

В рамках празднования 175-летия ВНИИМ им. Д. И. Менделеева**14 и 15 июня 2017 г. в Санкт-Петербурге****прошла Международная научно-практическая конференция****«175 лет ВНИИМ им. Д. И. Менделеева и Национальной системе обеспечения единства измерений».**

Более 500 метрологов, известных учёных, специалистов в области технического регулирования, руководителей вузов, научных и промышленных организаций России, стран Европы, США, СНГ, Японии, Кореи, КНР, Турции поздравили институт с юбилеем и приняли участие в конференции.

Участники конференции представили более 150 докладов по самым актуальным научным и практическим темам. В торжественной церемонии открытия конференции приняли участие заместитель директора Департамента государственной политики в области технического регулирования, стандартизации и обеспечения единства измерений Министерства промышленности и торговли Российской Федерации Д. А. Кузнецов, заместитель руководителя Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии С. С. Голубев, президент Метрологической академии В. В. Окрепилов, председатель Комитета по промышленной политике и инновациям Санкт-Петербурга М. С. Мейксин, представители комитета по науке и высшей школе.

Успехи и значение ВНИИМ им. Д. И. Менделеева в международной метрологии отметили директор Международного бюро законодательной метрологии (BIML) Stephen Patoray, президент Азиатско-Тихоокеанской метрологической программы (APMP) Toshiyuki Takatsuji, руководитель отдела физической метрологии Международного бюро мер и весов (BIPM) Michael Stock, директор по исследованиям Национальной физической лаборатории Великобритании (NPL) Theodoor Janssen и другие представители национальных метрологических организаций.

Предлагаем вниманию читателей статьи по основным направлениям деятельности ВНИИМ и партнеров института: о современном состоянии эталонной базы ВНИИМ, о фундаментальных исследованиях, лежащих в основе создания новых эталонов, в том числе эталона частоты на основе тория, о пересмотре системы СИ на основе фундаментальных констант.

006.915.1

Пересмотр Международной системы единиц – на пути к СИ, основанной на фундаментальных физических константах**М. СТОК***Международное бюро мер и весов, Севр, Франция, e-mail: mstock@bipm.org*

Описаны основные недостатки и запланированные изменения (пересмотр) существующей Международной системы единиц СИ. Рассмотрены последствия пересмотра для воспроизведения и распространения единиц величин в различных областях метрологии.

Ключевые слова: переопределение единиц Международной системы единиц СИ, фундаментальные константы.

The main shortcomings of the current SI and the planned changes in the present SI are described. The consequences of SI revision for the reproduction and the propagation of units values in various areas of metrology are considered.

Key words: redefinition of SI units, fundamental physical constants.

Международная система единиц (СИ) с момента принятия в 1960 г. использовалась для выражения результатов измерений в различных областях науки и техники. За время существования СИ в неё было внесено множество изменений,

направленных на повышение эффективности применения, а также касающихся усовершенствования определений единиц СИ. Последнее изменение произошло в 1983 г., когда метр был определён через скорость света в вакууме.

В данный момент СИ содержит семь базовых единиц, из которых могут быть получены другие единицы [1]. Каждая базовая единица связана с эталонной величиной, численное значение которой установлено в определении единицы. Определения метра, ампера и канделы основаны на фундаментальных физических константах (ФФК): скорости света в вакууме c , магнитной постоянной μ_0 и световой эффективности человеческого глаза на частоте 540 ТГц (K_{cd}). Определения секунды, кельвина и моля базируются на свойствах материалов: частоте перехода сверхтонкого расщепления атома ^{133}Cs , тройной точке воды и молярной массе ^{12}C . Килограмм в настоящее время является последней единицей, определяемой с помощью артефакта – Международного прототипа килограмма (МПК), который принят ещё в 1889 г.

Определение килограмма и ампера являются недостаточно точными для современных и будущих потребностей, в частности, для прецизионных реализаций электрических единиц. Эти причины стали движущей силой для пересмотра СИ. Планируются также переопределения кельвина и моля. Пересмотренные определения единиц должны основываться на наборе из семи ФФК и быть стабильными. В новой редакции необходимо учесть будущие усовершенствования методов реализации переопределяемых единиц.

Ниже кратко описаны основные недостатки существующей СИ, этапы подготовки к её пересмотру, а также последствия пересмотра СИ для различных областей метрологии.

Недостатки существующей СИ. Определение килограмма как массы МПК было утверждено на первом заседании Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) в 1889 г. МПК был изготовлен в 1880 г. из сплава 90 % платины и 10 % иридия [2] и с тех пор хранится в Международном бюро мер и весов (МБМВ) вместе с набором его официальных копий.

