для образования названий кратных и дольных единиц, принятый 11-й ГКМВ, Резолюция 12, параграф 3, следующие две новые приставки:

Множитель	Приставка	Обозначение
10^{-15}	фемто	ф
10^{-18}	атто	а

* Новые приставки были добавлены 15-й ГКМВ в 1975 г. (Резолюция 10, см. с. 57).

- **Десятичные кратные и дольные единицы массы (**PV**, 35,** 29 и *Metrologia*, 1968**, 4,** 45**)**

Рекомендация 2

Международный Комитет мер и весов,

учитывая, что правила образования названий десятичных кратных и дольных единиц параграфа 3 Резолюции 12 11-й ГКМВ (1960 г.) могут быть интерпретированы иначе при применении к единице массы,

заявляет, что правила Резолюции 12 11-й ГКМВ применимы к килограмму следующим образом: названия единиц десятичных дробных и кратных единице массы образуются присоединением приставок к слову «грамм».

13-я ГКМВ, 1967/68 г.

- **Единица времени в SI (секунда)** (CR, 103 и *Metrologia*, 1968, **4,** 43)

Резолюция 1

13-я Генеральная Конференция по мерам и весам ,

учитывая

- что определение секунды, принятое МКМВ в 1956 г. (Резолюция 1) и одобренное Резолюцией 9 11-й ГКМВ (1960 г.), которая поддержана Резолюцией 5 12-й ГКМВ (1964 г.), не удовлетворяет современным требованиям метрологии,
- что на заседании 1964 г. МКМВ, уполномоченный Резолюцией 5 12-й ГКМВ (1964 г.), рекомендовал в рамках выполнения этих требований цезиевый атомный стандарт частоты для временного использования,
- что этот стандарт частоты в настоящее время хорошо проверен и является достаточно точным, для того чтобы обеспечить определение секунды, удовлетворяющее современным требованиям,
- что сейчас настало время заменить действующее определение единицы времени в Международной системе (Système International d'Unités) на определение, основанное на этом атомном стандарте,

постановляет

1. Единицей времени в SI является секунда, определенная следующим образом:
2. “Секунда равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133”;
3. Отменить Резолюцию 1, принятую МКМВ на заседании 1956 г. и Резолюцию 9 11-й ГКМВ.

▪ **Единица SI термодинамической температуры (кельвин) (**CR, 104 и *Metrologia*, 1968 г., **4,** 43**)***

Резолюция 3

13-я Генеральная Конференция по мерам и весам ,

принимая во внимание

- названия «градус Кельвина» и «градус», обозначения “°K” и “град” и правила их использования, приведенные в Резолюции 7 9-й ГКМВ (1948 г.), в Резолюции 12 11-й ГКМВ (1960 г.), а также решение, принятое МКМВ в 1962 г. (PV, **30**, 27),
- что единица термодинамической температуры и единица температурного интервала одна и та же, и должна иметь одно название и одно обозначение,

постановляет

1. присвоить единице термодинамической температуры название «кельвин» и обозначение «К»;**
2. использовать одно и то же название и обозначение для передачи интервала температур;
3. разность температур также может выражаться в градусах Цельсия;
4. отмеченные в начальном абзаце решения о названии единицы термодинамической температуры, ее обозначении и обозначении единицы для выражения разности температур, отменяются, но использование, введенных ими понятий, временно разрешается.

* На заседании 1980 г. МКМВ одобрил отчет 7-ого заседания CCU, который потребовал больше не разрешать использование обозначений “°K” и “град”.

** См. Рекомендацию 2 МКМВ (CI-2005) об изотопном составе воды, входящем в определение кельвина, с. 68.

▪ **Определение единицы термодинамической температуры в SI (кельвин) (**CR, 104 и *Metrologia*, 1968, **4,** 43**)***

Резолюция 4

13-ая Генеральная Конференция по мерам и весам,

считая, что целесообразно сформулировать более точное определение единицы термодинамической температуры, содержащейся в Резолюции 3 10-й ГКМВ (1954 г.),

решает сформулировать определение следующим образом:

«Кельвин, единица термодинамической температуры, равен 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды».

* См. Рекомендацию 5 (CI-1989) МКМВ о Международной температурной шкале 1990, с. 62.

* Кельвин был переопределен на 26-й ГКМВ в 2018 году (Резолюция 1, см. с. 81).

▪ **Единица силы света в SI (кандела)** (CR, 104 и *Metrologia*, 1968, **4**, 43-44)*

Резолюция 5

13-я Генеральная Конференция по мерам и весам,

принимая во внимание

- определение единицы силы света, одобренное 9-й ГКМВ (1948) и содержащееся в «Резолюции об изменении фотометрических единиц» принятой МКМВ в 1946 г. (PV, **20,** 119) на основании полномочий, предоставленных 8-й ГКМВ (1933 г.),
- что это определение удовлетворительно определяет единицу силы света, но его формулировка может быть уязвима для критики,

* Это определение было отменено решением 16-й ГКМВ в 1979 г. (Резолюция 3, см. с. 57).

решает сформулировать определение канделы следующим образом:

«Кандела равна силе света, излучаемого в направлении, перпендикулярном к поверхности абсолютно черного тела, площадью 1/600 000 квадратного метра, при температуре затвердевания платины под давлением 101 325 ньютонов на квадратный метр».

- **Производные единицы SI (CR, 105 и *Metrologia*, 1968, 4, 44)***

Резолюция 6

13-ая Генеральная Конференция по мерам и весам ,

учитывая, что целесообразно добавить некоторые производные единицы в перечень параграфа 4 Резолюции 12 11-й ГКМВ (1960 г.),

решает добавить:

волновое число	1 на метр	$м^{-1}$
энтропия	джоуль на кельвин	Дж/К
удельная теплоемкость	джоуль на килограмм-кельвин	Дж/(кг · К)
теплопроводность	ватт на метр-кельвин	Вт/(м · К)
интенсивность излучения	ватт на стерадиан	Вт/ср
активность (радиоактивного источника)	1 на секунду	$с^{-1}$

* Единице активности было присвоено специальное название и обозначение 15-й ГКМВ в 1975 г. (Резолюция 8, см. с. 56).

- **Отмена предшествующих решений (микрон и новая кандела) (**CR, 105 и *Metrologia*, 1968**, 4,** 44)

Резолюция 7

13-я Генеральная Конференция по мерам и весам ,

учитывая, что последующие решения Генеральной Конференции о Международной системе (Système International d'Unités) не совместимы с частью Резолюции 7 9-й ГКМВ (1948 г.),

постановляет в связи с этим исключить из Резолюции 7 9-й Конференции:

1. название единицы «микрон», и обозначение «μ», которое было дано единице, а сейчас относится к приставке;
2. название единицы «новая кандела».

МКМВ, 1969 г.

- **Système International d'Unités, Правила применения Резолюции 12 11-й ГКМВ (1960)** (PV, **37**, 30 и *Metrologia*, 1970, **6**, 66)*

* 20-я ГКМВ в 1995 г. решила отменить класс дополнительных единиц SI (Резолюция 8, см. с. 63).

Рекомендация 1

Международный Комитет мер и весов,

учитывая, что Резолюция 12 11-й ГКМВ (1960 г.), касающаяся Международной системы единиц (Système International d'Unités), вызвала дискуссии по некоторым ее аспектам,

заявляет

1. основные единицы, дополнительные единицы и производные единицы Международной системы единиц (Système International d'Unités), образующие когерентный набор, называются «единицами SI»;**
2. приставки, принятые ГКМВ для образования десятичных кратных и дольных единиц SI, называются «приставками SI»;

** МКМВ одобрила в 2001 г. предложение CCU прояснить определение «SI units» и «units of SI », см. с. 64.

и рекомендует

3. применение единиц SI и кратных и дольных к ним, образованных с помощью приставок SI.

Примечание: Название «дополнительные единицы», появившееся в Резолюции 12 11-й ГКМВ (и в данной Рекомендации) дано единицам SI, для которых Генеральная конференция не смогла определить, являются ли они основными или производными единицами.

CCDS, 1970 г. (на МКМВ, 1970 г.)

- **Определение TAI** (PV, **38,** 110-111 и *Metrologia*, 1971**, 7,** 43)

Рекомендация S 2

Международное атомное время (TAI) – эталонное время, установленное Международным бюро времени (Bureau International de l'Heure) на основе данных атомных часов, используемых различными организациями, в соответствии с определением секунды - единицы времени Международной системы единиц.

В 1980 г., определение TAI было сформулировано следующим образом (Заявление CCDS, МБМВ Com. Cons. Déf. Seconde, 1980, **9**, S 15 и Metrologia, 1981, **17**, 70):

TAI является согласованной шкалой времени, определенной в рамках геоцентрической системы с секундой SI, воспроизведенной на вращающемся геоиде в качестве единицы шкалы.

Это определение затем было уточнено Международным астрономическим союзом в 1991 г., Резолюция A4:

«TAI – это принятая временная шкала, которая в идеале, в пренебрежении постоянным сдвигом 32.184 с, совпадает с Земным временем (TT), которое в свою очередь связано с временной координатой геоцентрической системы координат, Геоцентрическое Координатное Время (TCG), постоянным коэффициентом.»

(см. Труды 21-ой Генеральной Ассамблеи MAC: IAU Trans., 1991, vol. XXIB, Kluwer.)

14-я ГКМВ, 1971 г.

- **Паскаль и сименс** (CR, 78)

14-я Генеральная конференция по мерам и весам приняла специальные наименования «паскаль» (Па), для единицы SI ньютон на квадратный метр, и «сименс» (См), для единицы SI электрической проводимости [обратный ом].

- **Международное атомное время, функция МКМВ** (CR, 77-78 и *Metrologia*, 1972, **8**, 35)

Резолюция 1

14-я Генеральная Конференция по мерам и весам ,

принимая во внимание

- что секунда, единица времени Système International d'Unités, начиная с 1967 г. определена на основе естественной атомной частоты, а не как ранее, с помощью временной шкалы, основанной на астрономическом движении,
- что необходимость шкалы Международного атомного времени (TAI) является следствием атомного определения секунды,
- что несколько международных организаций обеспечивали и все еще успешно обеспечивают существование временных шкал, основанных на астрономических движениях, в частности, благодаря непрерывной деятельности Международного бюро времени, Bureau International de l'Heure (BIH),
- что BIH приступило к созданию шкалы атомного времени, качество которого признано и пригодность доказана,
- что стандарты атомной частоты для воспроизведения секунды изучались и должны изучаться далее МКМВ с участием Консультативных комитетов, и что единицей интервала международного атомного времени должна быть секунда, воспроизведенная согласно ее «атомному» определению,
- что все компетентные международные научные организации и международные лаборатории, работающие в данной области, высказали пожелание, чтобы МКМВ и ГКМВ дали определение Международного атомного времени и содействовали созданию шкалы международного атомного времени,
- что пригодность международного атомного времени связана с жесткой координацией с временными шкалами, основанными на астрономическом движении,

просит МКМВ

1. дать определение Международному атомному времени,
2. предпринять необходимые шаги, согласованные с заинтересованными международными организациями, для гарантии того, что доступные научные знания и существующие средства используются наилучшим образом для реализации шкалы Международного атомного времени и для удовлетворения требований пользователей Международного атомного времени.

Определение TAI было дано CCDS в 1970 г. (сейчас CCTF), см. отчет CCDS стр. 22.

- **Единица SI количества вещества (моль)** (CR, 78 и *Metrologia*, 1972**, 8,** 36)*

Резолюция 3

14-я Генеральная Конференция по мерам и весам ,

учитывая мнение Международного союза теоретической и прикладной физики, Международного союза теоретической и прикладной химии и Международной организации по стандартизации о необходимости определить единицу количества вещества,

постановляет

1. Моль есть количество вещества системы, содержащей столько частиц, сколько атомов содержится в 0,012 килограмма углерода-12; его обозначение «моль».**
2. При использовании моля следует указывать структурные элементы - это могут быть атомы, молекулы, ионы, электроны, другие частицы или определенные группы таких частиц.
3. Моль является основной единицей SI (Système International d'Unités).

* На своем заседании 1980 г., МКМВ одобрила отчет 7-го заседания CCU (1980) уточнившем, что в этом определении подразумеваются свободные атомы углерода-12, покоящиеся в основном состоянии.

** Определение моля было пересмотрено на 26-й ГКМВ в 2018 г. (Резолюция 1, см. с. 81).

15-я ГКМВ, 1975 г.

- **Рекомендованное значение скорости света** (CR, 103 и *Metrologia*, 1975, **11,** 179-180)

Резолюция 2

15-я Генеральная Конференция по мерам и весам,

принимая во внимание отличное согласование результатов измерений длин волн излучения лазеров, синхронизированных по линии молекулярного поглощения в видимом или инфракрасном диапазоне, с погрешностью, оцениваемой $\pm 4 \times 10^{-9}$, что соответствует погрешности реализации метра,

учитывая также согласованные измерения частот нескольких таких излучений,

рекомендует использовать полученное значение для скорости распространения электромагнитных волн в вакууме *c* = 299 792 458 метров в секунду.

Относительная погрешность, приведенная здесь, отвечает трем среднеквадратичным отклонениям в данных.

- **Всемирное координированное время (UTC) (**CR, 104 и *Metrologia*, 1975**, 11,** 180)

Резолюция 5

15-я Генеральная Конференция по мерам и весам,

принимая во внимание широкое использование системы, называемой «Всемирное координированное время» (UTC), что на ней основана передача большинства радиосигналов времени, что такое широкое распространение делает доступными для пользователей не только стандарты частоты, но и Международное атомное время и приближение к Всемирному времени (или в случае предпочтения - к среднему солнечному времени),

отмечает, что это Всемирное координированное время служит основой гражданского времени, использование которого принято в большинстве стран,

полагает, что такое использование заслуживает всяческого одобрения.

- **Единицы SI для ионизирующих излучений (беккерель и грей)** (CR, 105 и *Metrologia*, 1975, **11,** 180)*

Резолюции 8 и 9

15-я Генеральная Конференция по мерам и весам,

в связи с настоятельным требованием, выдвинутым Международной комиссией по радиационным единицам и измерениям (International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU), о распространении использования Международной системы единиц SI (Système International d'Unités) на радиологические исследования и их приложения,

в связи с необходимостью сделать наиболее простым использование единиц неспециалистами,

учитывая также огромный риск ошибок в терапевтической работе,

На заседании 1976 г. МКМВ одобрил отчет 5-го заседания CCU (1976 г.), определив, что, следуя предложениям ICRU, грей может также использоваться для выражения поглощенной дозы ионизирующего излучения, кермы и показателя поглощенной дозы.

принимает следующее специальное наименование для единицы активности в SI:

беккерель, обозначение Бк, равен обратной секунде (Резолюция 8),

принимает следующее специальное наименование для единицы ионизирующего излучения в СИ:

грей, обозначение Гр, равен одному джоулю на килограмм (Резолюция 9).

Примечание: грей есть единица SI для поглощенной дозы. В области ионизирующих излучений грей может использоваться для других физических величин, также выражаемых в джоулях на килограмм. Консультативный комитет по единицам (Comité Consultatif des Unités) отвечает за изучение данного вопроса в сотрудничестве с компетентными международными организациями.

- **Приставки SI пета и экса (**CR, 106 и *Metrologia*, 1975**, 11,** 180-181)*

* Новые приставки были добавлены 19-й ГКМВ в 1991 г. (Резолюция 4, см. с. 63).

Резолюция 10

15-я Генеральная Конференция по мерам и весам

постановляет добавить в список приставок СИ, используемых для кратных единиц, принятый 11-й ГКМВ, Резолюция 12, параграф 3, две следующие приставки:

Множитель	Приставка	Обозначение
10^{15}	пета	П
10^{18}	экса	Э

16-я ГКМВ, 1979 г.

- **Единица SI для силы света (кандела)** (CR, 100 и *Metrologia*, 1980**, 16,** 56)

Формулировка определения канделы была изменена на 26-й ГКМВ в 2018 г. (Резолюция 1, см. с. 81).

