

Проведенные исследования показали возможность дальнейшего совершенствования эталона с расширением диапазона температур от 1800 до 3000 К. Для этого необходима разработка высокотемпературного термостата с соответствующим диапазоном воспроизведения температур 1800—3000 К.

Л и т е р а т у р а

1. Казанцев В. В., Черепанов В. И., Сенникова В. Н. Стандартные образцы теплофизических свойств твердых веществ. Опыт создания и применения // Стандартные образцы в измерениях и технологиях: Сб. трудов 1-й Междунар. науч. конф. Екатеринбург. 2013. Ч. 1. С. 181—182.
2. Казанцев В. В., Сенникова В. Н., Черепанов В. И. Стандартные образцы теплофизических свойств твердых веществ и материалов // Стандартные образцы. 2014. № 1. С. 66—70.
3. ГОСТ 8.141—75. ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений удельной теплоемкости твердых тел в диапазоне температур от 273,15 до 700 К.
4. ГОСТ 8.178—85. ГСИ. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений удельной теплоемкости твердых тел в диапазоне температур от 90 до 273,15 К.
5. ГОСТ 8.176—85. ГСИ. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений удельной теплоемкости твердых тел в диапазоне температур от 400 до 1800 К.

6. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 января 2014 г. № 51 «Об утверждении Государственного первичного специального эталона единиц удельной энтальпии и удельной теплоемкости твердых тел в диапазоне температуры от 700 до 1800 К».

7. Хеммингер В., Хене Г. Калориметрия. Теория и практика. М.: Химия, 1986.

8. Малышев Ю. О. Автоматизация государственного специального эталона единицы удельной теплоемкости твердых тел в диапазоне температуры (1337—1800) К // Датчики и системы. 2014. № 3. С. 54—59.

9. Gatta G. D. e. a. Standards, calibration, and guidelines in microcalorimetry. Pt. 2. Calibration standards for differential scanning calorimetry // Pure Appl. Chem. 2006. V. 78. N. 7. P. 1455—1472.

10. Archer D. G. Thermodynamic proportion of synthetic sapphire (α -Al₂O₃), standard reference material 720 and the effect of temperature-scale differences on thermodynamic properties // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1993. V. 22. N. 6. P. 1441—1453.

11. Казанцев В. В. и др. Сличения государственных первичных эталонов единиц удельной теплоемкости твердых тел // Измерительная техника. 2014. № 8. С. 66—70; Kazantsev V. V. e. a. Comparisons of state primary special standards of unit of specific heat capacity of solids // Measurement Techniques. 2014. V. 57. N. P. 947—952.

12. ГОСТ Р 8.872—2014. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений удельной энтальпии и удельной теплоемкости твердых тел в диапазоне температуры от 700 до 1800 К.

Дата принятия 21.10.2014 г.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИИ

53.081:531.7

О новых определениях основных единиц СИ. Почему предпочтителен атомный килограмм

К. А. БРОННИКОВ, В. Д. ИВАЩУК, М. И. КАЛИНИН, С. А. КОНОНОВ,
В. Н. МЕЛЬНИКОВ, В. В. ХРУЩЕВ

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва,
Россия, e-mail: ivashchuk@mail.ru

Обсуждается роль фундаментальных констант и результаты измерений постоянных Планка, Авогадро, Кельвина и электрического заряда электрона в связи с планируемым переходом на новые определения четырех основных единиц СИ (килограмма, моля, ампера и кельвина) на основе фиксированных значений этих постоянных.

Ключевые слова: переопределение основных единиц СИ, фундаментальные физические константы, размерность физической величины, нестабильность международного прототипа килограмма.

The role of fundamental constants and measurement data for the Planck, Avogadro and Boltzmann constants and the elementary electric charge in connection with the planned transition to new definitions of four base SI units (the kilogram, mole, ampere and kelvin) based on fixed values of these constants is discussed.