Официальные копии сличались с МПК четыре раза: в 1889 г.; в 1946 г. (вторая периодическая поверка); в 1991 г. (третья периодическая поверка [3]); в 2014 г. (внеплановая калибровка [4]). По итогам второй и третьей периодических поверок было установлено, что масса официальных копий по сравнению с массой МПК больше, чем в 1889 г. (рис. 1). Увеличение массы официальных копий в 1991 г. (почти через 100 лет после первичной калибровки) составило порядка 50 мкг. Тенденция к увеличению массы наблюдалась также при повторных калибровках национальных прототипов килограмма. Причина такого изменения массы неизвестна. По одной из версий уменьшилась масса МПК, который редко доступен для измерений с целью его защиты от внешних воздействий, а прототипа с более высокой стабильностью массы не существует. Как ни странно, в 2014 г. разница масс официальных копий и МПК оказалась практически такой же, как в 1991 г. Важно отметить, что в прошлом веке гипотетическое изменение массы МПК не вызывало серьезных проблем. Однако со временем повышаются требования к точности измерений, поэтому предлагается переопределить килограмм относительно ФФК – постоянной Планка, что будет гарантировать его стабильность. Такое переопределение также станет универсальным и позволит любому Национальному метрологическому институту (НМИ) реализовывать единицу массы в собственных лабораториях.

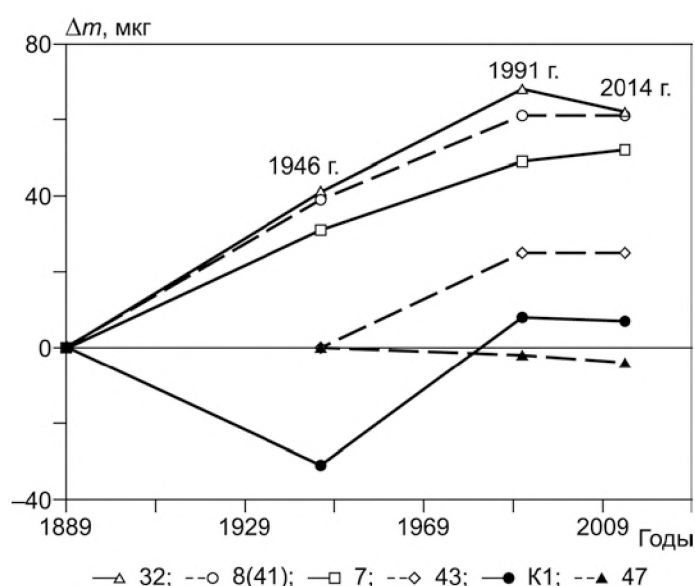


Рис. 1. Эволюция массы (в микрограммах) официальных копий килограмма относительно МПК с момента первой калибровки в 1889 г.; официальные копии 43 и 47 впервые откалиброваны в 1946 г., остальные – в 1889 г.; линия массы МПК соответствует оси абсцисс

Другое ограничение существующего определения килограмма состоит в том, что с использованием МПК может быть реализована только единица массы, равная 1 кг. Вторичные эталоны значительно большей или меньшей массы необходимо последовательно калибровать по множеству средств измерений, начиная с 1 кг. Это чревато значительным увеличением относительной неопределённости калибровки для больших и малых масс. Опубликованные в базе данных ключевых сличений (KCDB) калибровочные и измерительные возможности (СМС) лидирующих НМИ для 1 кг составляют около 10^{-8} , а для миллиграммов – около 10^{-4} . Определение килограмма, основанное на постоянной Планка, позволит напрямую реализовывать любое значение массы, уменьшая таким образом неопределённость. Это особенно важно для реализации массы значительно меньше 1 кг [5].

В существующей СИ ампер представляет собой силу, возникающую между двумя параллельными проводниками бесконечной длины и круглого поперечного сечения ничтожно малой площади, находящимися на расстоянии 1 м один от другого в вакууме. Токи силой 1 А вызывают между этими проводниками силу $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины. Сила, отнесённая к единице длины между двумя проводниками, выражается как

$$F/l = \mu_0 I^2 / (2\pi d), \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; I – сила тока обоих проводников; d – расстояние между ними.

Из (1) следует, что определение ампера эквивалентно определению ФФК – магнитной постоянной

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{А}^{-2}. \quad (2)$$

Ампер системы СИ и другие единицы электрических величин могут быть реализованы различными методами, представляющими сложные электромеханические эксперименты и включающие уравнения с магнитной постоянной. Например, для воспроизведения ампера используют токовые весы. С их помощью сравнивают силу взаимодействия между двумя токоведущими катушками, по которым протекает один и тот же ток [6]. При реализации вольта необходимо установить такое напряжение, при котором под действием электростатической силы изменяется уровень ртути в одном из двух электродов конденсатора [7]. Оба описанных варианта экспериментов были отброшены, поскольку достижимые неопределённости воспроизведения данных единиц в ррт-диапазоне (тысячные доли) не соответствуют современным метрологическим требованиям в области измерений электрических величин. При воспроизведении фарада применяют расчётный конденсатор Томпсона–Лэмпарда, для которого необходимо только найти длину электродов [8]. В настоящее время проводится ряд экспериментов, их цель – достижение неопределённости воспроизведения единиц электрических величин $1 \cdot 10^{-8}$ [9–12]. Однако данные эксперименты основаны на работе сложных механических устройств и не могут быть базовыми в электрометрии.