Резолюция 3

16-я Генеральная Конференция по мерам и весам ,

принимая во внимание,

- что несмотря на заметные усилия ряда лабораторий, остаются существенные расхождения между результатами воспроизведения канделы, основанными на современном первичном эталоне черного тела,
- что техника радиометрии быстро развивается, и уже имеет такой же уровень точности как в фотометрии, и что эта техника уже используется национальными лабораториями для воспроизведения канделы без создания черного тела,
- что в 1977 г. МКМВ было принято соотношение между фотометрическими величинами и радиометрическими величинами, а именно, значение 683 люменов на ватт для спектральной световой эффективности монохроматического излучения с частотой 540 x 10^{12} герц,
- что это значение принято как достаточно точное для системы световых фотопических величин, что оно должно изменяться только приблизительно на 3 % для световых скотопических величин, и таким образом обеспечивает удовлетворительные условия непрерывности,
- что настало время определить канделу для обеспечения как простоты воспроизведения, так и точности фотометрических эталонов, а также ее применимости как к фотопическим и скотопическим фотометрическим величинам, так и к величинам, определяемым в мезопическом диапазоне,

Фотопичесое зрение регистрируется колбочками сетчатки глаза, которые чувствительны к высокому уровню освещения (L > ca. 10 кд/м^2) и используется для дневного зрения.

Скотопическое зрение регистрируется палочками сетчатки, которые чувствительны к низкому уровню освещения (L < ca. 10^{-3} кд/м^2), используется для ночного зрения.

В области между этими уровнями освещенности работают и колбочки и палочки, что называют мезопическим зрением

постановляет

1. Кандела равна силе света в данном направлении от источника, испускающего монохроматическое излучение частотой 540 x 10^{12} герц и имеющего интенсивность излучения в этом направлении равную 1/683 ватт на стерадиан.
2. Отменить определение канделы (ранее названной «новой свечой »), принятое МКМВ в 1946 г. на основании полномочий, данных 8-й ГКМВ в 1933 г., ратифицированное 9-й ГКМВ в 1948, затем исправленное 13-й ГКМВ в 1967 г.

▪ **Специальное наименование для единицы SI эквивалентной дозы (зиверт) (**CR, 100 и *Metrologia*, 1980, **16,** 56)*

* МКМВ в 1984 г. решил сопроводить данную Резолюцию разъяснением (Рекомендация 1, см. с. 60).

Резолюция 5

16-я Генеральная Конференция по мерам и весам,

учитывая

- усилия по введению единиц SI в области ионизирующих излучений,
- угрозу человеческому здоровью в случае недооценки дозы ионизирующего излучения, угрозу, которая может возникнуть из-за путаницы между поглощенной дозой и эквивалентной дозой,
- что увеличение числа специальных наименований представляет угрозу Международной системе единиц и этого следует избегать любыми возможными способами, но это правило может быть нарушено, если стоит вопрос об охране здоровья человека,

принимает специальное наименование ***зиверт***, обозначение Зв, для единицы эквивалентной дозы SI в области радиационной защиты. Зиверт равен джоулю на килограмм.

▪ **Обозначения литра** (CR, 101 и *Metrologia*, 1980, **16**, 56-57)

Резолюция 6

16-я Генеральная Конференция по мерам и весам ,

признавая основные принципы, принятые для написания обозначений единиц в Резолюции 7 9-й ГКМВ (1948 г.),

учитывая что обозначение l для единицы литр было принято МКМВ в 1879 г. и подтверждено в соответствующей резолюции в 1948 г.,

учитывая также, что во избежание риска путаницы между литром l и числом 1, некоторые страны приняли обозначение L вместо l для единицы литр,

принимая во внимание, что наименование литр, хотя и не включено в международную систему единиц, должно быть допущено к всеобщему использованию с этой системой,

решает, в виде исключения, принять два обозначения l и L для единицы литр,

В 1990 г МКМВ принял решение, что еще слишком рано выбрать одно обозначение для литра.

учитывая, что в будущем будет оставлено только одно из этих двух обозначений,

призывает МКМВ изучить использование обоих обозначений и предоставить 18-й ГКМВ свое мнение о возможности отмены одного из них.

МКМВ, 1980 г.

▪ **Дополнительные единицы SI (радиан и стерадиан) (PV, 48, 24 и *Metrologia*, 1981, 17, 72)***

* Класс дополнительных единиц SI был отменен решением 20-й ГКМВ в 1995 г. (Резолюция 8, см. с. 63).

Рекомендация 1

Международный Комитет мер и весов,

принимая во внимание Резолюцию 3, принятую ISO/TC 12 в 1978 г., и Рекомендацию U 1 (1980), принятую Консультативным комитетом по единицам на 7-м заседании,

учитывая

- что единицы радиан и стерадиан обычно вводятся в выражения для единиц при необходимости разъяснения, особенно в фотометрии, где стерадиан играет важную роль при дифференциации единиц, соответствующих разным величинам,
- что в уравнениях плоский угол обычно выражают как отношение двух длин, а телесный угол как отношение площади к квадрату длины, и поэтому эти величины рассматриваются как безразмерные величины,
- что изучение формализмов, используемых в научных областях, показывает, что не существует ни одной одновременно когерентной и подходящей области, в которой величины плоского и телесного углов следует рассматривать как основные величины,

также учитывая

- что интерпретация, данная МКМВ в 1969 г. классу дополнительных единиц, введенному Резолюцией 12 11-й ГКМВ в 1960 г., оставляет свободу для трактовки радиана и стерадиана как основных единиц SI,
- что такая возможность компрометирует внутреннюю когерентность SI, основанную только на семи основных единицах,

постановляет интерпретировать класс дополнительных единиц в международной системе SI как класс безразмерных производных единиц, для которых ГКМВ оставляет свободу их использования или не использования в выражениях для производных единиц SI.

17-я ГКМВ, 1983 г.

▪ **Определение метра (**CR, 97 и *Metrologia*, 1984**, 20,** 25**)**

Резолюция 1

Формулировка определение метра была изменена 26-й ГКМВ в 2018 г. (Резолюция 1, см. с. 81).

17-я Генеральная Конференция по мерам и весам ,

учитывая

- что современное определение не дает возможности достаточно точного воспроизведения метра для удовлетворения всех требований,
- что прогресс в стабилизации лазеров позволяет получать излучения, более воспроизводимые и более простые в использовании, чем эталонное излучение, лампы с криптоном-86,
- что прогресс, достигнутый в измерении частот и длин волн этих излучений, привел к согласованному определению скорости света, точность которой принципиально ограничена реализацией современного определения метра,
- что длины волн, определенные из измерений частот и данного значения скорости света, имеют воспроизводимость выше чем те, которые могут быть получены сравнением с длинной волны эталонного излучения криптона-86,
- что существуют преимущества, особенно в астрономии и геодезии, в поддержании неизменным значения скорости света, рекомендованного в 1975 г. 15-й ГКМВ в Резолюции 2 (c = 299 792 458 м/с),
- что рассматривались различные формы для нового определения метра, которые подразумевают придание скорости света точного значения, равного рекомендованному значению, и что это существенно не нарушает непрерывность единицы длины, учитывая относительную погрешность $\pm 4 \times 10^{-9}$ лучших реализаций настоящего определения метра,

Относительная погрешность, приведенная здесь, соответствует трем среднеквадратичным отклонениям в рассматриваемых данных.

- что эти различные формы, базирующиеся как на пути, проходимом светом за определенное время, так и на длине волны измеряемого излучения или определенной частоте, явившихся предметом консультаций и серьёзных дискуссий, были признаны эквивалентными, и совместными усилиями предпочтение отдано первой форме,
- что Консультативный комитет по определению метра (CCDM) сейчас готов дать инструкции по практической реализации такого определения, инструкции, которые могли бы включать использование оранжевого излучения криптона-86, используемого до настоящего времени в качестве эталонного, и которые в свое время могут быть расширены и пересмотрены,

постановляет

1. Метр равен длине пути, проходимого светом в вакууме за время 1/299 792 458 секунды,
2. Определение метра, действующее с 1960 г., основанное на переходе между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ в атоме криптона-86, отменяется.

▪ **О реализации определения метра** (CR, 98 и *Metrologia*, 1984**, 20,** 25-26**)**

См. Рекомендацию 1 (CI-2002) МКМВ о пересмотре практической реализации определения метра, с. 65.

Резолюция 2

17-я Генеральная Конференция по мерам и весам

призывает МКМВ

- разработать инструкции по практической реализации нового определения метра,
- выбрать излучения, которые могут быть рекомендованы как стандарты длины волны для интерференционного измерения длины и разработать инструкции по их использованию,
- продолжить работы по улучшению этих эталонов.

МКМВ, 1984 г.

▪ **О зиверте** (PV, 52, 31 и *Metrologia*, 1985, **21,** 90)*

Рекомендация 1

Международный Комитет мер и весов,

учитывая сохраняющуюся неясность в связи с Резолюцией 5, принятой 16-й Генеральной Конференцией по мерам и весам (1979 г.),

решает ввести следующее разъяснение в брошюру “Le Système International d'Unités (SI)”:

Величина эквивалентной дозы *H* равна произведению поглощенной дозы *D* ионизирующего излучения и безразмерных коэффициентов *Q* (коэффициент качества) и *N* (произведение каких-либо других коэффициентов), установленных Международной комиссией по радиологической защите:

$$H = Q \cdot N \cdot D.$$

Таким образом, для данного излучения численное значение *H* в джоулях на килограмм может отличаться от *D* в джоулях на килограмм в зависимости от значений *Q* и *N*. Для того, чтобы избежать путаницы между поглощенной дозой *D* и эквивалентной дозой *H*, следует использовать специальные наименования для соответствующих единиц, то есть следует использовать наименование «грей» вместо джоуля на килограмм для единицы поглощенной дозы *D* и наименование «зиверт» вместо джоуль на килограмм для единицы эквивалентной дозы *H.*

* МКМВ в 2002 г. решил изменить разъяснение величины эквивалентной дозы в Брошюре SI (Рекомендация 2, см. с. 66).

18-я ГКМВ, 1987 г.

▪ **Предстоящее изменение представлений вольта и ома (**CR, 100 и *Metrologia*, 1988, **25,** 115)

Резолюция 6

18-я Генеральная Конференция по мерам и весам,

принимая во внимание

- что всемирное единообразие и долговременная стабильность национальных воспроизведений электрических единиц очень важны для науки, торговли и промышленности, как с технической, так и экономической точки зрения,
- что многие национальные лаборатории используют эффект Джозефсона и начинают использовать квантовый эффект Холла для поддержания соответственно единиц вольта и ома, поскольку это обеспечивает наилучшие гарантии долговременной стабильности,
- что в связи с важностью когерентности единиц измерений различных физических величин, значения, принятые для этих эталонов, должны как можно точнее согласовываться с SI,
- что результаты недавних и текущих экспериментов позволят установить приемлемые значения, удовлетворительно совместимые с SI, для коэффициентов, которые связывают эти эффекты с соответствующими электрическими единицами,

призывает лаборатории, работы которых могут помочь в определении коэффициента напряжение/частота для эффекта Джозефсона и коэффициента напряжение/ток для квантового эффекта Холла, максимально мобилизовать такие работы и без промедления проинформировать об их результатах МКМВ, и

дает указание МКМВ как можно быстрее рекомендовать значения для этих коэффициентов вместе с датой их одновременного введения в практику во всех странах; эти значения должны быть объявлены, не менее чем за год до их принятия 1 января 1990 г.

МКМВ, 1988 г.

▪ **Представление вольта на основе эффекта Джозефсона** (PV, 56, 44 и *Metrologia*, 1989, *26*, 69)*

* 26-я ГКМВ в 2018 г. (Резолюция 1, см. с. 81) отменила принятие условного значения для K_J.

Рекомендация 1

Международный Комитет мер и весов,

действуя согласно указаниям, данным в Резолюции 6 18-ой ГКМВ о предстоящих изменениях эталонов вольта и ома,

принимая во внимание,

- что тщательное изучение результатов самых последних определений приводит к значению 483 597.9 ГГц/В для константы Джозефсона, K_J, то есть для коэффициента, связывающего частоту и разность потенциалов, соответствующую шагу n = 1 эффекта Джозефсона,
- что эффект Джозефсона, вместе с этим значением K_J, может использоваться для создания эталона сравнения электродвижущей силы, имеющего среднеквадратичную неопределенность воспроизведения вольта, оцениваемую как 4 10^{-7}, и воспроизводимость которого значительно лучше,

рекомендует

- принять 483 597,9 ГГц/В точно в качестве условного значения, обозначаемого K_{J-90} для константы Джозефсона, K_J,
- использовать это новое значение, начиная с 1 января 1990 г., но не ранее, для замены значений, используемых сейчас,
- использовать это новое значение, начиная с этой даты, всеми лабораториями, которые основывают свои измерения электродвижущей силы на эффекте Джозефсона, и
- с того же дня всем другим лабораториям согласовать значения их лабораторных эталонов сравнения с новым принятым значением,

считает, что в обозримом будущем не будет необходимости в изменении этого рекомендованного значения константы Джозефсона, и

обращает внимание лабораторий на то, что новое значение на 3,9 ГГц/В, или на 8 10^{-6}, больше чем значение, данное в 1972 г. Консультативным комитетом по электричеству в Декларации Е-72.

▪ **Представление ома на основе квантового эффекта Холла** (PV, 56, 45 и *Metrologia*, 1989, **26**, 70)*

На 89-ом заседании в 2000 г., МКМВ подтвердил декларацию 22-ого заседания CCEM об использовании значения константы фон Клитцинга.

Рекомендация 2

Международный Комитет мер и весов,

действуя согласно указаниям, данным в Резолюции 6 18-й ГКМВ о предстоящих изменениях эталонов вольта и ома,

* 26-я ГКМВ в 2018 г. (Резолюция 1, см. с. 81) отменила принятие условного значения для K_J.

учитывая,

- что большинство существующих лабораторных эталонов сравнения для сопротивления значительно изменяются со временем,
- что лабораторные эталоны сравнения для сопротивления, основанные на квантовом эффекте Холла, должны быть стабильны и воспроизводимы,
- что детальное изучение результатов последних определений приводит к значению 25 812,807 Ом для константы фон Клитцинга, R_K, то есть для отношения разности потенциалов Холла к току, соответствующему плато $i = 1$ в квантовом эффекте Холла,
- что квантовый эффект Холла, вместе с этим значением R_K, может использоваться для создания эталона сопротивления, имеющего среднеквадратичную неопределенность воспроизведения ома, оцениваемую как $2 \cdot 10^{-7}$, и воспроизводимость которого значительно лучше,

рекомендует

- принять 25 812,807 Ом точно в качестве условного значения, обозначаемого как R_{K-90}, для константы фон Клитцинга, R_K,
- использовать это значение с 1 января 1990 г., но не ранее, во всех лабораториях, основывающих свои измерения сопротивления на квантовом эффекте Холла,
- с того же дня всем другим лабораториям согласовать значения своих лабораторных эталонов сравнения с R_{K-90},
- при использовании квантового эффекта Холла для создания лабораторного эталона сравнения для сопротивления, лабораториям следовать инструкциям самого последнего издания технического руководства по надежным измерениям квантованного сопротивления Холла, разработанного Консультативным комитетом по электричеству и опубликованного Международным бюро мер и весов, и

считает, что в обозримом будущем изменения рекомендованного значения константы фон Клитцинга не потребуется.

МКМВ, 1989 г.

- **Международная температурная шкала 1990 г.** (PV, 57, 115 и *Metrologia*, 1990, **27**, 13)

Рекомендация 5

Кельвин был переопределен на 26-й ГКМВ в 2018 г. (Резолюция 1, см. с. 81).

Международный Комитет мер и весов,

действуя согласно Резолюции 7 18-й ГКМВ (1987), принимает Международную температурную шкалу 1990 г. (МТШ-90), заменяющую Международную практическую температурную шкалу 1968 г. (МПТШ-68).

МКМВ **отмечает** что, по сравнению с МПТШ-68, МТШ-90

- продолжена в область низких температур до 0,65 K, и, следовательно, также заменяет EPT-76 (Предварительную шкалу низких температур 1976 г.),
- существенно лучшее согласована с соответствующими термодинамическими температурами,
- обладает большей непрерывностью, точностью и воспроизводимостью на всем ее интервале и
- имеет подинтервалы и альтернативные определения на некоторых интервалах, что значительно упрощает ее использование.

МКМВ также **отмечает** что, вслед за текстом МТШ-90 были разработаны еще два документа, *Дополнительная информация* по МТШ-90 (*Supplementary Information for ITS-90*) и *Методы аппроксимации МТШ-90 (Techniques for Approximating ITS-90*). Эти документы будут опубликованы МБМВ и будут периодически обновляться.

МКМВ **рекомендует**

- с 1 января 1990 г. вступает в силу МТШ-90 и
  - с той же даты отменяются МПТШ-68 и EPT-76

19-я ГКМВ, 1991 г.