Key words: redefinition of the SI base units, fundamental physical constants, dimension of physical quantity, instability of international prototype of kilogram.

В современной физике существуют три главные нерешенные задачи: объединение четырех известных физических взаимодействий, включая гравитацию; решение проблем

темной энергии и темной материи при современном ускоренном расширении Вселенной; возможные вариации фундаментальных физических констант (ФФК) — постоянной

тонкой структуры, гравитационной постоянной, отношения масс протона и электрона и т. д.

В физических теориях константы характеризуют свойства устойчивости различных видов материи, объектов, процессов и пр. и остаются неизменными при разных обстоятельствах, по крайней мере, в рамках достигнутых неопределенностей результатов измерений. Так как ФФК или их комбинации создают естественные масштабы для основных единиц измерений, их называют фундаментальными. По мере развития науки физические теории заменяются более общими со своими наборами констант, между которыми возникают новые связи. Поэтому можно обсуждать не абсолютный набор каких-либо ФФК, а только соответствующий современной ситуации в физических науках [1].

В настоящее время Стандартная модель сильных и электрослабых взаимодействий согласуется с большинством имеющихся экспериментальных данных. Также существует достаточно хорошо проверенная (в основном в Солнечной системе) теория гравитации, общая теория относительности Эйнштейна. В космологии с быстро развивающейся наблюдательной основой и ее теоретическим осмыслением важную роль играют Стандартная космологическая модель (пространственно-плоская модель Фридмана с космологической постоянной, Λ CDM) и ее многочисленные модификации и обобщения. В каждой из этих теорий со своим набором констант есть проблемы [1, 2], и дальнейшее развитие физики, связанное с их решением, вероятно, изменит существующий набор ФФК, но пока неизвестно, когда это произойдет.

Системы единиц физических величин являются частью необходимого инструментария науки. Как и любые инструменты, они должны соответствовать современной стадии ее развития. Готовящееся в настоящее время переопределение основных единиц Международной системы единиц (СИ) можно рассматривать как ответ на это требование [3]. Планируемая реформа СИ опирается на предложение определить основные единицы, зафиксировав точные значения соответствующих ФФК по принципу, использованному в 1983 г. для переопределения метра.

Реформа СИ обсуждается, начиная с 2005 г., в частности, предложено фиксировать с нулевой неопределенностью значения постоянных Планка h , Больцмана k , Авогадро N_A , заряда электрона e , и на этой основе переопределить килограмм, ампер, кельвин и моль [3–5]. Одна из причин изменения существующих определений этих единиц — выявленная временная нестабильность международного прототипа килограмма (IPK) на уровне $5 \cdot 10^{-10}$ кг в год [6].

Использование точных значений ФФК принципиально для метрологии [7], и предложения по переопределению ряда единиц СИ с помощью фиксации значений ФФК получили поддержку метрологических организаций [3, 5]. Основным препятствием введения новых определений, как только была осознана их необходимость, оказалась недостаточная точность соответствующих ФФК.

Ситуация с переходом к новой СИ (согласно [5] возможно в 2018 г.) отражена в Резолюции 1, принятой на 24-й Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) «О возможном будущем пересмотре Международной системы единиц (СИ)», где предлагается «... продолжить работу, направленную на улучшение формулировок определений основных единиц СИ через фундаментальные константы и по возможности упростить описания для понимания пользо-

вателей, следуя при этом принципам научной строгости и ясности изложения».

Цель данной статьи — обсуждение возможных модификаций новых определений четырех основных единиц СИ (килограмма, моля, ампера и кельвина) с помощью фиксированных значений ФФК, а также процедур реализации и оптимального выбора новых определений для успешного использования в промышленности, торговле, науке и создании благоприятной внешней среды.