На практике при воспроизведении единиц электрических величин большинство НМИ используют два макроскопических квантовых эффекта. Эффект Джозефсона связан с туннелированием куперовских пар через тонкий изолирующий переход между двумя сверхпроводниками [13, 14]. Если такая система облучается микроволнами частотой f , то её постоянное напряжение выражается в виде

$$U_{\text{const}} = fnh/(2e) = fn/K_J, \quad (3)$$

где n – целое число квантов; h – постоянная Планка; e – элементарный заряд электрона; K_J – константа Джозефсона.

Таким образом, применение эффекта Джозефсона позволяет воспроизвести единицу напряжения, зависящую только от двух ФФК и точно измеряемой частоты.

Квантовый эффект Холла наблюдается в образцах, содержащих двумерный электронный газ, таких как гетероструктуры GaAs или графен [15]. При воздействии сильного магнитного поля перпендикулярно электронной плоскости при очень низких температурах в указанной структуре возникает квантовое сопротивление Холла

$$R_H = h/(ie^2) = R_K/i, \quad (4)$$

где i – целое квантовое число; R_K – постоянная Клитцинга.

На квантовом эффекте Холла основан универсальный эталон сопротивления, квантовое сопротивление Холла определяется двумя ФФК: h , e .

В 1990 г. была получена высокая воспроизводимость единиц величин с использованием эффектов Джозефсона и Холла, что сделало их идеальными для использования в эталонах электрических величин. Тем не менее значения постоянной Планка и элементарного заряда электрона e содержат большую неопределённость, главным образом потому, что единицы электриче-

ских величин СИ не могли быть воспроизведены с достаточно малой неопределённостью, как описано выше. Чтобы исправить эту ситуацию, в 1990 г. Международный комитет мер и весов (МКМВ) принял условные значения постоянных Джозефсона и Клитцинга: $K_{J-90} = 483\,597,9$ ГГц/В; $R_{K-90} = 25\,812,807$ Ом [16].

В настоящее время оба эффекта используются для воспроизведения вольта и ома. Эталоны на базе эффектов Джозефсона и Холла основываются на условных значениях постоянных K_J , R_K , а не на численном значении фундаментальной константы μ_0 , поэтому эталоны не реализуют соответствующие единицы согласно их определениям в СИ. Использование условных значений привело к образованию параллельной системы единиц, применяемых в области измерений электрических величин. Неопределённость значения R_{K-90} по отношению к значению R_K была оценена как $2 \cdot 10^{-7}$ в 2000 г., а неопределённость значения K_{J-90} по отношению к значению K_J – как $4 \cdot 10^{-7}$ в 1990 г. Таким образом, одной из задач запланированного пересмотра является возвращение к системе СИ в области измерений электрических величин.

Переход к системе СИ на основе фундаментальных констант. В 2011 г. на 24-й ГКМВ принята Резолюция, в которой отмечено намерение МКМВ провести пересмотр системы СИ с целью связать килограмм, ампер, кельвин и моль с точными численными значениями постоянной Планка h , элементарного заряда e , постоянной Больцмана k и постоянной Авогадро N_A [17]. В настоящее время предложено установить определения единиц СИ с помощью семи ФФК [18]. В пересмотренной СИ будут использоваться следующие ФФК:

невозмущённая частота сверхтонкого перехода основного состояния атома цезия 133 $\Delta\nu_{Cs} = 9\,192\,631\,770$ Гц;
 скорость света в вакууме $c = 299\,792\,458$ м/с;
 постоянная Планка $h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ Дж·с;
 элементарный заряд электрона $e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ Кл;
 постоянная Больцмана $k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;
 постоянная Авогадро $N_A = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$;
 световая эффективность $K_{cd} = 683$ лм/Вт.

Численные значения $\Delta\nu_{Cs}$, c , K_{cd} совпадают со значениями, применяемыми в существующих определениях СИ для секунды, метра и канделы. Значения h , e , k и N_A были получены при специальной корректировке фундаментальных констант CODATA-2017 [19]. С учётом фиксированных значений всех указанных ФФК можно получить полноценную систему единиц, в которой больше не понадобится различать базовые и производные единицы. Тем не менее, понятие базовых единиц было решено сохранить по причинам исторической преемственности, а также в педагогических целях. Набор из семи базовых единиц будет таким же, как и в существующей СИ.