- **Приставки СИ: зетта, зепто, иотта и иокто** (CR, 185 и *Metrologia*, 1992, **29,** 3)

Резолюция 4

19-я Генеральная Конференция по мерам и весам

решает добавить в перечень приставок SI, используемых для кратных и дольных единиц, принятый 11-й ГКМВ, Резолюция 12, параграф 3, 12-й ГКМВ, Резолюция 8

и 15-й ГКМВ, Резолюция 10, следующие приставки:

Множитель	Приставка	Обозначение
10^{21}	зетта	З
10^{-21}	зепто	з
10^{24}	иотта	И
10^{-24}	иокто	и

Названия зепто и зетта получены из септо, соответствующее числу семь (седьмая степень от 10^3) и буква «з» подставлена вместо буквы «с» во избежание двойного использования буквы «с» как обозначения. Названия иокто и иотта образованы от окто, соответствующее числу восемь (восьмая степень от 10^3); буква «и» добавлена во избежание использования буквы «о» как обозначения, поскольку ее можно спутать с числом ноль.

20-я ГКМВ, 1995 г.

- **Отмена класса дополнительных единиц SI** (CR, 223 и *Metrologia*, 1996, **33**, 83)

Резолюция 8

20-я Генеральная Конференция по мерам и весам ,

принимая во внимание,

- что 11-я ГКМВ в 1960 г. в Резолюции 12 по Международной системе единиц разделила единицы SI на три класса: основные единицы, производные единицы и дополнительные единицы, последние включают радиан и стерадиан,
- что статус дополнительных единиц по отношению к основным единицам и производным единицам вызывает споры,
- что МКМВ, в 1980 г., обратив внимание на то, что неоднозначный статус дополнительных единиц нарушает внутреннюю когерентность SI, в своей Рекомендации 1 (CI-1980) интерпретировал дополнительные единицы в SI как безразмерные производные единицы,

одобряя интерпретацию, данную Международным Комитетом в 1980 г.,

постановляет

- рассматривать дополнительные единицы SI, а именно радиан и стерадиан, как безразмерные производные единицы, названия и обозначения которых могут, но не обязательно, использоваться для выражения других производных единиц SI, когда это удобно,
- и, следовательно, отменить класс дополнительных единиц как отдельный класс в SI.

21-я ГКМВ, 1999 г.

- **Определение килограмма** (CR, 331 и *Metrologia*, 2000**, 37,** 94)

Резолюция 7

21-я Генеральная Конференция по мерам и весам,

учитывая

- необходимость обеспечить долговременную стабильность Международной системы единиц (SI),
- естественную неопределенность долговременной стабильности артефакта, определяющего единицу массы, одну из основных единиц SI,
- связанную с этим неопределенность долговременной стабильности других трех основных единиц SI, зависящих от килограмма, а именно, ампера, моля и канделы,

- уже имеющийся прогресс в ряде различных экспериментов, проводимых с целью связать единицу массы с фундаментальными или атомными константами,
- желание иметь более одного способа осуществления такой связи,

рекомендует национальным лабораториям продолжить работы по улучшению экспериментов, которые привязывают единицу массы к фундаментальным или атомным константам, имея в виду будущее переопределение килограмма.

▪ **Специальное название для производной единицы SI моль в секунду, катал, для выражения активности катализатора** (CR, 334-335 и *Metrologia*, 2000, **37**, 95)

Резолюция 12

21-я Генеральная Конференция по мерам и весам,

принимая во внимание

- важность для здоровья и безопасности человека облегчение использования единиц SI в медицине и биохимии,
- что не входящая в SI единица, называемая «единица», обозначение U, равная 1 мкмоль · мин$^{-1}$, которая не когерентна с Международной системой единиц SI, получила широкое распространение в медицине и биохимии, начиная с 1964 г., для выражения активности катализатора,
- что отсутствие специального названия для когерентной производной единицы SI моль в секунду привело к тому, что результаты клинических измерений даются в различных местных единицах,
- что международными союзами соответствующих областей настоятельно рекомендуется использование единиц SI в медицине и клинической химии,
- что Международная федерация клинической химии и лабораторной медицины обращалась с просьбой в Консультативный комитет по единицам рекомендовать специальное название катал, обозначение кат, для единицы SI моль в секунду,
- что хотя увеличение количества специальных наименований представляет угрозу для SI, для случаев, связанных с человеческим здоровьем и безопасностью, делается исключение (15-я Генеральная конференция, 1975 г., Резолюция 8 и 9, 16-я Генеральная конференция, 1979 г., Резолюция 5),

отмечая, что наименование катал, обозначение кат (kat), используется для единицы SI моль в секунду более 30 лет для выражения активности катализатора,

решает принять специальное наименование катал, обозначение кат (kat), для единицы SI, моль в секунду, для выражения активности катализатора, особенно в областях медицины и биохимии,

и **рекомендует,** что при использовании катала, измеряемая величина должна быть определена ссылкой на процедуру измерения; процедура измерения должна идентифицироваться реакцией индикатора.

МКМВ, 2001 г.

▪ **«Единицы SI»** (PV, **69**, 120)

МКМВ в 2001 г. одобрил следующее предложение Консультативного комитета по единицам по поводу единиц SI (англ. “SI units” и “units of the SI”):

“Мы предлагаем рассматривать термин «единицы SI» как понятие, подразумевающее как основные единицы, так и когерентные производные единицы, а также все единицы, полученные добавлением к ним рекомендованных кратных и дольных приставок.

Мы предлагаем использовать название «когерентные единицы СИ», когда желательно ограничить значение только основными единицами и когерентными производными единицами.”

МКМВ, 2002 г.

▪ **Пересмотр практической реализации определения метра** (PV, **70**, 194-204 и *Metrologia*, **40**, 103-133)

Рекомендация 1

Международный Комитет мер и весов,

напоминая,

- что в 1983 г. 17-я ГКМВ приняла новое определение метра;
- что в том же году ГКМВ призвала МКМВ
  - разработать инструкции по практической реализации метра,
  - выбрать излучения, которые могут быть рекомендованы как стандарты длины волны для интерферометрического измерения длины и разработать инструкции по их использованию,
  - продолжать работы по улучшению этих стандартов и со временем расширить или переработать эти инструкции;
- что в соответствии с этим приглашением МКМВ принял Рекомендацию 1 (CI-1983) по практической реализации *(mise en pratique*) определения метра
  - что метр должен воспроизводиться одним из следующих методов:

    (a) посредством длины *l* пути, проходимого плоской электромагнитной волной в вакууме за время *t*; эта длина получается из измеренного времени *t*, с помощью соотношения $l = c_0 \cdot t$ и значения скорости света в вакууме c_0 = 299 792 458 м/с,

    (b) с помощью длины плоской электромагнитной волны с частотой *f* в вакууме λ; эта длина волны получается из измеренной частоты *f* с помощью соотношения $\lambda = c_0/f$ и значения скорости света в вакууме c_0 = 299 792 458 м/с,

    (c) с помощью одного из излучений, перечисленных далее, для которых установленные длина волны в вакууме или частота могут использоваться с указанной неопределенностью, при условии следования данной спецификации и общепринятой надлежащей методике;
  - что во всех случаях вводятся все необходимые поправки для учета реальных условий, таких как дифракция, гравитация или неидеальность вакуума;
  - что в рамках общей теории относительности, метр рассматривается как единица собственной длины. Следовательно, его определение применимо только в достаточно малой области пространства, чтобы можно было пренебречь эффектами неоднородности гравитационного поля (отметим, что на поверхности Земли этот эффект в вертикальном направлении составляет приблизительно $1 \cdot 10^{-16}$ на метр). В этом случае можно учитывать только эффекты специальной теории относительности. Локальные методы воспроизведения метра рекомендованные в (b) и (c) определяют собственный метр, но не обязательно такой же как (a). Поэтому метод (a) следует ограничить длинами *l,* которые достаточно малы, чтобы можно было пренебречь эффектами, предсказываемыми общей теорией относительности, по сравнению с неопределенностью реализации. Для рекомендации по интерпретации измерений, в которых это не так, см. отчет Рабочей группы Консультативного комитета по времени и частоте (CCTF) по применению общей теории относительности в метрологии (Application of general relativity to metrology, *Metrologia*, 1997, **34**, 261-290);
- что МКМВ уже рекомендовала перечень излучений для этой цели;

напоминая также, что в 1992 г. и в 1997 г. МКМВ пересмотрела практическую реализацию определения метра;

учитывая,

- что наука и техника продолжают испытывать необходимость в повышении точности реализации метра;
- что с 1997 г. в результате работ в национальных лабораториях, в МБМВ и в других учреждениях определены новые излучения и способы их воспроизведения, которые дают меньшие неопределенности;

- ускорение движения к оптическому диапазону частот в деятельности, связанной с временной зависимостью, а также продолжение общего увеличения числа приложений рекомендованных излучений *(mise en pratique*), что касается не только размерной метрологии и воспроизведения метра, но и спектроскопии высокого разрешения, атомной и молекулярной физики, фундаментальных констант и телекоммуникаций;
- что ряд новых значений частот с меньшей неопределенностью, для излучений высокостабильных холодных атомных или ионных стандартов, уже приведенных в перечне рекомендованных излучений, сейчас стали доступными, что недавно были измерены частоты излучений некоторых новых видов холодных атомов и ионов, и что были определены новые уточненные значения со значительно уменьшенной неопределенностью для ряда оптических стандартов частоты, на основе газовых ячеек, включая область длин волн, представляющую интерес для оптических телекоммуникаций;
- что новые методы фемтосекундной частотной гребенки имеют очевидную важность для частоты высокостабильных оптических стандартов частоты, для стандарта частоты, реализующего секунду SI, что эти методы представляют собой удобный метод измерения для обеспечения прослеживаемости к Международной системы единиц (SI), и что метод гребенки также может обеспечить источники частоты, а также методику измерений;

признает методы частотных гребенок как современные и подходящие, и рекомендует продолжить исследования до полного понимания потенциала методов;

приветствует подтверждения правильности метода гребенки, осуществляемого в настоящее время, путем сравнения с другими методами частотных цепочек;

советует национальным метрологическим институтам и другим лабораториям довести метод гребенки до наивысшего достижимого уровня точности, а также искать упрощения, которые подтолкнут к широкому применению;

рекомендует

- заменить перечень рекомендованных излучений, данный МКМВ в 1997 г. (Рекомендация 1 (CI-1997)) перечнем излучений, приведенным далее*, содержащим
  - обновленные значения частот холодного атома Ca, атома H и захваченного иона Sr^+,
  - значения частот для новых видов холодных ионов, включая захваченный ион Hg^+, захваченный ион In^+ и захваченный ион Yb^+ ,
  - обновленные значения частот для Rb-стабилизированных лазеров, I_2-стабилизированных Nd:YAG и He-Ne лазеров, CH_4-стабилизированных He-Ne лазеров и OsO_4-стабилизированных CO_2 лазеров на 10 мкм,
  - значения частоты для стандартов, относящихся к полосам оптической связи, включая Rb- и C_2H_2-стабилизированные лазеры.

* Перечень рекомендованных излучений, Рекомендация 1 (CI-2002), приведен в PV, 70, 197-204 и Metrologia, 2003, 40, 104-115.

- **Эквивалентная доза** (PV, **70**, 205)

См. также J. Radiol. Prot., 2005, 25, 97-100.

Рекомендация 2

Международный Комитет мер и весов,

принимая во внимание, что

- современное определение единицы SI эквивалентной дозы (зиверт) включает множитель “*N*” (произведение каких-либо других коэффициентов), установленный Международной комиссией по радиологической защите (ICRP), и
- как и ICRP, так и Международная комиссия по радиационным единицам и измерениям (ICRU) приняли решение удалить этот множитель *N*, так как представляется, что в нем больше нет необходимости, и
- современное определение SI для *H*, включающее множитель *N*, вызывает некоторую путаницу,

решает изменить объяснение в брошюре “Le Système International d'Unités (SI)” на следующее:

Величина эквивалентной дозы *H* равна произведению поглощенной дозы *D* ионизирующего излучения и безразмерного коэффициента *Q* (коэффициент качества), определенного ICRU как функция линейного переноса энергии:

$$H = Q \cdot D.$$

Таким образом, для данного излучения численное значение *H* в джоулях на килограмм может отличаться от значения *D* в джоулях на килограмм в зависимости от величины *Q*.

Далее комитет **решает** оставить последнее предложение в объяснении следующим:

Во избежание возможной путаницы между поглощенной дозой *D* и эквивалентной дозой *H* следует использовать специальные наименования для соответствующих единиц, то есть наименование «грей» следует использовать вместо «килограмм на джоуль» для единицы поглощенной дозы *D*, а наименование «зиверт» – вместо «джоуль на килограмм» для единицы эквивалентной дозы *H*.

МКМВ, 2003 г.

▪ **Пересмотр перечня рекомендованных излучений *Mise en Pratique*** (PV, **71**, 146 и *Metrologia*, 2004, **41**, 99-100)

Рекомендация 1

Международный Комитет мер и весов,

принимая во внимание, что

- недавно стали доступными уточненные значения частот излучений ряда высокостабильных стандартов на холодных ионах, уже включенных в перечень рекомендованных излучений;
- были определены уточненные значения частот для инфракрасного оптического стандарта частоты, основанного на газовой ячейке в оптическом телекоммуникационном диапазоне, уже включенные в перечень рекомендуемых излучений;
- недавно впервые были проведены частотные измерения, основанные на фемтосекундной гребенке, для некоторых газово-камерных йодных стандартов для составления дополнительного перечня рекомендуемых источников, что привело к значительному уменьшению неопределенности;

предлагает пересмотреть перечень *рекомендованных излучений*, и включить в него следующее:

- обновленные значения частот для квадрупольного перехода одиночного захваченного иона $^{88}Sr^{+}$ и октупольного перехода одиночного захваченного иона $^{171}Yb^{+}$;
- обновленное значение частоты C_2H_2-стабилизированного стандарта на 1,54 мкм;
- обновленные значения частот I_2-стабилизированных стандартов на 543 нм и 515 нм.

22-я ГКМВ, 2003 г.

▪ **Обозначение десятичного разделителя** (CR, 381 и *Metrologia*, 2004, **41**, 104)

Резолюция 10

22-я Генеральная Конференция по мерам и весам,

принимая во внимание, что

- основная цель Международной системы единиц (SI) – сделать возможным выражение значений величин легко понятным во всем мире,
- значение величины обычно выражается как число, умноженное на единицу,
- часто числа, выражающие значение величины, являются составными числами, имеющими целую и дробную часть,
- в Резолюции 7 9-й ГКМВ 1948 г., указано, что “в числах, запятая, comma (французское написание) или точка, dot (британское написание) используется только для отделения целой части от дробной”,
- согласно решению Международного Комитета принятому на 86-м заседании (1997 г.), МБМВ сейчас использует точку (на строке) в качестве десятичного разделителя во всех англоязычных версиях своих публикаций, в том числе в англоязычном тексте Брошюры SI (основного международного справочника по СИ), а запятая (на строке) остается десятичным разделителем во всех публикациях на французском языке,

- несмотря на то, что некоторые международные структуры используют запятую на строке как десятичный разделитель в своей документации на английском языке,
- и более того, некоторые международные структуры, в том числе и некоторые международные организации по стандартизации, используют запятую на строке как десятичный разделитель во всех языках,
- предписание использовать запятую на строке в качестве десятичного разделителя во многих языках приводит к конфликту с общепринятым использованием точки на строке, в качестве десятичного разделителя в этих языках,
- в некоторых языках, являющихся национальными для более чем одной страны, в качестве десятичного разделителя используются как точка на строке, так и запятая на строке в зависимости от страны, при этом в некоторых странах, имеющих более одного национального языка, в зависимости от языка используются как точка на строке, так и запятая на строке,

заявляет, что в качестве десятичного разделителя следует использовать или точку на строке или запятую,

повторно подтверждает, что как установлено в Резолюции 7 9-й ГКМВ, 1948 г. “числа могут быть разбиты на группы по три для облегчения прочтения; в пробелы между группами ни точка, ни запятая не ставятся”.

МКМВ, 2005 г.

▪ **Разъяснения определения кельвина, единицы термодинамической температуры** (PV, **93**, 235 и *Metrologia*, 2006, **43**, 177-178)*

* Кельвин был переопределен на 26-й ГКМВ в 2018 г. (Резолюция 1, см. с. 81).