Для нового определения единицы массы на 23-й и 24-й ГКМВ были предложены разные варианты, которые рассматривали международные метрологические организации. Среди условий для перехода на новые определения килограмма и моля основным является достижение относительной стандартной неопределенности $u_r = 2 \cdot 10^{-8}$ постоянных h , N_A и согласованности их значений, определяемых разными методами, с $u_r = 5 \cdot 10^{-8}$. Однако даже после выполнения этих условий вопрос о выборе конкретного варианта определения килограмма и моля останется открытым, так как существуют различные варианты новых определений. Например, для единицы массы есть варианты с фиксацией либо h , либо атомной единицы массы. Ниже предлагается выбрать вариант нового определения любой основной единицы СИ с учетом ряда критериев и принципов. При выборе нового определения единицы массы следует учитывать решение G1 Консультативного комитета по массе и связанным с ней величинам (ККМВ), принятое в 2010 г. [3], в котором предложено смягчить ранее принятые рекомендации Международного комитета по мерам и весам (МКМВ) и 23-й ГКМВ для замены IPK следующим образом:

как минимум три независимых эксперимента, включающие эксперимент с ватт-весами и эксперимент Международного координационного проекта Авогадро, должны дать значения соответствующих констант с $u_r \leq 5 \cdot 10^{-8}$, причем хотя бы один из этих результатов должен иметь $u_r \leq 2 \cdot 10^{-8}$;

для каждой из этих соответствующих констант согласие между значениями, полученными в различных экспериментах, должно быть на уровне достоверности 95 %;

должна быть подтверждена согласованность новых прототипов МКМВ с IPK.

Приведенные ограничения минимальны в том смысле, что ослабление требований u_r для измеренных постоянных h , N_A приведет к нарушению сложившейся практики измерений массы с высокой точностью для масс класса E_1 [8].

Условием перехода к новому определению кельвина является достижение $u_r(k) \leq 1 \cdot 10^{-6}$ при измерениях постоянной Больцмана k минимально двумя независимыми методами. До 2010 г. самым точным считалось значение k с $u_r(k) = 1,7 \cdot 10^{-6}$, полученное в 1988 г. [9]. После 2010 г. усилиями ряда научных групп из США, Англии, Германии, Италии и Франции были достигнуты важные результаты в повышении точности измерения k .

Переход к новому определению ампера с использованием фиксированного значения заряда электрона e , с одной стороны, зависит от того, какое решение будет принято о новом определении килограмма (а именно, будет ли зафиксировано значение h); с другой стороны, ожидается создание квантового эталона ампера на основе явления одноэлектронного туннелирования (см. [10–17] и приведенные там ссылки), которое позволит ввести независимое определение ампера.

1. Данные измерений. В настоящее время три эксперимента по определению h , N_A удовлетворяют первому усло-

вию рекомендации G1 KKM 2010 г. [3]. В 2014 г. опубликованы результаты новых измерений постоянной Планка в NIST с помощью ватт-весов (w.b.) [18] и в проекте NRC [19]:

$$h_{\text{NIST-14-w.b.}} = 6,626\,069\,79(30) \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}, \quad u_r = 4,5 \cdot 10^{-8};$$

$$h_{\text{NRC-14-w.b.}} = 6,626\,070\,34(12) \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}, \quad u_r = 2 \cdot 10^{-8}.$$

Эти новые данные, как и результат, полученный в проекте Авогадро (IAC) в 2011 г. [20]:

$$h_{\text{IAC-11-Si-28}} = 6,626\,070\,14(20) \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}, \quad u_r = 3 \cdot 10^{-8},$$

удовлетворяют также и второму условию рекомендации G1 KKM, что позволяет начать переопределение единиц СИ в ближайшие годы. Результаты проекта Авогадро были подтверждены с высокой точностью новыми измерениями молярной массы кремния в NMJ [21] и NIST [22] (см. также [23]). Отметим, что в согласовании CODATA 2010 г. для постоянной Планка принято значение [24]:

$$h_{\text{CODATA-2010}} = 6,626\,069\,57(29) \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}, \quad u_r = 4,4 \cdot 10^{-8},$$

в котором использован результат NIST 2007 г.