Численные значения частоты сверхтонкого перехода цезия, скорости света и световой эффективности уже установлены в определениях секунды, метра и канделы существующей СИ. Численные значения h , e , k и N_A будут устанавливаться в новых определениях килограмма, ампера, кельвина и моля, соответственно. Будущие определения килограмма и ампера могут выглядеть примерно следующим образом:

«Килограмм, кг – это единица массы СИ, определяемая как численное значение постоянной Планка h , равное $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$,

выраженное в джоулях на секунду, что эквивалентно выражению в килограммах на метр в квадрате, делённых на секунду, где метр и секунда определяются как c и ΔV_{Cs} ;

«Ампер, А — это единица электрического тока СИ, определяемая как численное значение элементарного заряда e , равное $1,602176634 \cdot 10^{-19}$, выраженное в кулонах, что эквивалентно выражению в амперах на секунду, где секунда определяется как ΔV_{Cs} ».

Важным аспектом переопределения является то, что единицы не должны менять своё значение. Численные значения h , e , k и N_A должны быть выбраны так, чтобы получаемые из них единицы величин новой (пересмотренной) СИ имели такое же значение, как единицы величин настоящей СИ. Для этого необходимо выбирать численные значения ФФК существующей СИ. Таким образом, переопределение будет проходить в два этапа. Вначале численные значения ФФК должны быть определены с достаточной точностью в существующей СИ с помощью действующих определений базовых единиц и зафиксированы в новых определениях, а затем из определяющих ФФК получены единицы.

На этапах переопределения требуются экспериментальные методы для установления связи между определяющей постоянной и единицей. Эксперименты, связывающие постоянную Планка с килограммом, обычно называются экспериментами по реализации, так как они будут использоваться для реализации килограмма после его переопределения. Основными методами в этой области станут метод ватт-весов [20] (которые теперь называются весами Киббла в честь изобретателя метода Брайана Киббла) и метод определения плотности кристалла по данным рентгеноструктурного анализа (РСА) [21] с использованием кремниевых сфер. Методом РСА главным образом определяют постоянную Авогадро. Из определения постоянной Ридберга R_∞ следует уравнение для так называемой молярной постоянной Планка $N_A h$:

$$N_A h = \alpha^2 c A_r(e) M_u / (2 R_\infty),$$

где α — постоянная тонкой структуры; $A_r(e)$ — относительная атомная масса электрона; M_u — постоянная молярной массы.

Поскольку значение $N_A h$ известно с неопределённостью $4,5 \cdot 10^{-10}$ [22], что значительно меньше неопределённостей значений постоянных Планка или Авогадро, то h может быть вычислена по N_A без потери точности, и наоборот. Таким образом, и метод весов Киббла, и метод РСА можно использовать для определения значения постоянной Планка в существующей СИ. Методы дополняют друг друга, так как основаны на различных физических процессах. Согласованность результатов обоих методов обеспечивает высокую степень уверенности в их правильности. После переопределения оба метода могут быть использованы для реализации килограмма.

Значение e можно рассчитать по значению h с учётом уравнения для постоянной тонкой структуры:

$$\alpha = e^2 / (2 c \epsilon_0 h),$$

где $\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2) = 8,854187817 \cdot 10^{-12}$ Ф·м⁻¹ — электрическая постоянная.

Поэтому для нахождения численного значения e , которое будет использоваться для переопределения ампера, не требуются дополнительные эксперименты.

Эксперименты в области термометрии, связывающие термодинамическую температуру с постоянной Больцмана k , проводятся с применением так называемых первичных термометров: абсолютного газового термометра [23], газового термометра с диэлектрической постоянной [24], Джонсоновского шумового термометра [25], термометра по доплеровскому уширению линий [26] и термометра спектрального излучения. Аналогично определению килограмма на первом этапе эти эксперименты будут необходимы для определения значения постоянной Больцмана в существующей СИ по температуре тройной точки воды. Как только это значение k будет известно с достаточной точностью, оно будет зафиксировано в новом определении кельвина. После этого единицу температуры можно воспроизводить с учётом нового определения кельвина с помощью описанных выше первичных термометров.

Новое определение моля будет основано не на молярной массе ^{12}C , а на постоянной Авогадро, которая действительно выражает количество частиц в моле вещества: как указано ранее, N_A тесно связана с h через R_∞ .

Специальной группе CODATA по ФФК было поручено провести специальную корректировку во второй половине 2017 г. для определения численных значений постоянной Планка, элементарного заряда, постоянной Больцмана и постоянной Авогадро, требуемых для переопределения единиц соответствующих величин [19]. До 1 июля 2017 года необходимо было опубликовать результаты исследований по определению (уточнению) значений указанных констант.

Подготовка к пересмотру СИ. Сведения о готовности к переопределению килограмма. В дорожной карте, разработанной совместно специалистами Консультативных Комитетов по массе и связанным с ней величинам (ККМ) и единицам (ККЕ), указаны необходимые шаги для переопределения килограмма [27]. Для обеспечения непрерывности между настоящим и будущим определениями килограмма значение h , которое следует использовать для переопределения, должно быть установлено по единицам существующей СИ. Необходимо, чтобы значение h прослеживалось до массы МПК. Поэтому было принято решение о проведении МБМВ в 2014 г. «внеочередной калибровочной кампании» с применением МПК [4]. Во время этой необычной калибровочной кампании национальные прототипы килограмма всех НМИ, участвующих в точном определении h , были откалиброваны по МПК с неопределённостью 3,5 мкг. Это дало гарантию, что все последующие (с 2014 по 2017 гг.) определения постоянной Планка, которые внесли вклад в значение h , уточнённое в 2017 г. целевой группой CODATA по ФФК, прослеживаются к МПК.