Рекомендация 2

Международный Комитет мер и весов,

учитывая,

- что кельвин, единица термодинамической температуры, определен как 1/273,16 часть температуры тройной точки воды,
- что температура тройной точки воды зависит от относительного количества изотопов водорода и кислорода, присутствующих в используемом образце воды,
- что сейчас этот эффект является главным источником наблюдаемых колебаний разных реализаций тройной точки воды,

принимает решение,

- что определение кельвина относится к воде со специальным изотопным составом,
- что этот состав такой:

  0,00015576 моль ^{2}H на моль ^{1}H,

  0,0003799 моль ^{17}O на моль ^{16}O и

  0,0020052 моль ^{18}O на моль ^{16}O,

который является составом стандартного образца усредненной природной воды Международного агентства по атомной энергии (VSMOW), рекомендованным IUPAC в “Atomic Weights of Elements: Review 2000”.

- что этот состав следует указывать в комментарии к определению кельвина в Брошюре SI следующим образом:

  “Это определение относится к воде, имеющей изотопный состав, точно определенный следующими соотношениями количества вещества: 0,00015576 моль ^{2}H на моль ^{1}H, 0,0003799 моль ^{17}O на моль ^{16}O и 0,0020052 моль ^{18}O на моль ^{16}O”.

▪ **Пересмотр перечня рекомендованных излучений *Mise en pratique*** (PV, **73,** 273 и *Metrologia*, 2006, **43,** 178)

Рекомендация 3

Международный Комитет мер и весов,

принимая во внимание, что

- недавно произошло уточнение значений частот излучений некоторых высокостабильных эталонов на холодных ионах и атомах, уже указанных в перечне рекомендованных излучений;
- определены уточненные значения частот инфракрасных стандартов оптической частоты, основанных на газовых ячейках, в диапазоне оптических телекоммуникаций, уже внесенные в перечень рекомендованных излучений;
- определены уточненные значения частот некоторых йодных газово-камерных эталонов, уже внесенных в дополнительный список рекомендованных источников;
- частотными измерениями, основанными на фемтосекундной гребенке, впервые были определены частоты новых холодных атомов, атомов в ближней инфракрасной области и молекул в диапазоне оптических телекоммуникаций;

принимает решение, что перечень *рекомендованных излучений* следует пересмотреть, включив в него следующее:

- обновленные значения частот квадрупольного перехода одиночного захваченного иона $^{88}Sr^{+}$, квадрупольного перехода одиночного захваченного иона $^{199}Hg^{+}$ и квадрупольного перехода одиночного захваченного иона $^{171}Yb^{+}$;
- новые значения частот для перехода атома Ca;
- новые значения частот для C_2H_2-стабилизированного стандарта на 1,54 мкм;
- новые значения частот для I2-стабилизированного стандарта на 515 нм;
- добавление перехода атома ^{87}Sr на 698 нм;
- добавление двухфотонного перехода атома ^{87}Rb на 760 нм;
- добавление полосы $^{12}C_2H_2$ ($\nu1 + \nu3$) и полос $^{13}C_2H_2$ ($\nu1 + \nu3$) и ($\nu1 + \nu3 + \nu4 + \nu5$) на 1,54 мкм.

МКМВ, 2006 г.

О вторичных представлениях секунды (PV*,* **74,** 249 и *Metrologia*, 2007, **44**, 97)

Рекомендация 1

Международный Комитет мер и весов,

принимая во внимание, что

- следует определить общий перечень «Рекомендуемых значений стандартных частот для приложений, включая практическую реализацию метра и вторичное представление секунды»,
- совместная рабочая группа CCL/CCTF (JWG) по *Mise en Pratique* для определения метра и вторичных представлений секунды на своем заседании в Международном Бюро мер и весов (МБМВ) в сентябре 2005 г. обсудила возможных претендентов на внесение в этот перечень для вторичных представлений секунды,
- Рабочая группа CCL/CCTF на своем заседании в сентябре 2006 г. рассмотрела и обновила значения частот перехода для иона Hg, иона Sr, иона Yb и нейтрального атома Sr,
- CCTF в своей Рекомендации CCTF 1 (2004 г.) уже рекомендовал частоту невозмущенного сверхтонкого квантового перехода в основном состоянии ^{87}Rb как вторичное представление секунды;

рекомендует использовать следующие частоты перехода в качестве вторичного представления секунды и включить их в новый перечень «Рекомендуемые значения стандартных частот для приложений, включая практическую реализацию метра и вторичные представления секунды»

- невозмущенный сверхтонкий квантовый переход основного состояния ^{87}Rb с частотой f^{87}_{Rb} = 6 834 682 610,904 324 Гц и оцененной относительной стандартной неопределенностью 3×10^{-15},
- невозмущенный оптический 5s $^2S_{1/2}$ - 4d $^2D_{5/2}$-переход иона $^{88}Sr^+$ с частотой $f^{88}Sr^+$ = 444 779 044 095 484 Гц и относительной неопределенностью 7×10^{-15},
- невозмущенный оптический переход $5d^{10}$ 6s $^2S_{1/2}$ (F = 0) - $5d^9$ $6s^2$ $^2D_{5/2}$ (F = 2) иона $^{199}Hg^+$ с частотой $f^{199}Hg^+$ = 1 064 721 609 899 145 Гц и относительной стандартной неопределенностью 3×10^{-15},
- невозмущенный оптический переход 6s $^2S_{1/2}$ (F = 0) - 5d $^2D_{3/2}$ (F = 2) иона $^{171}Yb^+$ с частотой $f^{171}Yb^+$ = 688 358 979 309 308 Гц и относительной стандартной неопределенностью 9×10^{-15},
- невозмущенный оптический переход $5s^2$ $^1S_0$ - 5s 5p $^3P_0$ нейтрального атома ^{87}Sr с частотой f^{87}_{Sr} = 429 228 004 229 877 Гц и относительной стандартной неопределенностью $1{,}5 \times 10^{-14}$.

МКМВ, 2007 г.

- **Пересмотренный перечень рекомендованных излучений *Mise en pratique*** (PV, **75,** 185)

Рекомендация 1

Международный Комитет мер и весов,

принимая во внимание, что:

- улучшенные значения частот молекул в диапазоне оптической связи, уже указанные в перечне стандартных частот, определены измерениями частоты с помощью фемтосекундных гребенок;
- частоты молекул в диапазоне оптической связи впервые были определены путем измерения частоты на основе фемтосекундных гребенок;
- частоты конкретных поглощений йодных газовых ячеек, близкие к оптическому стандарту частоты 532 нм, были впервые определены с помощью измерений частоты на основе фемтосекундных гребенок;

предлагает пересмотреть перечень стандартных частот, включив в него следующее:

- обновленный перечень значений частоты для полосы $^{12}C_2H_2$ ($\nu 1 + \nu 3$) на уровне 1,54 мкм;
- добавление значений частоты для полосы $^{12}C_2HD$ ($2_{\nu 1}$) на 1,54 мкм;
- добавление значений частоты для сверхтонких компонентов йодных переходов P(142) 37-0, R(121) 35-0 и R(85) 33-0 при 532 нм.

23-я ГКМВ, 2007

- **О пересмотре Руководства по практической реализации *(Mise en pratique)* определения метра и разработке новых оптических стандартов частоты (CR*,* 431)**

Резолюция 9

23-я Генеральная Конференция по мерам и весам,

принимая во внимание, что:

- произошли быстрые и важные усовершенствования в создании оптических стандартов частоты,
- методы фемтосекундных гребенок теперь обычно используются для соотнесения оптических и микроволновых излучений в одном месте,
- Национальные метрологические институты (NMI) работают над методами сличения оптических стандартов частоты на коротких расстояниях,
- для сравнения оптических стандартов частоты необходимо разработать методы дистанционного сличения на международном уровне,

26-я ГКМВ в 2018 г. (Резолюция 1, см. с. 81) окончательно утвердила пересмотр СИ.

приветствует

- деятельность Объединенной рабочей группы Консультативного комитета по длине и Консультативного комитета по времени и частоте по анализу частот оптических представлений секунды,
- дополнения к *Mise en pratique* для определения метра и к перечню рекомендованных излучений, сделанные Международным комитетом в 2002, 2003, 2005, 2006 и 2007 годах,
- инициативу МБМВ для постановки вопроса о том, как сравнивать оптические стандарты частоты,

рекомендует, чтобы:

- НМИ выделяли ресурсы на разработку оптических стандартов частоты и их сличение,
- МБМВ работало над координацией международного проекта с участием НМИ, ориентированных на исследование методов, которые могли бы служить для сличения оптических стандартов частоты.

- **Уточнение определения кельвина, единицы термодинамической температуры** (CR, 432)

* Кельвин был переопределен на 26-й ГКМВ в 2018 г. (Резолюция 1, см. с. 81).

Резолюция 10

23-я Генеральная Конференция по мерам и весам,

принимая во внимание,

- что кельвин, единица термодинамической температуры, определяется как 1/ 273,16 часть термодинамической температуры тройной точки воды,
- что температура тройной точки зависит от относительного количества изотопов водорода и кислорода, присутствующих в образце используемой воды,
- что этот эффект в настоящее время является одним из основных источников наблюдаемой изменчивости между различными реализациями тройной точки воды,

обращает внимание и приветствует решение МКМВ в октябре 2005 года по рекомендации Консультативного комитета по термометрии о том, что

- определение кельвина относится к воде определенного изотопного состава,
- этот состав:

  0,000 155 76 моль ^{2}H на моль ^{1}H,

  0,000 379 9 моль ^{17}O на моль ^{16}O, и

  0,002 005 2 моль ^{18}O на моль ^{16}O,

который является составом стандартного образца усредненной природной воды Международного агентства по атомной энергии (VSMOW), как это рекомендовано Международным союзом теоретической и прикладной химии в "Атомных весах элементов: обзор 2000, Atomic Weights of Elements: Review 2000",

- этот состав следует указывать в комментарии к определению кельвина в Брошюре SI следующим образом:

  «Данное определение относится к воде, имеющей изотопный состав, определяемый соотношениями количества вещества: 0,00015576 моль ^{2}H на моль ^{1}H, 0,0003799 моль ^{17}O на моль ^{16}O и 0,0020052 моль ^{18}O на моль ^{16}O".

- **О возможном переопределении некоторых основных единиц Международной системы единиц (СИ) (**CR, 434**)**

Резолюция 12

23-я Генеральная Конференция по мерам и весам,

принимая во внимание,

- что в течение многих лет национальные метрологические институты (NMI), а также МБМВ прилагали значительные усилия для развития и совершенствования Международной системы единиц (SI) путем расширения границ метрологии с тем, чтобы основные единицы SI могли быть определены на основе инвариантов природы – фундаментальных физических константах,
- что из семи основных единиц SI только килограмм по-прежнему определяется с точки зрения материального артефакта - международного прототипа килограмма (2-я ГКМВ, 1889 г., 3-я ГКМВ, 1901 г.) и что определения ампера, моля и канделы зависят от килограмма,
- Резолюцию 7 21-й ГКМВ (1999 г.), в которой рекомендовано, чтобы «национальные лаборатории продолжали свои усилия по уточнению экспериментов, связывающих единицу массы с фундаментальными или атомными константами с целью будущего переопределения килограмма»,
- многочисленные успехи, достигнутые в последние годы, в экспериментах, связывающих массу международного прототипа с постоянной Планка h или постоянной Авогадро N_A,
- инициативы по определению значения ряда соответствующих фундаментальных констант, включая работу по переопределению постоянной Больцмана, k_B,
- что в результате достигнутых успехов имеются значительные положительные последствия для, и потенциальные преимущества от переопределения килограмма, ампера, кельвина и моля,
- Рекомендацию 1 Международного Комитета (C1-2005) заседания в октябре 2005 г. и различные Рекомендации Консультативных комитетов по вопросу переопределения одной или нескольких основных единиц SI,

отмечая,

- что любые изменения в определениях единиц SI должны быть ограничены непротиворечивостью,
- желательно, чтобы определения основных единиц были легко понимаемы,
- работу Международного Комитета и Консультативных комитетов,
- необходимость мониторинга результатов соответствующих экспериментов,
- важность получения комментариев и предложений от более широкого научного сообщества и сообщества пользователей, и
- решение Международного Комитета 2005 года об одобрении, в принципе, подготовки новых определений килограмма, ампера, кельвина и возможности переопределения моля,

рекомендует Национальным институтам метрологии и МБМВ

- проводить соответствующие эксперименты с тем, чтобы Международный Комитет смог бы приблизиться к мнению о возможности переопределения килограмма, ампера, кельвина и моля, используя фиксированные значения фундаментальных констант во время 24-й ГКМВ (2011 г.),
- вместе с Международным Комитетом, его Консультативными комитетами и соответствующими рабочими группами разработать практические способы реализации любых новых определений, основанных на фиксированных значениях фундаментальных констант, подготовить для каждого из них *mise en pratique* и рассмотреть наиболее подходящий способ объяснения новых определений пользователям,
- инициировать информационные кампании для предупреждения общества о возможности переопределений и о внимательном обсуждении и рассмотрении технических и законодательных последствий таких переопределений и их практической реализации,

и призывает Международный Комитет представить доклад по этим вопросам на 24-й Генеральной Конференции в 2011 году, и выполнить все необходимые подготовительные работы, с тем чтобы, если результаты экспериментов будут признаны достаточными, и удовлетворяющими потребности пользователей, то официальные предложения об изменениях в определениях килограмма, ампера, кельвина и моля можно будет представить на 24-ю ГКМВ.

МКМВ, 2009 г.

- **Обновления к перечню стандартных частот (**PV**, 77,** 235**)**

Рекомендация 2

Международный Комитет мер и весов,

учитывая, что

- создан общий перечень «Рекомендуемых значений стандартных частот для приложений, включая практическую реализацию метра и вторичных представлений секунды».
- Рабочая группа CCL-CCTF по стандартным частотам (FSWG) рассмотрела несколько весьма перспективных вариантов для включения в перечень;

рекомендует,

что в перечень рекомендуемых стандартных частот должны быть внесены или обновлены следующие частоты перехода:

- невозмущенный оптический переход $5s^2\ {}^1S_0$ - $5s\ 5p\ {}^3P_0$ нейтрального атома ^{87}Sr с частотой f = 429 228 004 229 873,7 Гц и относительной стандартной неопределенностью 1×10^{-15} (это излучение уже подтверждено МКМВ как вторичное представление секунды);
- невозмущенный оптический переход $5s^2\ {}^1S_0$ - $5s\ 5p\ {}^3P_0$ нейтрального атома ^{88}Sr с частотой f = 429 228 066 418 012 Гц и относительной стандартной неопределенностью 1×10^{-14};
- невозмущенный оптический переход $4s\ {}^2S_{1/2}$ - $3d\ {}^2D_{5/2}$ иона $^{40}Ca^+$ с частотой f = 411 042 129 776 393 Гц и относительной стандартной неопределенностью 4×10^{-14};
- невозмущенный оптический переход ${}^2S_{1/2}$ (F = 0) - ${}^2F_{7/2}$ (F = 3, m_F = 0) иона $^{171}Yb^+$ с частотой f = 642 121 496 772 657 Гц и относительной стандартной неопределенностью 6×10^{-14};
- невозмущенный оптический переход $6s^2\ {}^1S_0$ (F = 1/2) - $6s\ 6p\ {}^3P_0$ (F = 1/2) нейтрального атома ^{171}Yb с частотой f = 518 295 836 590 864 Гц и относительной стандартной неопределенностью $1{,}6\times10^{-13}$.