При получении h в проекте Авогадро использовали значение

$$N_{\text{A(Avogadro-2010)}} = 6,022\,140\,84(18) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}, \quad u_r = 3 \cdot 10^{-8}$$

и новое значение молярной постоянной Планка

$$N_{\text{A}} h_{\text{CODATA-2010}} = 3,990\,312\,7176(28) \cdot 10^{-10} \text{ Дж}\cdot\text{с}\cdot\text{моль}^{-1}, \\ u_r = 0,7 \cdot 10^{-9},$$

найденное из известного соотношения

$$N_{\text{A}} h = A_r(e) M_u c \alpha^2 / (2 R_{\infty}), \quad (1)$$

где молярная массовая постоянная $M_u = N_{\text{A}} m_u$ совпадает в действующей СИ с $M_{u0} = 1 \text{ г/моль}$; $m_u = m(^{12}\text{C})/12$ — атомная массовая постоянная; $A_r(e)$ — относительная атомная масса электрона; c — скорость света в вакууме; α — постоянная тонкой структуры; R_{∞} — постоянная Ридберга.

Следует отметить, что $u_r(N_{\text{A}} h)$ вносит также ограничение на поправочный коэффициент, возникающий в новом варианте определений килограмма и моля на основе фиксированных значений h , N_{A} :

$$\kappa = M_u / M_{u0} - 1 = N_{\text{A}} m(^{12}\text{C}) / (12 M_{u0}) - 1, \quad (2)$$

$|\kappa| < 1,4 \cdot 10^{-9}$ в доверительном интервале 95 % [24]. Введение параметра κ в новой СИ подвергалось серьезной критике [25—27], исходящей, в основном, от химического и образовательного сообществ. Введение такой новой и ненужной сущности явно не согласуется с известным принципом «бритвы Оккама».

При измерениях постоянной N_{A} с помощью кристаллических кремниевых шаров используется формула $N_{\text{A}} = 8M/(\rho a^3)$, где ρ , M , a — соответственно плотность, молярная масса кремния и постоянная решетки [20]. В этом случае основные вклады в суммарный бюджет неопределенностей

связаны с точностью измерений шероховатой сферической поверхности шара (65,8 %), массы поверхностных слоев шара (16,7 %), параметра кристаллической решетки (8,7 %) и молярной массы кремния (4,9 %). Совокупность этих вкладов не позволила достичь суммарной неопределенности $u_r = 2 \cdot 10^{-8}$, и в результате завершения второго этапа международного проекта Авогадро в конце 2010 г. значение N_{A} было определено с $u_r = 3 \cdot 10^{-8}$ [20]. Полученный результат прошел проверку в PTB, где после удаления меди и никеля с поверхности шара IAC ^{28}Si AVO28-S8 измеренное значение N_{A} совпало в пределах $u_r = 3 \cdot 10^{-8}$. Измерение вкладов посторонних химических элементов в кремниевом образце, из которого был изготовлен шар AVO28-S8, выполненное в INRIM [28], также подтверждает достоверность результата проекта Авогадро.

Измерения в NIST в экспериментах с ватт-весами привели к сдвигу значения h : $(h/h_{90}-1) = 97(37) \cdot 10^{-9}$ [18]. Окончательная корректировка результата NIST произошла из-за перекалибровки платино-иридиевого эталона K85 в BIMP, которая увеличила его массу на $40 \cdot 10^{-9}$, что, в свою очередь, привело к значению $h/h_{90}-1 = 137 \cdot 10^{-9}$, близкому к полученному в [18], однако авторам этой работы не удалось найти удовлетворительное объяснение этого сдвига.

Таким образом, новый результат измерения h , опубликованный в [18], указывает на существование значительных систематических неопределенностей в предыдущем результате NIST 2007 г. и подтверждает результат проекта Авогадро 2011 г.