Также ККМ рекомендовал провести пилотное сличение результатов калибровок эталонов массы, основанных на методах, которые будут использоваться для воспроизведения килограмма после его переопределения. Требовалось оценить последовательность будущих воспроизведений килограмма различными НМИ и проверить непрерывность связи с существующим прототипом килограмма. Такое сличение было проведено в

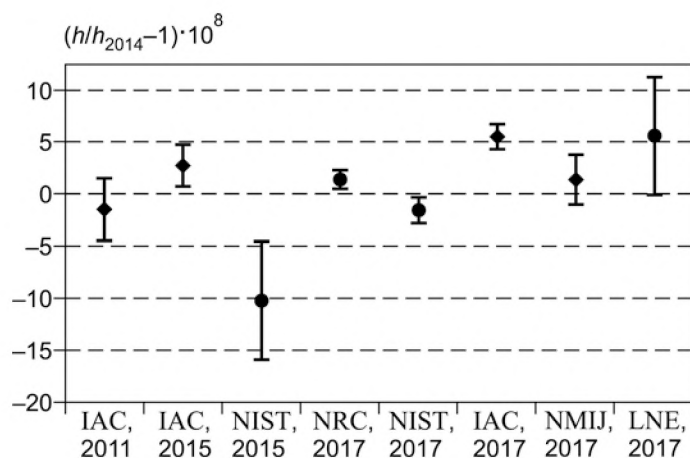


Рис. 2. Последние определения постоянной Планка с относительными стандартными неопределённостями менее $1 \cdot 10^{-7}$, осуществлённые различными национальными метрологическими институтами с помощью весов Киббла (кружки) и методом рентгеноструктурного анализа (ромбы); данные взяты из [19]

2016 г., МБМВ выступило в качестве пилотной лаборатории. В сличениях с применением весов Киббла участвовали три НМИ: LNE (Франция), NIST (США) и NRC (Канада). Сличения с помощью сферы кремния, полученной в рамках международного координационного проекта «Авогадро», проводили PTB (Германия) и NMJ (Япония). Все НМИ откалибровали наборы эталонов килограмма на основе значения h , определённого в протоколе сличения. Неопределённости калибровки варьировались от 15 до 140 мкг. Затем транспортируемые эталоны из наборов были отправлены в МБМВ, где выполняли сличения друг с другом и с рабочими эталонами МБМВ, прослеживаемыми к МПК. Была установлена согласованность результатов калибровок НМИ: результаты четырёх из пяти участников согласуются в пределах стандартного отклонения; результаты пятого согласуются на уровне $k = 2$ (k – коэффициент охвата). Неопределённость взвешенного среднего результатов калибровок участников составляет 10 мкг. Средневзвешенное значение согласуется с МПК в пределах неопределённости.

Ещё одно требование дорожной карты заключается в том, что экспериментально определённые значения h должны быть достаточно точными и согласованными. ККМ определил следующие условия этих определений:

по итогам не менее трёх независимых экспериментов, включая работу с весами Киббла и РСА-эксперименты, должны быть получены согласованные значения h с относительными стандартными неопределённостями не более $5 \cdot 10^{-8}$;

по крайней мере одно значение h должно иметь относительную стандартную неопределённость не более $2 \cdot 10^{-8}$.

В процессе данных пилотных сличений были выполнены условия, прописанные в дорожной карте. В начале 2017 г. для уточнения значений ФК группой CODATA-2017 были опубликованы новые данные по переопределению h . Согласованность полученных результатов меньше, чем результатов пилотных сличений, а отдельные результаты не согласуются на уровне их соответствующих оценённых стандартных неопределённостей (рис. 2).

Тем не менее стандартная неопределённость скорректированного значения h составляет всего $1 \cdot 10^{-8}$. ККМ рекомендовал способ сохранения согласованности результатов калибровок эталонов массы, пока не будут согласованы результаты переопределения h [28]. ККМ готовит «Внедрение в практику» для переопределения килограмма. В этом документе представлены различные первичные методы реализации единицы массы и информация о распространении данной единицы [29].

Сведения о готовности к переопределению кельвина. В 2014 г. на заседании Консультативного комитета по термометрии (ККТ) сформулированы следующие условия для переопределения кельвина на основе фиксированного численного значения постоянной Больцмана:

относительная стандартная неопределённость скорректированного значения k должна быть меньше $1 \cdot 10^{-6}$;

определение k должно быть основано на не менее двух принципиально разных методах, при этом по крайней мере один результат, найденный каждым методом, должен иметь относительную стандартную неопределённость менее $3 \cdot 10^{-6}$.