24-я ГКМВ, 2011

- **О возможном будущем пересмотре Международной системы единиц SI (**CR, 532**)**

Резолюция 1

Генеральная Конференция по мерам и весам,

принимая во внимание

- международный консенсус относительно важности, полезности и потенциальных преимуществ переопределения ряда единиц Международной системы единиц (SI),
- что национальные метрологические институты (НМИ), а также МБМВ в течение последних нескольких десятилетий обоснованно приложили значительные усилия для развития Международной системы единиц (SI) путем расширения границ метрологии, с тем, чтобы можно было определить основные единицы SI с точки зрения естественных инвариантов - фундаментальных физических констант или свойств атомов,
- что ярким примером успеха таких усилий является текущее определение единицы длины SI, метра (17-е заседание ГКМВ, 1983 г., Резолюция 1), которое связывает его с точным значением скорости света в вакууме, c, а именно 299 792 458 метров в секунду,
- что из семи основных единиц SI, только килограмм все еще определяется на основе материального артефакта, а именно, международного прототипа килограмма (1-е заседание ГКМВ, 1889 г., 3-е заседание ГКМВ, 1901 г.), и что определения ампера, моля и канделы зависят от килограмма,
- несмотря на то, что международный прототип хорошо послужил науке и технике, поскольку он был утвержден ГКМВ на ее 1-м заседании в 1889 г., он имеет ряд существенных ограничений, одним из наиболее значительных является то, что его масса явно не привязана к естественному инварианту и, следовательно, его долгосрочная стабильность не обеспечивается,
- что ГКМВ на своем 21-м заседании в 1999 году приняла Резолюцию 7, в которой рекомендовала «национальным лабораториям продолжать свои усилия по совершенствованию экспериментов по привязке единицы массы к фундаментальным или атомным константам с целью будущего переопределения килограмма»,

- что в последние годы были достигнуты значительные успехи по привязке массы международного прототипа к постоянной Планка *h,* которые осуществляются методами, включающими ватт-весы и измерения массы атома кремния,
- что неопределенности всех электрических единиц СИ, реализованных прямо или косвенно с помощью эффектов Джозефсона и квантового Холла вместе со значениями SI констант Джозефсона и фон Клитцинга K_J и R_K, могут быть значительно уменьшены, если переопределить килограмм, чтобы быть привязанным к точному численному значению *h*, и если ампер переопределить так, чтобы быть привязанным к точному численному значению элементарного заряда *e,*
- что кельвин в настоящее время определяется с точки зрения внутренних свойств воды, которые, хотя и являются инвариантом природы, на практике зависят от чистоты и изотопного состава используемой воды,
- что возможно переопределить кельвин так, чтобы он был связан с точным численным значением постоянной Больцмана *k*,
- что также возможно переопределить моль так, чтобы он был связан с точным численным значением постоянной Авогадро N_A, и, больше не зависел от определения килограмма, даже если килограмм определен так, что он привязан к точному численному значению *h*, подчеркивая, тем самым, разницу между количеством вещества и массой,
- что неопределенности значений многих других важных фундаментальных констант и коэффициентов преобразования энергии будут исключены или значительно уменьшены, если *h*, *e, k* и N_A будут иметь точные численные значения при выражении в единицах СИ,
- что Генеральная Конференция на своем 23-м заседании в 2007 году приняла Резолюцию 12, в которой она наметила работу, необходимую выполнить НМИ, МБМВ и МКМВ вместе со своими Консультативными комитетами (CCs), с тем, чтобы можно было принять новые определения килограмма, ампера, кельвина и моля на основе фундаментальных констант,
- что, хотя эта работа продвигается хорошо, не были выполнены все требования, изложенные в Резолюции 12, принятой Генеральной Конференцией на ее 23-м заседании в 2007 году, и поэтому МКМВ еще не готов сделать окончательное предложение,
- тем не менее, теперь можно представить четкое и подробное объяснение того, что может быть предложено,

обращает внимание на намерение МКМВ предложить пересмотр SI следующим образом:

- Международная система единиц, СИ, должна стать системой единиц, в которой:
  - частота сверхтонкого расщепления основного состояния атома цезия-133 $\Delta\nu(^{133}\mathrm{Cs})_{\mathrm{hfs}}$ равна точно 9 192 631 770 герц,
  - скорость света в вакууме *c* равна точно 299 792 458 метров в секунду,
  - постоянная Планка *h* равна точно 6,62606X × 10^{-34} джоулей на секунду*,
  - элементарный заряд *e* составляет ровно 1,60217X × 10^{-19} кулонов,
  - постоянная Больцмана *k* составляет ровно 1,3806X × 10^{-23} Дж за кельвин,
  - постоянная Авогадро N_A составляет точно 6,02214X × 10^{23} обратный моль,
  - световая эффективность $K_{KД}$ монохроматического излучения частотой 540 × 10^{12} Гц составляет ровно 683 люмена за ватт,

Знак X, появляющийся в выражении констант, указывает, что эта цифра была неизвестна во время составления резолюции.

где

(i) герц, джоуль, кулон, люмен и ватт с обозначениями единиц Гц, Дж, Кл, лм и Вт, соответственно, связаны с единицами измерения: секунда, метр, килограмм, ампер, кельвин, моль, и кандела, с обозначениями единиц с, м, кг, А, К, моль и кд соответственно, согласно Гц = $с^{-1}$, Дж = $м^2$ кг $с^{-2}$, Кл = с А, лм = кд $м^2$ $м^{-2}$ = кд ср и Вт = $м^2$ кг $с^{-3}$,

(ii) символ X в данном проекте Резолюции представляет одну или несколько дополнительных цифр, которые необходимо добавить к численным значениям *h*, *e*, *k* и N_A, используя значения, основанные на самой последней корректировке CODATA;

из которой следует, что SI будет по-прежнему иметь существующий набор из семи основных единиц, в частности,

- килограмм по-прежнему будет единицей массы, но его величина должна быть установлена путем фиксирования численного значения постоянной Планка, равного точно 6,62606X × 10^{-34}, при выражении в единице SI, $м^2$ кг $с^{-1}$, что равно Дж с,
- ампер по-прежнему будет единицей электрического тока, но его величина будет установлена путем фиксации численного значения элементарного заряда, равного точно 1,60217X × 10^{-19}, при выражении в единице SI, с А, который равен Кл,
- Кельвин по-прежнему будет единицей термодинамической температуры, но его величина будет установлена путем фиксирования численного значения постоянной Больцмана, равного точно 1,3806X × 10^{-23}, когда оно выражается в единице SI, $м^2$ кг $с^{-2}$ $К^{-1}$, что равно Дж $К^{-1}$,
- моль останется единицей количества вещества определенного элементарного объекта, которым может быть атом, молекула, ион, электрон, любая другая частица или указанная группа таких частиц, но ее величина будет установлена путем фиксирования численного значения постоянной Авогадро, которое будет точно равна 6,02214X × 10^{23}, когда она выражается в единицах SI $моль^{-1}$.

Генеральная Конференция по мерам и весам

далее отмечает, что, поскольку

- новые определения килограмма, ампера, кельвина и моля предназначены стать константами явного типа, то такие определения, в которых единица определяется косвенно, путем явного указания точного значения общепризнанной фундаментальной константы,
- существующее определение метра привязано к точному значению скорости света в вакууме, которое также является общепризнанной фундаментальной константой,
- существующее определение секунды привязано к точному значению четко определенного свойства атома цезия, которое также является инвариантом природы,
- хотя существующее определение канделы не привязано к фундаментальной константе, его можно рассматривать как связанное с точным значением естественного инварианта,
- если бы все основные единицы Международной системы имели аналогичные формулировки, это повысило бы их доступность для понимания,

Международный комитет мер и весов также предложит

переформулировать существующие определения секунды, метра и канделы в полностью эквивалентные формы, которые могут быть следующими:

- секунда, обозначение с, есть единица времени; ее величина устанавливается путем фиксирования численного значения частоты сверхтонкого расщепления основного состояния атома цезия-133 в состоянии покоя и при температуре 0 К, равного точно 9 192 631 770, когда оно выражается в единицах SI $с^{-1}$, что равно Гц,
- метр, обозначение м, есть единица длины; et величина устанавливается путем фиксирования численного значения скорости света в вакууме равным точно 299 792 458, когда оно выражается в единицах SI, м $с^{-1}$,
- кандела, обозначение кд, есть единица силы света в данном направлении; ее величина устанавливается путем фиксирования численного значения световой эффективности монохроматического излучения с частотой 540 × 10^{12} Гц, равным точно 683, при выражении в единицах SI, $м^{-2}$ $кг^{-1}$ $с^3$, кд ср или кд ср $Вт^{-1}$, что равно лм $Вт^{-1}$.

Таким образом, определения всех семи основных единиц будут естественным образом проистекать из набора семи констант, приведенного выше.

Вследствие этого, на дату, выбранную для введения в действие пересмотра SI:

- определение килограмма, действующего с 1889 г., исходящее из массы международного прототипа килограмма (1-е заседание ГКМВ, 1889 г., 3-е заседание ГКМВ, 1901) будет отменено,

- определение ампера, действующее с 1948 г. (9-е заседание ГКМВ, 1948 г.), основанное на определении, предложенном Международным комитетом (МКМВ, 1946 г., Резолюция 2), будет отменено,
- условные значения константы Джозефсона K_{J-90} и константы фон Клитцинга R_{K-90}, принятые Международным комитетом (МКМВ, 1988 г., Рекомендации 1 и 2) по просьбе Генеральной конференции (18-е заседание ГКМВ, 1987 г. Резолюция 6) для установления представлений вольта и ома с использованием эффектов Джозефсона и квантового Холла, соответственно, будут отменены,
- определение кельвина, действующее с 1967/68 г. (13-е заседание ГКМВ, 1967/68 гг., резолюция 4), основанное на менее четком, более раннем определении (10-е заседание ГКМВ, 1954 г., резолюция 3), будет отменено,
- определение моля, действующее с 1971 г. (14-е заседание ГКМВ, 1971 г., Резолюция 3), основанное на определении, согласно которому молярная масса углерода-12 имела точное значение 0,012 кг моль$^{-1}$, будет отменено,
- существующие определения метра, секунды и канделы, действующие с момента их принятия ГКМВ на 17-м (1983 г., Резолюция 1), 13-м (1967/68 гг., Резолюция 1) и 16-м (1979 г., Резолюция 3) заседаниях, соответственно, будут отменены.

Генеральная Конференция по мерам и весам

далее отмечает, что на ту же дату

- масса международного прототипа килограмма *m(K)* будет составлять 1 кг, но с относительной неопределенностью, равной таковой рекомендуемого значения *h* непосредственно перед переопределением, и что впоследствии это значение будет определено экспериментально,
- магнитная постоянная (проницаемость вакуума) μ_0 будет составлять $4\pi \times 10^{-7}$ H m $^{-1}$, но с относительной неопределенностью, равной таковой рекомендуемого значения постоянной тонкой структуры альфа, и что впоследствии это значение будет определяться экспериментально,
- термодинамическая температура тройной точки воды T_{TPW} будет 273,16 К, но с относительной неопределенностью, равной таковой рекомендуемого значения *k* непосредственно перед переопределением, и что впоследствии это значение будет определено экспериментально,
- молярная масса углерода 12 *M* (^{12}C) составит 0,012 кг моль $^{-1}$, но с относительной неопределенностью, равной таковой рекомендуемого значения $N_A h$ непосредственно перед переопределением, и что впоследствии это значение будет определено экспериментально.

Генеральная Конференция по мерам и весам

призывает

- исследователей в национальных метрологических институтах, МБМВ и в академических учреждениях продолжить свои усилия и доводить до сведения научного сообщества в целом и CODATA, в частности, результаты своей работы, относящиеся к определению констант *h, e, k* и N_A, и
- МБМВ продолжить свою работу, касающуюся прослеживаемости прототипов, которые она поддерживает, к международному прототипу килограмма, и в разработке комплекта эталонов сравнения для облегчения распространения единицы массы после переопределения,

просит

- CODATA продолжать предоставление скорректированных значений фундаментальных физических констант на основе всей имеющейся релевантной информации и доводить результаты до сведения Международного Комитета через его Консультативный комитет по единицам, поскольку эти значения и неопределенности CODATA следует использовать для пересмотренной SI,
- МКМВ внести предложение о пересмотре SI, как только будут выполнены рекомендации Резолюции 12 23-го заседания ГКМВ, в частности, подготовка *mises en pratique* для новых определений килограмма, ампера, кельвина и моля,

- МКМВ продолжить свою работу над улучшенными формулировками для определений основных единиц SI на основе фундаментальных констант, осуществляя, насколько это возможно, более понятное описание для пользователей в целом, в соответствии с научной строгостью и ясностью,
- МКМВ, Консультативные комитеты, МБМВ, МОЗМ и Национальные метрологические институты значительно активизировать свои усилия по инициированию информационных кампаний, направленных на ознакомление сообществ пользователей и широкой общественности о намерении пересмотреть различные единицы SI и поощрять рассмотрение практических, технических и законодательных последствий таких переопределений, чтобы можно было получать комментарии и отзывы от более широкого научного сообщества и пользователей.

▪ **О пересмотре *mise en pratique* для метра и разработке новых оптических стандартов частоты (**CR, 546)

Резолюция 8

Генеральная Конференция по мерам и весам,

принимая во внимание, что

- произошли быстрые и важные положительные сдвиги в оценке параметров оптических стандартов частоты,
- национальные метрологические институты работают над методами сличения оптических стандартов частоты на коротких расстояниях,
- необходимо разработать методы дистанционного сличения на международном уровне, чтобы можно было сравнивать оптические стандарты частоты,

приветствует

- деятельность совместной рабочей группы CCTF (Консультативного комитета по времени и частоте) и CCL (Консультативного комитета по длине) по анализу частот оптических представлений секунды,
- дополнения, сделанные МКМВ в 2009 году, к общему перечню «Рекомендуемых значений стандартных частот для приложений, включая практическую реализацию метра и вторичных представлений секунды»,
- создание рабочей группы CCTF по координации разработки передовых методов передачи времени и частоты,

рекомендует

- НМИ выделить ресурсы на разработку оптических стандартов частоты и их сличение,
- МБМВ поддерживать координацию международного проекта с участием НМИ, ориентированного на исследование методов, которые могут служить для сличения оптических стандартов частоты.

МКМВ, 2013 г.

Обновления к перечню стандартных частот (PV, **81,** 144**)**

Рекомендация 1

Международный Комитет мер и весов,

учитывая, что

- составлен общий перечень «Рекомендуемых значений стандартных частот для приложений, включая практическую реализацию метра и вторичных представлений секунды»,
- Рабочая группа по стандартным частотам CCL-CCTF (FSWG) рассмотрела несколько вариантов для включения в перечень,

рекомендует внести следующие изменения в перечень «Рекомендуемых значений стандартных частот для приложений, включая практическую реализацию метра и вторичных представлений секунды»:

- добавить в перечень следующую частоту перехода:
  - невозмущенный оптический переход $6s^2\ 1S_0 – 6s\ 6p\ ^3P_0$ нейтрального атома ^{199}Hg с частотой 1 128 575 290 808 162 Гц и оцененной относительной стандартной неопределенностью $1{,}7 \times 10^{-14}$;

26-я ГКМВ в 2018 г. (Резолюция 1, см. с. 81) окончательно утвердила пересмотр СИ.

- обновить в перечне следующие частоты перехода:
  - невозмущенный оптический переход $4s\ ^2S_{1/2} – 3d\ ^2D_{5/2}$ иона $^{40}Ca^+$ с частотой 411 042 129 776 395 Гц и оцененной относительной стандартной неопределенностью $1{,}5 \times 10^{-14}$;
  - невозмущенный оптический переход 1S – 2S нейтрального атома ^1H с частотой 1 233 030 706 593 518 Гц и оцененной относительной стандартной неопределенностью $1{,}2 \times 10^{-14}$;

Примечание: Данная частота соответствует половине разности энергий между состояниями 1S и 2S;

- обновить в перечне следующие частоты переходов и одобрить как вторичные представления секунды:
  - невозмущенный оптический переход $6s\ ^2S_{1/2} – 4f\ ^{13}6s^2\ ^2F_{7/2}$ иона $^{171}Yb^+$ (октуполь) с частотой 642 121 496 772 645,6 Гц и оцененной относительной стандартной неопределенностью $1{,}3 \times 10^{-15}$;
  - невозмущенный оптический переход $6s^2\ ^1S_0 – 6s\ 6p\ ^3P_0$ нейтрального атома 171Yb с частотой 518 295 836 590 865,0 Гц и оцененной относительной стандартной неопределенностью $2{,}7 \times 10^{-15}$;
- добавить следующую частоту перехода в перечень и в качестве вторичного представления секунды:
  - невозмущенный оптический переход $3s^2\ ^1S_0 – 3s\ 3p\ ^3P_0$ иона $^{27}Al^+$ с частотой 1 121 015 393 207 857,3 Гц и оцененной относительной стандартной неопределенностью $1{,}9 \times 10^{-15}$;
- обновить следующие частоты перехода в перечне и одобрить как вторичные представления секунды:
  - невозмущенный оптический переход $5d\ ^{10}6s\ ^2S_{1/2} – 5d\ ^9 6s^2\ ^2D_{5/2}$ иона $^{199}Hg^+$ с частотой 1 064 721 609 899 145,3 Гц и оцененной относительной стандартной неопределенностью $1{,}9 \times 10^{-15}$;
  - невозмущенный оптический переход $6s\ ^2S_{1/2}\ (F = 0,\ m_F = 0) - 5d\ ^2D_{3/2}\ (F = 2,\ m_F = 0)$ иона $^{171}Yb^+$ (квадрупольный) с частотой 688 358 979 309 307,1 Гц и оцененной относительной стандартной неопределенностью 3×10^{-15};
  - невозмущенный оптический переход $5s\ ^2S_{1/2} – 4d\ ^2D_{5/2}$ иона $^{88}Sr^+$ с частотой 444 779 044 095 485,3 Гц и оцененной относительной стандартной неопределенностью $4{,}0 \times 10^{-15}$;
  - невозмущенный оптический переход $5s^2\ ^1S_0 – 5s5p\ ^3P_0$ нейтрального атома 87Sr с частотой 429 228 004 229 873,4 Гц и оцененной относительной стандартной неопределенностью 1×10^{-15};
- обновить следующую частоту перехода как вторичное представление секунды:
  - невозмущенный сверхтонкий переход из основного состояния ^{87}Rb с частотой 6 834 682 610,904 312 Гц и оцененной относительной стандартной неопределенностью $1{,}3 \times 10^{-15}$.