В области совершенствования методов и средств первичной термометрии, используемых для измерения k с точностью более 10^6 , экспериментальными группами NPL (Англия), PTB (Германия), LNE-CNAM (Франция), NIST (США), INRIM (Италия), NIM (Китай) достигнут значительный прогресс [29—36]. Тщательно исследован и количественно оценен вклад различных экспериментальных факторов в бюджет неопределенности измерений k . Применение современных технологий позволило существенно снизить $u_r(k)$ для первичных термометров различных типов: до $1 \cdot 10^{-6}$ и даже ниже для акустических термометров, до 10^{-5} — 10^{-4} для термометров других типов на основе измерений диэлектрической проницаемости газа, доплеровского расширения спектров поглощения газа, шумовой термометрии.

В [30] приведено значение k с неопределенностью $u_r(k) = 1,24 \cdot 10^{-6}$. В NPL в 2013 г. на акустическом газовом термометре с квазисферическим резонатором был получен результат с $u_r(k) = 0,71 \cdot 10^{-6}$ [33]. По данным CODATA 2010 г. [24] $k = 1,3806488(13) \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ с $u_r(k) = 0,91 \cdot 10^{-6}$. Эти экспериментальные результаты требуют всестороннего анализа полного бюджета неопределенности, включая и методическую составляющую, т. е. оценку точности уравнения состояния рабочего вещества термометров различных типов.

Введение нового определения ампера с помощью фиксированного значения e — также одна из основных задач планируемой реформы СИ. Как известно, до настоящего времени официально действует устаревшее определение ампера на основе взаимодействия параллельных бесконечных проводников с током, тогда как в практике точных электрических измерений используются макроскопические квантовые эффекты — квантовый эффект Холла и эффект Джозефсона, характеризующиеся соответственно постоянными фон Клитцинга R_K и Джозефсона K_J :

$$R_K = h/e^2, \quad K_J = 2e/h. \quad (3)$$

При обсуждении концепции реформы чаще всего предполагается зафиксировать значения h , e с нулевой неопределенностью, а следовательно, и значения постоянных R_K и K_J в соответствии с (3). Тем самым фиксируются единица заряда — кулон и единица силы тока — ампер, равный кулону в секунду, что приводит определения электрических единиц СИ в соответствие с современной практикой измерений.

Однако для систем с малым числом электронов есть обоснованные сомнения в справедливости формул (3), которые требуют независимого экспериментального подтверждения. Такое подтверждение ожидают получить в ближайшие годы на основе явления одноэлектронного туннелирования [10]. Но это явление приведет к независимому варианту определений единиц электрического заряда и силы тока (иначе говоря, к появлению квантового эталона ампера), и возникнет проблема выбора соответствующих формулировок определений в системе СИ. Действительно, прямой подсчет электронов, проходящих в единицу времени через некоторое сечение проводника с током, непосредственно связывает системную единицу заряда (кулон) с элементарным зарядом. Проблема согласования различных вариантов определений кулона и ампера получила условное наименование «квантового метрологического треугольника», замыкание которого — одна из целей проводимых экспериментов с одноэлектронным туннелированием. Иными словами, замыкание треугольника состоит в подтверждении закона Ома между тремя величинами: джозефсоновским напряжением, холловским сопротивлением и током при одноэлектронном туннелировании.

Новое определение ампера должно стать составной частью единой системы определений в СИ, опирающейся на фиксированные значения некоторого набора ФФК. В связи с выбором нового определения килограмма (см. далее разделы 3, 4 статьи) этот набор может не содержать h . Данное обстоятельство еще более повышает ценность варианта определения ампера, не зависящего от h и основанного на подсчете перемещенных элементарных зарядов в проводнике с током в единицу времени.