Фиксированное значение k , рекомендованное CODATA в 2014 г., имеет относительную стандартную неопределённость $5,7 \cdot 10^{-7}$ [22], т. е. выполняется первое условие. Тем не менее, в 2014 г. единственным методом, способным обеспечить неопределённость значения k менее $3 \cdot 10^{-6}$, было применение абсолютного газового термометра. С тех пор был проведён ряд дополнительных высокоточных определений k . Значение k , полученное с использованием диэлектрической постоянной на газовом термометре PTB [30], согласуется со значением, найденным группой CODATA-2014, и имеет неопределённость $1,9 \cdot 10^{-6}$, что соответствует второму условию. При сотрудничестве в области термометрии тепловых шумов Джонсона между NIM и NIST также получен результат, удовлетворяющий второму условию [31]. Поэтому в 2017 г. на заседании ККТ рекомендовано МКМВ завершить работу по переопределению единиц [32].

Конкретные сроки переопределения единиц. В октябре 2017 г. МКМВ примет окончательное решение о своей рекомендации ГКМВ относительно переопределения. Будут рассмотрены экспертные оценки всех комитетов, в частности, ККЕ и Консультативных комитетов по переопределяемым единицам: ККМ, ККТ, ККЭМ (по электричеству и магнетизму), ККВ (по количеству вещества – метрологии в химии). Очередное заседание ГКМВ планируется провести в ноябре 2018 г., и на нём необходимо одобрить новую СИ, пересмотренную на основе рекомендации МКМВ. Планируемая дата введения в действие пересмотренной СИ – 20.05.2019 г. (Всемирный день метрологии). При этом около двух месяцев требуется для подготовки актуальных изменений. Планируется начать информирование всех заинтересованных пользователей СИ об ожидаемых изменениях во Всемирный день метрологии 20 мая 2018 г.

Общественная значимость переопределения (последствия). Определение килограмма будет основано на инвариантной ФК – постоянной Планка. Это устранил трудность поддержания стабильности единицы массы на основе потенциально нестабильных артефактов. Во время переопределения неопределённость МПК будет составлять порядка $1 \cdot 10^{-8}$, т. е. 10 мкг.

Каждый НМИ сможет провести эксперимент по воспроизве-

дению единицы массы, даже при значениях массы, отличных от 1 кг. Принципиально новым для метрологии в области измерений массы является существование нескольких независимых источников прослеживаемости. Как и в любой другой области метрологии, международное признание СМС различных НМИ будет зависеть от успешного участия в сличениях, организованных МБМВ в рамках MRA. Предусматривается, что с этой целью МБМВ организует непрерывную серию сличений, а также поддержит опорное значение, полученное по итогам сличений (и, следовательно, прослеживаемость результатов воспроизведения единицы массы), с использованием рабочих эталонов. НМИ, которые не участвуют в указанном эксперименте, могут продолжать запрашивать МБМВ о результатах калибровки массы или прослеживать свои эталоны к эталону НМИ, который уже продемонстрировал СМС.

Основным преимуществом пересмотренной СИ для метрологии в области измерений электрических величин является то, что единицы, воспроизводимые на основе эффекта Джозефсона и квантового эффекта Холла, станут истинными реализациями СИ. Поскольку значения e и h будут определены без неопределённости, то такое же определение будет справедливым и для констант Джозефсона (3) и Клитцинга (4). Таким образом, условные значения K_{J-90} и R_{K-90} будут отменены. На основе специального уточнения ФФК группой CODATA-2017 значение K_J в новой СИ будет на $1 \cdot 10^{-7}$ меньше значения K_{J-90} , а значение R_K – на $2 \cdot 10^{-8}$ больше значения R_{K-90} . Вследствие этого после переопределения все значения напряжения будут увеличиваться примерно на $1 \cdot 10^{-7}$, а все сопротивления – примерно на $2 \cdot 10^{-8}$. Эти скачкообразные изменения не связаны с несогласованностью между будущими и настоящими единицами СИ электрических величин, но обусловлены тем, что используемые в настоящее время единицы электрических величин не являются, строго говоря, единицами СИ. По сравнению с типичными неопределённостями калибровки стандартных сопротивлений порядка 10^{-8} скачкообразное изменение ома не будет иметь значительных последствий для большинства пользователей. Эталоны напряжения Зенера можно откалибровать с неопределённостью порядка 10^8 , но при этом они показывают значительные отклонения, а иногда и скачкообразные изменения, которые сопоставимы со скачкообразным изменением вольты. Поэтому необходимо уменьшить негативные последствия для НМИ и других пользователей эталонов напряжения Джозефсона [33]. Задержка между ожидаемым принятием пересмотренной СИ в ноябре 2018 г. и официальным введением в практику 20 мая 2019 г. должна оставить достаточно времени лабораториям электрических величин для решения этой проблемы. ККЭМ готовит пояснительную записку для НМИ и их заказчиков.