Примечание: Предполагается, что значение оцененной стандартной неопределенности соответствует доверительному уровню 68%. Однако, учитывая очень ограниченное количество доступных данных, существует вероятность, что в ретроспективе это может оказаться не точным.

25-я ГКМВ, 2014 г.

- **О будущем пересмотре Международной системы единиц, SI (**CR, 416 и *Metrologia,* 2015, **52,** 155**)**

Резолюция 1

Генеральная Конференция по мерам и весам,

ссылаясь на

- Резолюцию 1, принятую ГКМВ на ее 24-м заседании (2011 г.), в которой отмечается намерение МКМВ предложить пересмотр SI, привязывающий определения килограмма, ампера, кельвина и моля к точным численным значениям постоянной Планка *h*, элементарного заряда *e*, постоянной Больцмана *k* и постоянной Авогадро N_A, соответственно, и пересматривающий направление определения SI, включая формулировку определений единиц SI для времени, длины, массы, электрического тока, термодинамической температуры, количества вещества и силы света, с тем, чтобы отчетливо были выражены референтные (опорные) константы, на которых основана SI,
- многочисленные преимущества, приведенные в Резолюции 1, которые наука, техника, промышленность и торговля получат от такого пересмотра, особенно от привязки килограмма к естественной постоянной, а не к массе материального артефакта, обеспечивая, тем самым его долгосрочное действие и стабильность,
- Резолюцию 7, принятую ГКМВ на ее 21-м заседании (1999 г.), которая поощряет работу в национальных метрологических институтах (НМИ), способную привести к такому переопределению килограмма,
- Резолюцию 12, принятую ГКМВ на ее 23-м заседании (2007 г.), в которой описывается работа, необходимую выполнить НМИ, МБМВ и МКМВ вместе с его Консультативными комитетами (КК), что позволит ГКМВ утвердить запланированный пересмотр SI,

Дальнейшие обновления доступны на вебсайте МБМВ.

учитывая, достигнутый значительный прогресс в завершении необходимой работы, в том числе

- получение соответствующих данных и их анализ Комитетом по данным для науки и техники (CODATA) для получения требуемых значений *h, e, k* и N_A,
- создание в МБМВ набора эталонных стандартов массы для содействия распространению единицы массы в пересмотренной SI,
- подготовку *mises-en-pratique* для новых определений килограмма, ампера, кельвина и моля,

отмечая, что дальнейшая работа Консультативного комитета по единицам (CCU), МКМВ, МБМВ, NMIs и CCs должна быть сосредоточена на

- информационных кампаниях для оповещения пользователей и широкой общественности о предлагаемом пересмотре SI,
- подготовке 9-го издания Брошюры по SI, в которой пересмотренная SI представлена таким образом, чтобы могла быть понятна разнообразным читателям, без ущерба для научной строгости,

что, несмотря на этот прогресс, для утверждения пересмотренной SI на своем 25-м заседании, данные еще не кажутся достаточно надежными для ГКМВ,

настоятельно рекомендует

- продолжать напряженную работу в Национальных метрологических институтах, МБМВ и академических учреждениях для получения данных, имеющих отношение к определению *h, e, k* и N_A с необходимой неопределенностью,
- НМИ продолжить обсуждать и анализировать эти данные в Консультативных комитетах,
- МКМВ продолжить в Консультативных комитетах, в том числе в Консультативном комитете по единицам, разработку плана по выработке пути для выполнения Резолюции 1, принятой ГКМВ на ее 24-м заседании (2011 г.), а также
- продолжить деятельность МКМВ, вместе с его консультативными комитетами, НМИ, МБМВ и другими организациями, такими как МОЗМ, для завершения всей работы, необходимой для принятия резолюции ГКМВ на 26-м заседании, которая заменит существующую SI пересмотренной, при условии наличия удовлетворительного количества данных, их приемлемой неопределенности и достаточного уровня согласованности.

МКМВ, 2015 г.

- **Обновления в перечне стандартных частот** (PV, **83**, 207)

Рекомендация 2

Международный Комитет мер и весов,

принимая во внимание, что

- составлен общий перечень «Рекомендуемых значений стандартных частот для приложений, включая практическую реализацию метра и вторичных представлений секунды»,
- Рабочая группа по стандартам частоты CCL-CCTF (WGFS) рассмотрела несколько вариантов для обновления перечня и

рекомендует

обновить следующие частоты перехода в перечне рекомендуемых значений стандартных частот:

- невозмущенный оптический переход $6s^2\ {}^1S_0$ – $6s6p\ {}^3P_0$ нейтрального атома ^{199}Hg с частотой f_{199Hg} = 1 128 575 290 808 154,8 Гц и оцененной относительной стандартной неопределенностью 6×10^{-16};
- невозмущенный оптический переход $6s\ {}^2S_{1/2}$ – $4f^{13}\ 6s^2\ {}^2F_{7/2}$ иона $^{171}Yb^+$ с частотой f_{171Yb+} (октуполь) = 642 121 496 772 645,0 Гц и оцененной относительной стандартной неопределенностью 6×10^{-16} (данное излучение уже подтверждено МКМВ в качестве вторичного представление секунды);
- невозмущенный оптический переход $6s\ {}^2S_{1/2}$ (F = 0, m_F = 0) - $5d\ {}^2D_{3/2}$ (F = 2, m_F = 0) иона $^{171}Yb^+$ с частотой f_{171Yb+} (квадрупольный) = 688 358 979 309 308,3 Гц и
- оцененной относительной стандартной неопределенностью 6×10^{-16} (это излучение уже подтверждено МКМВ как вторичное представление секунды);
- невозмущенный оптический переход $5s\ {}^2S_{1/2}$ – $4d\ {}^2D_{5/2}$ иона $^{88}Sr^+$ с частотой f_{88Sr+} = 444 779 044 095 486,6 Гц и оцененной относительной стандартной неопределенностью $1,6 \times 10^{-15}$ (данное излучение уже подтверждено МКМВ как вторичное представление секунды);
- невозмущенный оптический переход $4s\ {}^2S_{1/2}$ – $3d\ {}^2D_{5/2}$ иона $^{40}Ca^+$ с частотой f_{40Ca+} = 411 042 129 776 398,4 Гц и оцененной относительной стандартной неопределенностью $1,2 \times 10^{-14}$;
- невозмущенный оптический переход 1S – 2S нейтрального атома 1H с частотой f_{1H} = 1 233 030 706 593 514 Гц и оцененной относительной стандартной неопределенностью 9×10^{-15}.

Примечание: эта частота соответствует половине разности энергий между состояниями 1S и 2S;

- невозмущенный оптический переход $5s^2\ {}^1S_0$ – $5s5p\ {}^3P_0$ нейтрального атома ^{87}Sr с частотой f_{87Sr} = 429 228 004 229 873,2 Гц и оцененной относительной стандартной неопределенностью 5×10^{-16} (это излучение уже подтверждено МКМВ как вторичное представление секунды);
- невозмущенный оптический переход $6s^2\ {}^1S_0$ – $6s6p\ {}^3P_0$ нейтрального атома ^{171}Yb с частотой f_{171Yb} = 518 295 836 590 864,0 Гц и оцененной относительной стандартной неопределенностью 2×10^{-15} (данное излучение уже подтверждено МКМВ как вторичное представление секунды);
- невозмущенный сверхтонкий переход основного состояния ^{87}Rb с частотой f_{87Rb} = 6 834 682 610,904 310 Гц и оцененной относительной стандартной неопределенностью 7×10^{-16} (это излучение уже подтверждено МКМВ как вторичное представление секунды).

а также **рекомендует**

что следующие частоты перехода должны быть внесены в перечень рекомендуемых значений стандартных частот:

- Поглощающая молекула $^{127}I_2$, компонент насыщенного поглощения a_1, переход R (36) 32-0.

Значения f_{a1} = 564 074 632,42 МГц

λ_{a1} = 531 476 582,65 fm

с оцененной относительной стандартной неопределенностью 1×10^{-10} применяют к излучению двухчастотного диодного DFB-лазера, стабилизированного с помощью йодной ячейки, внешней по отношению к лазеру.

- Поглощающий атом ^{87}Rb $5S_{1/2}$ - $5P_{3/2}$ переход между сверхтонкими компонентами d и f насыщенного поглощения при 780 нм (переход D2)

Значения $f_{d/f\ crossover}$ = 384 227 981,9 MHz
$\lambda_{d/fcrossover}$ = 780 246 291,6 fm

с оцененной относительной стандартной неопределенностью 5×10^{-10} применяются к излучению перестраиваемого диодного лазера с внешней полостью, стабилизированного к переходу d/f в рубидиевой ячейке, внешней по отношению к лазеру.

Примечание: Предполагается, что значение стандартной неопределенности соответствует уровню достоверности 68%. Однако, учитывая ограниченную доступность данных, существует вероятность, что по прошествии времени это может оказаться не совсем точным.

МКМВ, 2017 г.

- **О прогрессе в деле возможного переопределения SI** (PV, **85**, 101)

Решение 10

Международный Комитет мер и весов приветствовал рекомендации от его Консультативных комитетов о переопределения СИ.

МКМВ отметил, что согласованные условия для переопределения в настоящее время удовлетворены, и решил представить проект Резолюции А на 26-м заседании ГКМВ и предпринять все другие необходимые действия для осуществления запланированного переопределения килограмма, ампера, кельвина и моля.

26-я ГКМВ, 2018

- **О пересмотре Международной системы единиц, SI (**CR, в печати и *Metrologia***,** 2019**, 56,** 022001**)**

Резолюция 1

Генеральная Конференция по мерам и весам,

принимая во внимание

- основное требование к Международной системе единиц (SI), которая является единой и доступной для международной торговли, высокотехнологичного производства, здоровья и безопасности человека, защиты окружающей среды, глобальные исследования климата во всем мире и фундаментальной науки, которая лежит в основе всего этого,
- что единицы SI, основываясь на нынешнем теоретическом описании природы на самом высоком уровне, должны быть стабильными в долгосрочной перспективе, внутренне самосогласованными и практически реализуемыми,
- пересмотр SI для удовлетворения этих требований описан в Резолюции 1 24-й ГКМВ в 2011 г., принятой единогласно, в которой подробно изложен новый метод определения SI на основе набора из семи определяющих констант, полученных из фундаментальных констант физики и других естественных постоянных, из которых выводятся определения семи основных единиц,
- что условия, установленные 24-й ГКМВ, подтвержденные 25-й Генеральной Конференцией, перед таким пересмотром SI, теперь удовлетворены,

постановляет,

что с 20 мая 2019 г. Международная система единиц (SI) является системой единиц в которой

- частота невозмущенного сверхтонкого перехода основного состояния атома цезия-133 $\Delta\nu_{Cs}$ составляет 9 192 631 770 Гц,
- скорость света в вакууме c составляет 299 792 458 м/с,
- постоянная Планка h составляет $6{,}626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ Дж с,
- элементарный заряд e составляет $1{,}602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ Кл,
- постоянная Больцмана k составляет $1{,}380\ 649 \times 10^{-23}$ Дж/К,

- постоянная Авогадро N_A составляет 6,022 140 76 × 1023 моль$^{-1}$,
- световая эффективность монохроматического излучения частотой 540 × 10^{12} Гц, $K_{кд}$, составляет 683 лм/Вт,

где герц, джоуль, кулон, люмен и ватт с обозначениями Гц, Дж, Кл, лм и Вт, соответственно, относятся к единицам измерения: секунда, метр, килограмм, ампер, кельвин, моль и кандела, с обозначениями единиц с, м, кг, А, К, моль и кд, соответственно, согласно Гц = с$^{-1}$, Дж = кг м^2 с$^{-2}$, Кл = А с, лм = кд м^2 м$^{-2}$ = кд ср, и Вт = кг м^2 с$^{-3}$.

Принимая это решение, Генеральная Конференция по мерам и весам отмечает общественную значимость, изложенную в Резолюции 1 24-й ГКМВ, в отношении основных единиц SI, и подтверждает ее в следующих Приложениях к настоящей Резолюции, которые имеют ту же силу, что и сама Резолюция.

Генеральная Конференция предлагает Международному комитету мер и весов подготовить новую редакцию своей брошюры «*International System of Units, SI,* в которой приводится полное описание SI.

Приложение 1. Отмена прежних определений основных единиц:

Из принятого выше нового определения SI следует, что

- определение секунды, действующее с 1967/68 г. (13-е заседание ГКМВ, Резолюция 1) отменяется,
- определение метра, действующее с 1983 г. (17-е заседание ГКМВ, Резолюция 1), отменяется,
- определение килограмма, действующее с 1889 г. (1-е заседание ГКМВ, 1889 г., 3-е заседание ГКМВ, 1901 г.), основанное на массе международного прототипа килограмма, отменяется,
- определение ампера, действующее с 1948 г. (9-е заседание ГКМВ), основанное на определении, предложенном Международным комитетом (МКМВ, 1946, Резолюция 2), отменяется,
- определение кельвина, действующее с 1967/68 гг. (13-е заседание ГКМВ, Резолюция 4), отменяется,
- определение моля, действующее с 1971 г. (14-е заседание ГКМВ, Резолюция 3) отменяется,
- определение канделы, действующее с 1979 г. (16-е заседание ГКМВ, Резолюция 3) отменяется,
- решение об утверждении общепринятых значений постоянной Джозефсона KJ_{-90} и постоянной фон Клитцинга RK_{-90}, принятое Международным Комитетом (МКМВ, 1988 г., Рекомендации 1 и 2) по запросу Генеральной Конференции (18-е заседание ГКМВ, 1987 г., Резолюция 6) о создании представлений вольта и ома, использующих эффекты Джозефсона и квантового Холла, соответственно, отменяется.

Приложение 2. Статус констант, использовавшихся в предыдущих определениях:

Из нового определения SI, принятого выше, и из рекомендуемых значений специальной корректировки КОДАТА 2017 года, на которой основаны значения определяющих констант, следует, что на момент принятия этой Резолюции

- масса международного прототипа килограмма m(K) равна 1 кг в пределах относительной стандартной неопределенности, равной относительной стандартной неопределённости рекомендуемого значения h на момент принятия настоящей Резолюции, а именно 1,0 × 10^{-8}, и в будущем его значение будет определено экспериментально,
- магнитная проницаемость вакуума μ_0 равна 4π × 10^{-7} Нм$^{-1}$ в пределах относительной стандартной неопределенности, равной рекомендуемому значению постоянной тонкой структуры α на момент принятия данной Резолюции, а именно 2,3 × 10^{-10}, и что в будущем его значение будет определено экспериментально,
- термодинамическая температура тройной точки T_{TPW} воды равна 273,16 К в пределах относительной стандартной неопределенности, близкой к

рекомендованному значению k на момент принятия этой Резолюции, а именно $3{,}7 \times 10^{-7}$, и что в будущем его значение будет определено экспериментально,

- молярная масса углерода-12, $M(^{12}C)$ равна 0,012 кг моль$^{-1}$ в пределах относительной стандартной неопределенности, равной рекомендованной величине $N_A h$ на момент принятия данной Резолюции, а именно $4{,}5 \times 10^{-10}$, и что в будущем его значение будет определено экспериментально.