При планировании реформы СИ по отношению к амперу ставилась задача получения $u_r \leq 10^{-8}$. Исследования и эксперименты, направленные на достижение этой цели, проводятся во многих лабораториях мира. Укажем, в частности, такие перспективные направления как гибридные электронные насосы (металл—полупроводник) [11], электронные насосы на графеновых квантовых точках [12], европейскую программу «Квантовый ампер — реализация нового ампера СИ», промежуточные результаты которой опубликованы в [13—16]. Согласно имеющейся информации, несмотря на значительные успехи исследователей, новое определение ампера на основе e не может быть введено в ближайшее время. В упомянутых здесь работах пока не рассматриваются измерения силы токов с $u_r < 10^{-7}$. Естественно увеличение точности измерений еще на один порядок потребует новых усилий и времени.

2. Критерии оптимального выбора констант с фиксированными значениями для переопределения единиц измерения. На первый взгляд, ни одну физическую константу, значение которой находится в результате измерений, нельзя зафиксировать точно, так как оно обязательно характеризуется неопределенностью. Однако, если эта неопределенность меньше некоторого предела, зависящего от макси-

мальной точности измерений с помощью рассматриваемой единицы, то для нового определения этой единицы допустимо зафиксировать значение соответствующей ФФК при условии, что это не противоречит применению других ФФК с уже фиксированными значениями. Статус используемой ФФК не является абсолютным и может меняться при обобщении теории и повышении точности измерений.

В любом случае, ключевое требование к новой СИ состоит в том, что она не должна ухудшать ситуацию для пользователя по сравнению с действующей. Это означает, прежде всего, преемственность со старой СИ, т. е. использование того же набора основных и производных единиц с теми же значениями без дополнительных коррекций. Кроме того, ревизия СИ, очевидно, не должна нарушать стабильность новых эталонов единиц по сравнению со старыми. Следовательно, *возможная временная нестабильность новых прототипов единиц должна быть менее $5 \cdot 10^{-10}$ в год*. Этот количественный критерий получен исходя из зафиксированной временной нестабильности копий ИРК за 100 лет [6]. По-видимому, он должен выполняться для каждого нового прототипа килограмма в любое время и в любом месте, поскольку именно временная нестабильность ИРК является одной из причин планируемого перехода к новым определениям четырех единиц СИ. Аналогичные требования относятся ко всем основным единицам СИ.

Здесь не обсуждаются вариации ФФК в космологических масштабах времени и расстояний, которые связаны с проблемами объединения взаимодействий, темной материи и темной энергии [37, 38]. Такие вариации, если они есть, слишком малы и в настоящее время не могут повлиять на стабильность используемых эталонов. Однако они чрезвычайно важны для развития существующих теорий фундаментальных взаимодействий [1].

Для установления связей между СИ и физическими теориями желательно, чтобы число фиксируемых констант было минимально возможным и связь между используемой ФФК и соответствующей единицей измерения была максимально простой. Те же условия способствовали бы улучшению преподавания основ метрологии в учебных заведениях различного уровня. Эта цель достигается, если основная единица измерения (BU) и соответствующая ФФК (FPC) имеют одинаковую физическую размерность, т. е.

$$[D]_{BU} = [D]_{FPC}. \quad (4)$$

Однако буквальное применение этого принципа приведет к тому, что к основным единицам измерений новой СИ нельзя будет отнести метр и ампер. Тогда основными станут единицы скорости и электрического заряда, что противоречит требованиям преемственности и международному стандарту ISO/IEC 80 000, определяющему наборы основных единиц СИ и физических величин. Чтобы сохранить метр и ампер в числе основных единиц новой СИ, условие (4) следует обобщить [39] и сформулировать в следующем виде: *основная единица измерения определяется с помощью ФФК той же размерности или размерности, отличающейся от нее на степень времени*:

$$[D]_{BU} = [D]_{FPC} [T]^d,$$

где d — рациональное число.

Это позволяет сохранить определение метра с фиксацией значения скорости света и ввести новое определение ампера с использованием e . С учетом рекордной точности измерения времени или частоты возможное присутствие дополнительного фактора $[T]^d$ не повлияет на точность воспроизведения рассматриваемой единицы.