Для большинства областей применения, требующих точных результатов измерений температуры, переопределение кельвина не приведёт к заметным изменениям, поскольку практически все измерения температуры основаны на Международной температурной шкале 1990 г. (МТШ–90), которая останется неизменной. Только в нескольких случаях требуется измерять термодинамическую температуру с применением кельвина СИ. Для этих задач переопределение кельвина позволит непосред-

ственно воспроизвести температуру, отличную от тройной точки воды. Ожидается, что это приведёт к уменьшению неопределённости измерений очень высоких и очень низких температур.

Моль должен быть переопределён по отношению к конкретному числу частиц. На практике не ожидается никаких последствий для установления прослеживаемости к эталону моля: будут доступны все ранее используемые методы. При этом не изменятся значения атомных весов.

Заключение. При подготовке к запланированному пересмотру СИ достигнут значительный прогресс. Данный пересмотр должен стать самым большим изменением в Международной системе единиц с момента её принятия в 1960 г. Пересмотренная СИ может содержать набор из семи ФФК, что позволит отказаться от разделения единиц на основные и производные. Тем не менее, концепция основных единиц будет сохранена для исторической преемственности и в педагогических целях. Новые определения килограмма, ампера, кельвина и моля будут основаны на фиксированных численных значениях h , μ_0 , k , N_A , соответственно.

Условия для переопределения кельвина на основе фиксированного численного значения k , установленные ККТ, выполняются. Достигнут значительный прогресс при измерении h , хотя согласованность большинства последних результатов неидеальна.

Основным преимуществом пересмотренной системы станет то, что единица массы будет воспроизводиться не с помощью артефакта, а на основе неизменной физической константы. Новое определение станет универсальным и в принципе позволит любому НМИ воспроизвести эту единицу или, как и ранее, прослеживать свои эталоны к эталонам МБМВ либо другого НМИ, подтвердившего СМС. В пересмотренной СИ также будут применяться методы, используемые до сих пор для воспроизведения единиц электрических величин. Это приведёт к скачкообразному изменению значения вольты и, в меньшей степени, ома, которое будет заметно на высшем уровне цепочки прослеживаемости. Новое определение кельвина позволит непосредственно воспроизводить очень низкую и очень высокую температуры без привлечения тройной точки воды. Не изменится использование МТШ–90. Никаких существенных последствий из-за переопределения моля не ожидается для метрологии в области химии.

Решение о пересмотре должно быть принято на заседании ГКМВ в ноябре 2018 г. В октябре 2017 г. на заседании МКМВ должен быть рекомендован данный пересмотр. В таком случае запланированная дата введения в действие новой СИ – 20.05.2019 (Всемирный день метрологии).

Л и т е р а т у р а

1. **SI:** The international system of units / 8th ed. 2006, updated in 2014. [Официальный сайт] <http://www.bipm.org/en/publications/si-brochure> (дата обращения: 03.08.2017).
2. **Davis R. S., Barat P., Stock M.** A brief history of the unit of mass: continuity of successive definitions of the kilogram // *Metrologia*. 2016. V. 53. P. A12–A18. (doi:10.1088/0026-1394/53/5/A12)