Приложение 3. Основные единицы SI

Для получения следующего набора определений, начиная с определения SI, принятого выше, на основе фиксированных численных значений определяющих констант, определения каждой из семи основных единиц выводятся путем использования, при необходимости, одной или нескольких из этих определяющих констант:

- Секунда, обозначение с, есть единица времени SI. Она определяется в соответствии с фиксированным численным значением частоты цезия $\Delta\nu_{Cs}$, частоты невозмущенного сверхтонкого перехода основного состояния атома цезия-133, равной 9 192 631 770 при выражении в единице Гц, что равно с$^{-1}$.
- Метр, обозначение м, есть единица длины SI. Она определяется принятием фиксированного численного значения скорости света в вакууме c равным 299 792 458, при выражении в единицах м/с, где секунда определяется на основе частоты цезия $\Delta\nu_{Cs}$.
- Килограмм, обозначение кг, есть единица массы SI. Он определяется путем принятия фиксированного численного значения постоянной Планка h равным $6{,}62607015 \times 10^{-34}$ при выражении в единицах Дж с, которое равно кг м^2 с$^{-1}$, где метр и секунда определены на основе c и $\Delta\nu_{Cs}$
- Ампер, обозначение А, есть единица электрического тока SI. Он определяется принятием фиксированного численного значения элементарного заряда e равным $1{,}602176634 \times 10^{-19}$, когда оно выражено в единице Кл, равной А с, где секунда определяется на основе $\Delta\nu_{Cs.}$
- Кельвин, обозначение К, есть единица термодинамической температуры SI. Он определяется принятием фиксированного численного значение постоянной Больцмана k равным $1{,}380649 \times 10^{-23}$ при выражении в единицах Дж К$^{-1}$, которое равно кг м^2 с$^{-2}$ К$^{-1}$, где килограмм, метр и секунда определены на основе h, c и $\Delta\nu_{Cs}$.
- Моль, обозначение моль, есть единица количества вещества SI. В одном моле содержится точно 6,022 140 76 × 1023 элементарных объектов. Это число является фиксированным численным значением постоянной Авогадро, N_A, при выражении в единицах моль$^{-1}$, и называется числом Авогадро.

  Количество вещества, обозначение n, системы является мерой количества указанных элементарных объектов. Элементарным объектом может быть атом, молекула, ион, электрон, любая другая частица или указанная группа частиц.
- Кандела, обозначение кд, есть единица SI силы света в данном направлении. Она определяется фиксированным численным значением световой эффективности монохроматического излучения с частотой 540×10^{12} Гц, K_{cd}, равным 683 при выражении в единицах лм Вт$^{-1}$, что равно кд ср Вт$^{-1}$ или кд ср кг$^{-1}$ м$^{-2}$ с^3, где килограмм, метр и секунда определяются на основе h, c и $\Delta\nu_{Cs}$.

Приложение 2. Практическая реализация определений некоторых важных единиц

Приложение 2 публикуется только в электронной форме и доступно на вебсайте МБМВ (***www.bipm.org***).

Приложение 3. Единицы измерения фотохимических и фотобиологических величин

Приложение 3 публикуется только в электронной форме и доступно на вебсайте МБМВ (***www.bipm.org***).

1

Приложение 4. Исторические заметки о развитии Международной системы единиц и ее основных единиц

Часть 1. Историческое развитие реализации единиц SI

Экспериментальные методы, применяемые для реализации единиц и использующие уравнения физики, известны как первичные методы. Основной характеристикой первичного метода является то, что он позволяет измерять величину в конкретной единице непосредственно из ее определения, используя только те величины и константы, которые сами по себе не содержат эту единицу.

По сложившейся традиции, единица для данной величины была взята так, чтобы быть частным примером такой величины, которая была выбрана, чтобы получить численные значения общих измерений удобного размера. До появления современной науки единицы были обязательно определены на основе материальных артефактов, в частности, метра и килограмма для длины и массы или свойства конкретного объекта, а именно вращения Земли для секунды. Даже на заре метрической системы в конце 18-го века было признано, что более желательным определением единицы длины, например, было бы определение, основанное на универсальном свойстве природы, таком как длина маятника, отсчитывающего секунды. Такое определение не должно зависеть от времени и места и, в принципе, будет доступно во всем мире. В то время практические соображения привели к более простым определениям артефактов для метра и килограмма, а секунда оставалась привязанной к вращению Земли. Только в 1960 году было принято первое нематериальное определение для метра, а именно, длина волны определенного оптического излучения.

С тех пор были приняты определения ампера, кельвина, моля и канделы, не относящиеся к материальным артефактам. В случае ампера это относится к определенному электрическому току, необходимому для создания данной электромагнитной силы, а в случае кельвина - к определенному термодинамическому состоянию, а именно, к тройной точке воды. Даже атомное определение секунды осуществлялось на основе определенного перехода атома цезия. Килограмм всегда выделялся как единица, которая противостояла превращению из артефакта. Определением, которое открыло путь к реальной универсальности, стало определение метра в 1983 году. Это определение подразумевало, хотя и не указывало, фиксированное численное значение для скорости света. Однако это определение было сформулировано в традиционной форме и, по сути, гласило, что метр - это расстояние, пройденное светом за указанное время. Таким образом, оно отразило другие определения основных единиц СИ, каждое из которых имеет одинаковую форму, например, «ампер - это ток, который…» и «кельвин - это доля определенной температуры». Такие определения можно назвать определениями единиц в явном виде.

Хотя эти определения отвечают многим требованиям универсальности и доступности, и часто возможны различные реализации, они, тем не менее, ограничивают практические реализации для экспериментов, которые прямо или косвенно привязаны к конкретным условиям или состояниям, указанным в каждом определении. Как следствие, точность реализации таких определений никогда не может быть лучше, чем точность реализации конкретных условий или состояний, указанных в определениях.

Это конкретная проблема с настоящим определением секунды, которое основано на микроволновом переходе атома цезия. Частоты оптических переходов разных атомов

или ионов теперь на несколько порядков заметно более воспроизводимы, чем определенная частота цезия.

В настоящем определении SI, основанном на наборе определяющих констант, вместо каждого определения, указывающего конкретное условие или состояние, которое устанавливает принципиальный предел точности реализации, может быть использовано любое удобное уравнение физики, которое привязывает конкретную константу или константы к величине, подлежащей измерению. Это значительно более общий способ определения основных единиц измерения. Этот способ, который не ограничен современной наукой или технологией, поскольку будущие разработки могут привести к еще неизвестным уравнениям, которые смогут найти свое выражение в различных способах реализации единиц со значительно более высокой точностью. При таком определении, в принципе, нет предела точности, с которой может быть реализована единица. Исключением остается определение секунды, в котором основой определения в настоящее время остается первоначальный микроволновый переход цезия.

Различие между однозначно выраженной единицей и однозначным определением константы можно ясно проиллюстрировать, используя два предыдущих определения метра, которые зависели от фиксированного числового значения скорости света, и два определения кельвина. Исходное определение метра 1983 года фактически утверждает, что «метр - это длина пути, пройденного светом в вакууме в течение интервала времени 1/299 792 458 секунды». Новое определение просто утверждает, что метр определяется через константу, которая определяет секунду, заданную частоту цезия и фиксированное числовое значение скорости света, выраженное в единицах м с−1. Таким образом, мы можем использовать любое уравнение физики, включая, конечно, указанное в предыдущем определении, время, необходимое для прохождения заданного расстояния, которое используется для астрономических дистанций, но также и простое уравнение, привязывающее частоту и длину волны к скорости света. Прежнее определение Кельвина, основанное на фиксированном числовом значении температуры тройной точки воды, в конечном счете, требует измерения в тройной точке воды. Новое определение, основанное на фиксированном числовом значении постоянной Больцмана, является гораздо более общим в том смысле, что любое термодинамическое уравнение, в котором появляется k, в принципе, может использоваться для определения термодинамической температуры в любой точке температурной шкалы. Например, определяя полную энергетическую светимость черного тела при температуре T, равную $(2\pi^5k^4/15c^2h^3)\,T^4$ в Вт м$^{-2}$, мы можем непосредственно определить *T*.

Для килограмма, определение единицы которого претерпело самое принципиальное изменение, реализация может быть осуществлена с помощью любого уравнения физики, которое связывает массу, постоянную Планка, скорость света и частоту цезия. Одним из таких уравнений является уравнение, описывающее работу электромеханических весов, ранее известных как ватт-весы, позднее получивших название «киббл-весы»[1]. С помощью этого устройства механическая мощность, измеряемая на основе массы m, локального ускорения под действием силы тяжести g и скорости v, может измеряться на основе электрической мощности, измеряемой на основе электрического тока и напряжения, измеренного на основе квантовых эффектов Холла и Джозефсона, соответственно. В результате получается уравнение $mgv = Ch$, где C - калибровочная постоянная, которая содержит измеренные частоты, а h - постоянная Планка.

Еще один метод, который можно использовать для первичной реализации килограмма, заключается в определении числа атомов в сфере кремния и использовании уравнения:

$$m = \frac{8V}{a_0^3}\frac{2R_\infty h}{c\alpha^2}\frac{m_{\mathrm{Si}}}{m_{\mathrm{e}}}$$

1 Как признание изобретения ватт- весов Брайаном Кибблом

с массой m и объемом сферы V (около 1 кг), параметром решетки a_0, постоянной Ридберга R_∞, постоянной тонкой структуры α и массами атома кремния (усредненными по трем изотопам, использованным для сферы) m_{Si}, и электроном m_e, соответственно. Первая часть соответствует числу атомов в сфере, вторая - массе электрона, а третья – соотношению массы (усредненной по изотопам) атома кремния и массы электрона.

Еще одна возможность измерения массы с помощью нового определения, но на этот раз на микроскопическом уровне, заключается в измерениях упругого столкновения атома с использованием отношения, которое включает в себя h/m.

Все они обеспечивают яркую иллюстрацию универсальности нового способа определения единиц. Подробная информация о текущей реализации основных и других единиц приведена на вебсайте МБМВ.

Часть 2. Историческое развитие Международной Системы

9-я ГКМВ (1948, Резолюция 6; CR 64) поручила МКМВ:

- исследовать составление полного набора правил для единиц измерения;
- выяснить для этой цели по официальному запросу мнение, преобладающее в научных, технических и образовательных кругах, во всех странах;
- выработать рекомендации по созданию *практической системы единиц измерения*, пригодные для принятия всеми организациями, подписавшими *Метрическую Конвенцию*.

В Резолюции 7 (CR 70) той же ГКМВ также изложены «общие принципы написания обозначений единиц» и перечислены некоторые согласованные производные единицы, которым были присвоены специальные названия.

10-я ГКМВ (1954, Резолюция 6; CR 80) приняла в качестве основных величин и единиц для этой практической системы следующие шесть величин: длину, массу, время, электрический ток, термодинамическую температуру и силу света, а также шесть соответствующих основных единиц измерения: метр, килограмм, секунду, ампер, кельвин и канделу. После продолжительного обсуждения между физиками и химиками, 14-я ГКМВ (1971, Резолюция 3, CR 78 и *Metrologia* 1972, **8**, 36) добавила количество вещества, единицу моль, в качестве седьмой основной величины и единицы.

11-я ГКМВ (1960, Резолюция 12; CR 87) одобрила название Международная система единиц, Système international d'unités, с международным сокращением SI для этой практической системы единиц и установила правила для префиксов, производных единиц и прежних дополнительных единиц, а также для других вопросов; таким образом, создала всеобъемлющее описание единиц измерения. На последующих заседаниях ГКМВ и МКМВ, с учетом достижений науки и меняющихся потребностей пользователей, была добавлена и изменена первоначальная структура SI.

Хронологическая последовательность, которая привела к этим важным решениям, может быть кратко изложена следующим образом.

- Создание десятичной метрической системы во время Французской революции и последующее депонирование двух платиновых эталонов, представляющих метр и килограмм, 22 июня 1799 года в Архиве Республики в Париже, что можно рассматривать как первый шаг, который привел к существующей Международной системе единиц.

- В 1832 году Гаусс (Gauss) решительно поддержал применение этой метрической системы вместе с секундой, определенной в астрономии, в качестве когерентной системы единиц для физических наук. Гаусс был первым, кто выполнил абсолютные измерения магнитного поля Земли на базе десятичной системы, основанной на *трех механических единицах:* миллиметре, грамме и секунде, соответственно, для длины, массы и времени. В последующие годы Гаусс и Вебер (Weber) расширили эти измерения, включив в них другие электрические явления.

- Эти вопросы в области электричества и магнетизма получили дальнейшее развитие в 1860-х годах под активным руководством Максвелла (Maxwell) и Томсона (Thomson) через Британскую ассоциацию содействия развитию науки (BAAS). Они сформулировали требование для *когерентной системы единиц* с *основными единицами* и *производными единицами*. В 1874 году BAAS представила *систему CGS*, систему трехмерных *когерентных единиц*, основанную на трех механических единицах - сантиметре, грамме и секунде, с использованием префиксов в диапазоне от микро до мега, для выражения десятичных дольных и кратных множителей. Последующее развитие физики как экспериментальной науки было, в значительной степени, основано на этой системе.

- Размеры когерентных единиц CGS в области электричества и магнетизма оказались неудобными, поэтому в 1880-х годах BAAS и Международный электротехнический конгресс, предшественник Международной электротехнической комиссии (МЭК), утвердили взаимно-когерентный набор *практических единиц.* Среди них были ом для электрического сопротивления, вольт для электродвижущей силы и ампер для электрического тока.

- После подписания Метрической Конвенции 20 мая 1875 года, по которой образовано МБМВ и учреждены ГКМВ и МКМВ, началась работа по созданию новых международных прототипов для метра и килограмма. В 1889 году 1-я ГКМВ утвердила международные прототипы для метра и килограмма. Вместе с астрономической секундой как единицей времени, эти единицы составили трехмерную механическую систему единиц, аналогичную системе CGS, но с основными единицами метр, килограмм и секунда, известную как *система MKS*.

- В 1901 году Джорджи (Giorgi) показал, что для того, чтобы сформировать когерентную четырехмерную систему, можно объединить механические единицы этой системы MKS с практическими электрическими единицами, добавив к трем основным единицам четвертую единицу электрического типа, например, ампер. или ом, а также переписать уравнения, встречающееся в электромагнетизме, в так называемой рационализированной форме. Предложение Джорджи открыло путь для ряда новых разработок.

- После пересмотра Метрической Конвенции на 6-й ГКМВ (1921), которая расширила сферу и обязанности МБМВ в других областях физики, и последующем образовании Консультативного комитета по электричеству (CCE) на 7-й ГКМВ (1927), предложение Джорджи было тщательно обсуждено МЭК, Международным союзом теоретической и прикладной физики (IUPAP) и другими международными организациями. Это привело к тому, что CCE в 1939 году предложил принять четырехмерную систему, основанную на метре, килограмме, секунде и ампере, систему MKSA, МКМВ одобрил предложение в 1946 году.

- После международного рассмотрения, проведенного МБМВ, которое началось в 1948 году, 10-я ГКМВ (1954) одобрила дальнейшее введение кельвина и канделы в качестве основных единиц для термодинамической температуры и силы света, соответственно. Название «Международная система единиц» с аббревиатурой «SI» было присвоено системе на 11-й ГКМВ (1960). Были установлены правила для префиксов, производных единиц и прежних

дополнительных единиц, а также для других вопросов; таким образом, создано всеобъемлющее описание для всех единиц измерения.

- На 14-й ГКМВ (1971) принята новая основная единица моль, обозначение моль, для величины количества вещества. Это последовало за предложением Международной организации по стандартизации, выразившимся в предложении Комиссии по обозначениям, единицам и номенклатуре (Комиссия SUN) IUPAP, поддержанное Международным союзом теоретической и прикладной химии (IUPAC). Это привело к тому, что количество основных единиц SI достигло семи.

- С тех пор были достигнуты выдающиеся успехи в привязке единиц SI к истинным инвариантным величинам, таким как фундаментальные константы физики и свойства атомов. Признавая важность привязки единиц SI к таким инвариантным величинам, 24-я ГКМВ (2011) утвердила принципы нового определения SI, основанные на использовании набора из семи таких констант в качестве реперов для определений. Ко времени 24-й ГКМВ эксперименты по определению их значений на базе основных единиц того времени не были полностью согласованными, но ко времени 26-й ГКМВ (2018 г.) это произошло, и новое определение SI принято в Резолюции 1. Всё это стало основой описания, представленного в данной брошюре, которое является самым простым и наиболее фундаментальным способом описания SI.

- Ранее SI была определена с точки зрения семи основных единиц и производных единиц, определенных как произведения степеней основных единиц. Семь основных единиц были выбраны по историческим причинам, поскольку метрическая система, позднее SI, формировалась и развивалась в течение последних 130 лет. Их выбор не был уникальным, но с годами он стал общепризнанным и привычным не только благодаря созданию основы для описания SI, но и для определения производных единиц. Такая роль основных единиц сохраняется в настоящей SI, хотя сама SI теперь определена на основе семи определяющих констант. Поэтому в этой брошюре все еще можно найти определения семи основных единиц, но отныне они базируются на семи определяющих константах: частоте перехода сверхтонкого расщепления атома цезия $\Delta\nu_{Cs}$; скорости света в вакууме c; постоянной Планка h; элементарном заряде e; постоянной Больцмана k; постоянной Авогадро N_A; и световой эффективности определенного видимого излучения K_{cd}.