Максимальная простота новой СИ и ее преемственность со старой предполагают, если это возможно, независимость единиц измерений и отсутствие каких-либо корректирующих коэффициентов (наподобие k в уравнении (2)) при переходе к новым определениям. Далее следует, что «электрический килограмм» нарушает последнее условие, тогда как «атомный килограмм» удовлетворяет ему.

Итак, в качестве критериев оптимальности набора фиксируемых ФФК для использования в новых определениях единиц СИ предлагаются: преемственность новых определений по отношению к старым; стабильность передачи единиц; минимум числа фиксируемых ФФК и отсутствие дополнительных корректирующих факторов; простота связи между единицей измерения и соответствующей ей ФФК, т. е. согласование их размерностей.

3. Определения килограмма и моля: «электрический килограмм» и связанные с ним проблемы. К моменту введения «светового метра» в 1983 г. точности измерений частоты и скорости света c на порядок и более превосходили точность измерения длины, что и обусловило возможность фиксации значения c . Для четырех предлагаемых к переопределению единиц СИ с использованием констант h , e , k , N_A современное положение дел отличается, причем для каждой из них оно свое. Если одновременно принять все новые определения единиц СИ на основе указанных ФФК, то это потребует прежде всего их согласования. Так, одновременная фиксация h , N_A приведет к жесткой связи между c , M_u , $A_r(e)$, α , R_∞ (см. (1)). Чтобы этого избежать, придется изменить действующие определения констант, например M_u , что и предлагается при введении новых определений килограмма и моля на основе фиксированных значений h , N_A . Это явный недостаток новых определений, так как молярная постоянная M_u перейдет в разряд изменяющихся физических величин ($M_u = M_{u0}(1+\kappa)$), где κ — экспериментально определяемая поправка, значение которой необходимо будет менять с появлением новых данных.

При учете влияния на работу watt-весов внешних факторов, таких как микросейсмы, изменение электромагнитного поля, зависимость гравитационной силы от места измерения и т. д., будет крайне сложно обеспечить стабильность передачи единицы нового килограмма с помощью такого сложного электромеханического устройства. Это подтверждается сравнительно большими систематическими погрешностями, не учтенными в 2007 г. [18]. Таким образом, определение килограмма на основе фиксированного значения h («электрический килограмм» [40]) не удовлетворяет критериям, сформулированным в предыдущем разделе.

4. Определения килограмма и моля: «атомный килограмм» и его преимущества. Рассмотрим альтернативную процедуру переопределения единиц массы и количества вещества на основе фиксированного значения постоянной Авогадро N_A^* и массы изотопа атома углерода ^{12}C или атомной единицы массы. При этом для преемственности с действующей СИ сохраним определение молярной массы ^{12}C , равной 12 г. Таким образом, будут выполняться критерий

преемственности и критерий (4) совпадения размерностей единицы измерения и ФФК, роль которой играет в данном случае атомная единица массы. В результате будут одновременно заданы как микроскопический эталон массы, основанный на массе атома ^{12}C , так и макроскопический эталон массы, основанный на двух инвариантах: массе атома ^{12}C и фиксированном значении N_A . Заметим, что масса атома углерода точно определяется через новую единицу массы после фиксации постоянной Авогадро. Таким образом, предлагается, чтобы между фиксированными числами $\{N_A^*\}$,

$\{N_{\text{kg}}^*\}$ выполнялось соотношение $\{N_A^*\} = 0,012 \{N_{\text{kg}}^*\}$, где фиксированное число атомов углерода $\{N_{\text{kg}}^*\}$ входит в определение макроскопической единицы массы новой СИ — килограмма*, причем значение молярной постоянной M_u в новых единицах килограмм* и моль* не меняется [39, 41]. Далее величины, определяемые при фиксированном значении N_A^* , будем отмечать звездочкой. В этом случае новое определение единицы массы можно сформулировать так: килограмм*, единица массы, является точной массой $\{N_A^*\}/0,012$ свободных атомов ^{12}C в состоянии покоя и основном квантовом состоянии. Это определение соответствует новому определению единицы количества вещества: моль*, единица количества вещества, содержит $\{N_A^*\}$ структурных элементов данного вещества. Предлагаемые определения килограмма и моля согласуются с существующими в настоящее время определениями этих единиц в рамках СИ и той связью, которая между ними существует. Следовательно, в этом случае сохраняются существующие значения молярной массы углерода $M(^{12}\text{C})$ и константы M_u , равные соответственно 12 и 1 г/моль. В то же время, приведенные выше новые определения килограмма и моля могут быть введены независимо друг от друга.