3. **Girard G.** The third periodic verification of national prototypes of the kilogram (1988–1992) // *Metrologia*. 1994. V. 31. P. 317–336. (doi: 10.1088/0026-1394/31/4/007)
4. **Stock M., Barat P., Davis R., Picard A., Milton M.** Calibration campaign against the International Prototype of the Kilogram, Pt I: comparison of the International Prototype with its official copies // *Metrologia*. 2015. V. 52. P. 310–316. (doi:10.1088/0026-1394/52/2/310)
5. **Shaw G. A.** Milligram mass metrology using an electrostatic force balance // *Metrologia*. 2016. V. 53. A86–A94. (doi:10.1088/0026-1394/53/5/A86)
6. **Vigoureux P.** A determination of the ampere // *Metrologia*. 1964. V. 1 (1). P. 3–7. (doi: 10.1088/0026-1394/1/1/003)
7. **Funk T., Sienknecht V.** Determination of the volt with the improved PTB voltage balance // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 1991. V. 40. P. 158–161. (doi: 10.1109/TIM.1990.1032905)
8. **Thompson A. M., Lampard D. G.** A new theorem in electrostatics and its applications to calculable standards of capacitance // *Nature*. 1956. V. 177. P. 888. (doi:10.1038/177888a0)
9. **Small G. W., Fiander J. R.** Design of a calculable cross capacitor // *Digest CPEM*, 2004. (doi: 10.1109/CPEM.2004.305323)
10. **Gournay P., Fletcher N., Robertsson L., Stock M.** Progress report on measuring the von Klitzing constant at the BIPM // *Digest CPEM*, 2016. (doi: 10.1109/CPEM.2016.7540713)
11. **O. Thévenot, G. Thuillier, R. Sindjui** Progress report on the determination of R_K at LNE // *Digest CPEM*, 2016. (doi: 10.1109/CPEM.2016.7540714)
12. **Lu Z.** An initial reproduction of SI capacitance unit from a new calculable capacitor at NIM // *IEEE Trans. Instr. Meas.* 2015. V. 64. No. 6. P. 1496–1502. (doi:10.1109/TIM.2015.2399012)
13. **Josephson B. D.** Possible new effects in superconductive tunnelling // *Phys. Lett.* 1962. V. 1. P. 251–253.
14. **Shapiro S.** Josephson Currents in Superconducting Tunnelling: The Effect of Microwaves and Other Observations // *Phys. Rev. Lett.* 1963. V. 11. P. 80–82.
15. **Klitzing K. V., Dorda G., Pepper M.** New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant Based on Quantized Hall Resistance // *Phys. Rev. Lett.* 1980. V. 45. P. 494–497. (doi:10.1103/PhysRevLett.45.494)
16. **Taylor B. N., Witt T. J.** New International Electrical Reference Standards Based on the Josephson and Quantum Hall Effects // *Metrologia*. 1989. V. 26. P. 47–62. (doi: 10.1088/0026-1394/26/1/004)
17. **Resolution 1:** on the possible revision of the International System of Units, the SI // 24th CGPM, 2011. [Офиц. сайт] http://www.bipm.org/utis/common/pdf/24_CGPM_Resolutions.pdf (дата обращения: 03.08.2017).
18. **Draft** 9th edition of SI brochure, available on. [Офиц. сайт] <http://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/> (дата обращения: 03.08.2017).
19. **Mohr P. J., Newell D. B., Taylor B. N., Tiesinga E.** The CODATA 2017 values of h , e , k , N_A for the revision of the SI. [Электрон. версия]. <http://doi.org/10.1088/1681-7575/aa950a> (дата обращения: 03.08.2017).
20. **Robinson I. A., Schlamminger S.** The watt or Kibble balance: a technique for implementing the new SI definition of the unit of mass // *Metrologia*. 2016. V. 53. P. A46–A74. (doi:10.1088/0026-1394/53/5/A46)
21. **Fujii K.** Realization of the kilogram by the XRCd method // *Metrologia*. 2016. V. 53. P. A19–A45. (doi:10.1088/0026-1394/53/5/A19)
22. **Mohr P. J., Newell D. B., Taylor B. N.** CODATA recommended values of the fundamental physical constants 2014 // *Rev. Mod. Phys.* 2016. V. 88. P. 035009.
23. **Pitre L.** Determination of the Boltzmann constant k from the speed of sound in helium gas at the triple point of water // *Metrologia*. 2015. V. 52. P. S263–S273. (doi:10.1088/0026-1394/52/5/S263)
24. **Gaiser C.** Dielectric constant gas thermometry // *Metrologia*. 2015. V. 52. P. S217–S226. (doi: 10.1088/0026-1394/52/5/S217)
25. **Qu J.** Improved electronic measurement of the Boltzmann constant by Johnson noise thermometry // *Metrologia*. 2015. V. 52. P. S242–S256. (doi: 10.1088/0026-1394/52/5/S242)
26. **Truong G.-W.** Atomic spectroscopy for primary thermometry // *Metrologia*. 2015. V. 52. P. S324–S342. (doi: 10.1088/0026-1394/52/5/S324)
27. **Joint CCM and CCU roadmap** for the adoption of the revision of the SI. [Офиц. сайт]. <http://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/> (дата обращения: 03.08.2017).
28. **CCM Recommendation G1 (2017):** For a new definition of the kilogram in 2018. [Офиц. сайт]. http://www.bipm.org/cc/CCM/Allowed/16/06E_Final_CCM-Recommendation_G1-2017.pdf (дата обращения: 03.08.2017).
29. **Stock M., Davidson S., Fang H., Milton M., de Mirandes E., Richard P., Sutton C.** Maintaining and disseminating the kilogram following its redefinition // *Metrologia*. 2017. No. 54. P. S99–S107.
30. **Gaiser C.** Final determination of the Boltzmann constant by dielectric-constant gas thermometry // *Metrologia*. 2017. V. 54. P. 280–289. (doi: 10.1088/1681-7575/aa781e)
31. **Qu J.** An improved electronic determination of the Boltzmann constant by Johnson noise thermometry // *Metrologia*. 2017. V. 54. P. 549–558. (doi: 10.1088/1681-7575/aa62e3)
32. **CCT Recommendation T1 (2017):** For a new definition of the kelvin in 2018. [Офиц. сайт]. http://www.bipm.org/cc/CCT/Allowed/Summary_reports/Recommendation-CCT-T1-2017-EN.pdf (дата обращения: 03.08.2017).
33. **Fletcher N.** Electrical Units in the New SI: Saying Goodbye to the 1990 Values // *NCSLI Measure J. Meas. Sci.* 2014. V. 9 No. 3. P. 30–35.

Дата принятия: 03.10.2017.