Определения семи основных единиц могут быть однозначно привязаны к числовым значениям семи определяющих констант. Однако между семью определяющими константами и семью основными единицами нет взаимно-однозначного соответствия, поскольку многие основные единицы требуют более одной определяющей константы.

Часть 3. Исторический взгляд на развитие основных единиц

Единица времени, секунда

До 1960 года, единица времени секунда, определялась как 1/86 400 доля от среднего солнечного дня. Точное определение «среднего солнечного дня» было оставлено астрономам. Однако измерения показали, что неравномерность вращения Земли сделала это определение неудовлетворительным. Для более точного определения единицы времени, 11-я ГКМВ (1960, Резолюция 9, CR, 86) приняла определение, данное Международным астрономическим союзом на основе тропического 1900 года. Однако экспериментальная работа уже показала, что атомный стандарт времени, основанный на переходе между двумя энергетическими уровнями атома или молекулы, мог бы быть реализован и воспроизведен гораздо точнее. Учитывая, что для науки и техники необходимо очень точное определение единицы времени, 13-я ГКМВ (1967-1968 гг., Резолюция 1, CR, 103 и *Metrologia*, 1968 г., **4**, 43) выбрала новое определение секунды, относящееся к частоте сверхтонкого перехода основного состояния в атоме цезия-133. Пересмотренная более точная формулировка этого же определения теперь на основе фиксированного числового значения частоты перехода сверхтонкого расщепления

невозмущенного основного состояния атома цезия-133, $\Delta\nu_{Cs}$, была принята на 26-м заседании ГКМВ в Резолюции 1 (2018).

Единица длины, метр

Определение метра 1889 года, а именно длина международного прототипа из платино-иридиевого сплава, было заменено на 11-й ГКМВ (1960), с использованием определения, основанного на длине волны излучения, соответствующего определенному переходу в криптоне - 86. Такое изменение принято для того, чтобы повысить точность, с которой могло бы быть реализовано определение метра. Это было достигнуто с помощью интерферометра с микроскопом-катетометром для измерения оптической разности пути при подсчете полос. В свою очередь, это определение заменено в 1983 году на 17-й ГКМВ (Резолюция 1, CR, 97 и *Metrologia*, 1984, **20**, 25) другим, относящимся к расстоянию, которое свет проходит в вакууме за определенный интервал времени. Оригинальный международный прототип метра, который был утвержден на 1-й ГКМВ в 1889 году (CR, 34-38), до сих пор хранится в МБМВ в условиях, определенных в 1889 году. Чтобы продемонстрировать его зависимость от фиксированного численного значения скорости света, *c*, формулировка определения была изменена на 26-й ГКМВ (2018 г.) в Резолюции 1.

Единица массы, килограмм

Определение килограмма 1889 года являлось просто массой международного прототипа килограмма, артефакта из платино-иридиевого сплава. Он до сих пор хранится в МБМВ в условиях, определенных 1-ой ГКМВ (1889, CR, 34-38), на которой был утвержден прототип и заявлено, что «этот прототип отныне будет считаться единицей массы». В одно и то же время были изготовлены примерно сорок аналогичных прототипов, и все они были обработаны и отполированы, чтобы иметь почти такую же массу, что и международный прототип. После калибровки по международному прототипу большинство из этих «национальных прототипов» были индивидуально закреплены на 1-й ГКМВ (1889) за государствами-членами Метрической Конвенции, а некоторые также за МБМВ. 3-я ГКМВ (1901, CR, 70) в декларации, призванной положить конец неоднозначности в общем употреблении, касающемся использования слова «вес, масса, weight», подтвердила, что «килограмм есть единица массы; он равен массе международного прототипа килограмма». Полная версия этих деклараций представлена на с. 70 вышеупомянутых трудов ГКМВ.

В 1946 году, ко времени второй поверки национальных прототипов было установлено, что в среднем массы этих прототипов отличались от массы международного прототипа. Это подтвердилось при третьей поверке, проведенной с 1989 по 1991 год, медианная разность составляла около 25 микрограммов для набора оригинальных прототипов, утвержденных 1-й ГКМВ (1889). Для обеспечения долговременной стабильности единицы массы, использования в полной мере квантовых электрических эталонов и для большей практической ценности для современной науки, на 26-й ГКМВ (2018 г.), Резолюцией 1 было принято новое определение килограмма, основанное на значении фундаментальной константы, для чего была выбрана постоянная Планка *h*.

Единица электрического тока, ампер

Электрические единицы, называемые «международными единицами», для тока и сопротивления были введены Международным электрическим конгрессом, состоявшимся в Чикаго в 1893 году, а определения «международный ампер» и «международный ом» были подтверждены Международной конференцией в Лондоне в 1908 году.

Ко времени 8-й ГКМВ (1933) сложилось единодушное мнение о замене «международных единиц» на так называемые «абсолютные единицы». Однако, поскольку некоторые лаборатории еще не завершили эксперименты, необходимые для определения соотношений между международными и абсолютными единицами, ГКМВ

уполномочила МКМВ в соответствующее время принять решение, как об этих соотношениях, так и о дате вступления в силу новых абсолютных единиц. МКМВ сделал это в 1946 году (1946, Резолюция 2, PV, **20**, 129-137), когда он постановил, что новые единицы начнут действовать с 1 января 1948 года. В октябре 1948 года 9-я ГКМВ одобрила решения, принятые МКМВ. Определение ампера, выбранное МКМВ, основывалось на силе между параллельными проводниками, несущими электрический ток, и это значение стало фиксированным численным значением вакуумной магнитной проницаемости μ_0 (также называемой магнитной постоянной). Численное значение вакуумной электрической проницаемости ε_0 (также называемой электрической постоянной) затем стало фиксированным вследствие нового определения метра, принятого в 1983 году.

Однако определение ампера 1948 года оказалось трудным для реализации, и в качестве практической реализации ампера через закон Ома (18-я ГКМВ (1987), Резолюция 6, CR 100) почти повсеместно стали использоваться практические квантовые эталоны (основанные на эффектах Джозефсона и квантового эффекта Холла), которые привязывают вольт и ом к конкретным комбинациям постоянной Планка h и элементарного заряда e. В результате этого стало естественным не только фиксировать численное значение h, чтобы переопределить килограмм, но также фиксировать численное значение e, чтобы переопределить ампер, и чтобы привести практические квантовые электрические эталоны в точное соответствие с SI. Настоящее определение, основанное на фиксированном числовом значении элементарного заряда, e, принято в Резолюции 1 26-го заседания ГКМВ (2018 г.).

Единица термодинамической температуры, кельвин

Определение единицы термодинамической температуры было дано на 10-й ГКМВ (1954, Резолюция 3; CR 79), которая выбрала тройную точку воды, T_{TPW}, в качестве основной реперной точки и приписала ей температуру 273,16 К, определяя, таким образом, кельвин. 13-я ГКМВ (1967-1968, Резолюция 3; CR, 104 и *Metrologia*, 1968, **4**, 43) приняла название кельвин, обозначение К, вместо «градус кельвина», обозначение ºK, для определенной таким способом единицы. Однако практические трудности в реализации этого определения, требующие образца чистой воды с четко определенным изотопным составом и разработки новых первичных методов термометрии, привели к принятию нового определения кельвина на основе фиксированного числового значения постоянной Больцмана k. Настоящее определение, которое сняло оба эти ограничения, было принято в Резолюции 1 на 26-й ГКМВ (2018 г.)

Единица количества вещества, моль

После открытия основных законов химии, для указания количества химических элементов или соединений использовались единицы, называемые, например, «грамм-атом» и «грамм-молекула». Эти единицы имели прямую связь с «атомными весами» и «молекулярными весами», которые, в действительности, являются относительными атомными и молекулярными массами. Первые компиляции «Атомных весов» сначала были привязаны к атомному весу кислорода, который по общему соглашению, был принят равным 16. Тогда как физики разделили изотопы в масс-спектрометре и приписали значение 16 одному из изотопов кислорода, химики приписали такое же значение (слегка изменяемое) смеси изотопов 16, 17 и 18, что для них составляет природный элемент кислород.
В 1959-1960 годах Соглашение между Международным союзом теоретической и прикладной физики (IUPAP) и Международным союзом теоретической и прикладной химии (IUPAC) положило конец этой двойственности. Физики и химики согласились присвоить значение точно 12, так называемому атомному весу, правильно называемому относительной атомной массой A_{r}, изотопу углерода с массовым числом 12 (углерод-12, ^{12}C). Полученная таким образом единая шкала дает относительные атомные и молекулярные массы (masses), также известные как атомные и молекулярные веса (weights), соответственно. Это соглашение не влияет на переопределение моля.

Величина, используемая химиками для определения количества химических элементов или соединений, называется «количеством вещества». Количество вещества, обозначение n, определяется как пропорциональное числу указанных элементарных объектов N в образце, причем коэффициент пропорциональности является универсальной константой, которая одинакова для всех объектов. Коэффициент пропорциональности является обратной величиной постоянной Авогадро N_A, так что $n = N/N_A$. Единица количества вещества называется *моль*, обозначение моль. Следуя предложениям IUPAP, IUPAC и ISO, МКМВ вывел определение моля в 1967 году и подтвердил его в 1969 году, указав, что молярная масса углерода-12 должна быть равна точно 0,012 кг/моль. Это позволило определить количество вещества $n_S(X)$ любого чистого образца S объекта X непосредственно из массы образца m_S и молярной массы $M(X)$ объекта X, причем молярная масса определена из его относительной атомной массы A_r (атомный или молекулярный вес) без необходимости точного знания постоянной Авогадро, используя соотношения

$$n_S(X) = m_S/M(X), \text{ и } M(X) = A_r(X) \text{ g/mol}$$

Тем самым, это определение моля зависело от определения артефакта килограмма.

Численное значение постоянной Авогадро, определенное таким способом, было равно числу атомов в 12 граммах углерода-12. Однако вследствие последних технических достижений это число теперь известно с такой точностью, что стало возможным более простое и универсальное определение моля, а именно путем точного указания числа объектов в одном моле любого вещества, тем самым фиксируя численное значение постоянной Авогадро. Это привело к тому, что новое определение моля и значение постоянной Авогадро больше не зависят от определения килограмма. Этим подчеркивается различие между принципиально разными величинами: «количеством вещества» и «массой». Настоящее определение моля, основанное на фиксированном числовом значении постоянной Авогадро, N_A, принято на 26-й ГКМВ (2018 г.) в Резолюции 1.

Единица силы света, кандела

Единицы силы света, основанные на эталонах пламени или ламп накаливания, применявшихся в различных странах до 1948 года, сначала были заменены «новой свечой», основанной на яркости излучателя Планка (абсолютно черного тела) при температуре замерзания. платины. Это изменение подготовлено Международной комиссией по освещению (CIE) и МКМВ до 1937 года, а решение обнародовано МКМВ в 1946 году. Затем оно было ратифицировано в 1948 году на 9-й ГКМВ, которая приняла новое международное название для этой единицы, кандела, обозначение cd; в 1954 году 10-я ГКМВ учредила канделу в качестве основной единицы; В 1967 году 13-е заседание ГКМВ (Резолюция 5, CR, 104 и *Metrologia*, 1968, **4,** 43-44) изменило это определение.

В 1979 году из-за трудностей с реализацией излучателя Планка при высоких температурах и благодаря новым возможностям радиометрии, т. е. измерению мощности оптического излучения, 16-я ГКМВ (1979, Резолюция 3, CR, 100 и *Metrologia*, 1980, **16,** 56) приняла новое определение канделы.

В настоящем определении канделы используется фиксированное численное значение для световой эффективности монохроматического излучения с частотой 540×10^{12} Гц, K_{cd}, принятое на 26-й ГКМВ (2018) в Резолюции 1.

Список сокращений, используемых в настоящем томе

1 Сокращения лабораторий, комитетов и конференций

BAAS	British Association for Advancement of Science / Британская ассоциация содействия развитию науки
BIPM	International Bureau of Weights and Measures / Международное Бюро мер и весов (МБМВ)
CARICOM	Caribbean Community / Карибское сообщество
CCAUV	Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration / Консультативный комитет по акустике, ультразвуку и вибрации (ККАУВ)
CCDS	Consultative Committee for Definition of Second / Консультативный комитет по определению секунды (ККОС), см. CCTF
CCE	Consultative Committee for Electricity / Консультативный комитет по электричеству (ККЭ), см. CCEM
CCEM	Consultative Committee for Electricity and Magnetism / Консультативный комитет по электричеству и магнетизму (ККЭМ) (ранее CCE)
CCL	Consultative Committee for Length / Консультативный комитет по длине
CCM	Consultative Committee for Mass and Related Quantities / Консультативный комитет по массе и связанным величинам (ККМ)
CCPR	Consultative Committee for Photometry and Radiometry / Консультативный комитет по фотометрии и радиометрии (ККФР)
CCQM	Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry and Biology / Консультативный комитет по количеству вещества: метрология в химии и биологии (КККВ)
CCRI	Consultative Committee for Ionizing Radiation / Консультативный комитет по ионизирующим излучениям (ККИИ)
CCT	Consultative Committee for Thermometry / Консультативный комитет по термометрии (ККТ)
CCTF	Consultative Committee for Time and Frequency / Консультативный комитет по времени и частоте (ранее CCDS) (ККВЧ)
CCU	Consultative Committee for Units / Консультативный комитет по единицам (ККЕ)
ГКМВ	General Conference on Weights and Measures / Генеральная Конференция по мерам и весам (ГКМВ)
МКМВ	International Committee for Weights and Measures / Международный Комитет мер и весов (МКМВ)
CODATA	Committee on Data for Science and Technology / Комитет по числовым данным в области науки и техники (КОДАТА)
CR	*Comptes Rendus* of Conférence générale des poids et mesures / Труды Генеральной Конференции по мерам и весам
	ET Ephemeris time / Эфемеридное время
IAU	International Astronomical Union / Международный астрономический союз
ICRP	International Commission on Radiological Protection / Международная комиссия по радиологической защите

ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements / Международная комиссия по радиационным единицам и измерениям
IEC	International Electrotechnical Commission / Международная электротехническая комиссия (МЭК)
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service / Международная служба вращения Земли и систем отсчета
ISO	International Organization for Standardization / Международная организация по стандартизации (ИСО)
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry / Международный союз теоретической и прикладной химии
IUPAP	International Union of Pure and Applied Physics / Международный союз теоретической и прикладной физики
OIML	International Organization of Legal Metrology / Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ)
PV	*Procès-Verbaux* of МКМВ / Протоколы Международного Комитета мер и весов
SUNAMCO	Commission for Symbols, Units, Nomenclature, Atomic Masses and Fundamental Constants / Комиссия по символам, единицам, номенклатуре, атомным массам и фундаментальным константам
WHO	World Health Organization / Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ)

2 Сокращения научных терминов

CGS	Three-dimensional coherent system of units based on three mechanical units centimetre, gram and second / Трехразмерная когерентная система единиц на основе трех единиц механических величин: сантиметра, грамма и секунды
EPT-76	Provisional Low Temperature Scale of 1976 / Предварительная шкала низких температур 1976 г.
GUM	Guide to Expression of Uncertainty in Measurement / Руководство по выражению неопределённости в измерении
IPTS-68	International Practical Temperature Scale of 1968 / Международная температурная практическая шкала 1968 г. (МПТШ-68)
ISQ	International System of Quantities / Международная система физических величин
ITS-90	International Temperature Scale of 1990 / Международная температурная шкала 1990 г. (МТШ-90)
MKS	System of units based on three mechanical units metre, kilogram, and second / Система единиц на основе трех единицах механических величин: метра, килограмма и секунды (МКС)
MKSA	Four-dimensional system of units based on metre, kilogram, second, and ampere / Четырехразмерная система единиц на основе метра, килограмма, секунды и ампера
SI	International System of Units / Международная система единиц (СИ)
TAI	International Atomic Time / Международное атомное время
TCG	Geocentric Coordinated Time / Геоцентрическое Координатное Время
TT	Terrestrial Time / Земное время
UTC	Coordinated Universal Time / Всемирное координированное время
VSMOW	Vienna Standard Mean Ocean Water / Усреднённая природная вода

РОССТАНДАРТ
Федеральное агентство
по техническому регулированию
и метрологии

109074, г. Москва,
Китайгородский пр., д. 7, стр. 1

info@gost.ru
www.gost.ru