Для конкретизации значения $\{N_A^*\}$ можно использовать дополнительные условия. Например, желательно, чтобы единицы массы СИ и СГС, килограмм и грамм, содержали целое число атомов ^{12}C . В этом случае значение $\{N_A^*\}$ должно делиться на 12 [39] и к тому же принадлежать экспериментально определенному 1σ -интервалу [20]:

$$\{N_A^*\} = (6,02214066...6,02214102) \cdot 10^{23}.$$

Таким образом, приходим к $\{N_A^*\} = 602214087869325727188096$ и более конкретным определениям килограмма и моля. *Килограмм — единица массы, точно равная сумме масс $50184507322443810599008 \cdot 10^{-3}$ свободных атомов ^{12}C в состоянии покоя и основном квантовом состоянии. Моль — единица количества вещества, содержащая точно 602214087869325727188096 частиц этого вещества.* Эти определения килограмма и моля сохраняют преемственность с действующими определениями СИ и не нарушают существующие метрологические цепочки передачи единиц массы, количества вещества и сложившуюся практику измерений масс, молярных масс и количества вещества [6, 8, 24, 42].

Как следует из изложенного выше, при использовании последнего варианта определения килограмма единица ампера на основе фиксации e также должна стать независимой от других единиц с опорой на ожидаемый в скором будущем квантовый эталон. Этот факт является важным преимуществом, поскольку существует ненулевая вероятность того, что метрологический треугольник нельзя будет замкнуть абсолютно точно, т. е. появятся некоторые поправки к соотношениям (3), которые усложнят определение ампера при фиксированных h , e .

Таким образом, приходим к выводу, что набор ФФК, которые необходимы для определения «атомного килограмма», удовлетворяет приведенным выше четырем критериям и поэтому предпочтителен для планируемой ревизии СИ. Для полноты следует отметить, что в варианте новой СИ с «атомным килограммом» получим для постоянной Планка $u_r(h) = u_r(N_A h) = 0,7 \cdot 10^{-9}$ [24]. Для электрической и магнитной проницаемостей ϵ_0 , μ_0 , связанных соотношением $\epsilon_0 \mu_0 = c^{-2}$, исходя из определения $\alpha = e^2/(2\epsilon_0 \hbar c)$ и уравнения (1) в соответствии с [24] имеем

$$u_r(\epsilon_0) = u_r(\mu_0) = u_r(A_r(e)\alpha^3/R_\infty) \approx 1 \cdot 10^{-9}.$$

В другой версии новой СИ [4] получим $u_r(\epsilon_0) = u_r(\mu_0) = u_r(\alpha) = 3,2 \cdot 10^{-10}$, однако для точности, которая должна быть достигнута, достаточно значения 10^{-9} .

5. Перспективы переопределения кельвина. К настоящему времени усилиями международных метрологических организаций и национальных метрологических институтов первую задачу — переопределение единицы термодинамической температуры через адекватную формулировку определения кельвина — можно считать решенной. Практически все специалисты едины во мнении, что кельвин следует связывать с точным значением k . Дело в том, что постоянная Больцмана носит характер пересчетного коэффициента между двумя температурными шкалами [4, 43]. Действительно, термодинамическая температура T входит в законы физики в виде комбинации $\theta = kT$, которая и измеряется в термометрических экспериментах.

В [44] показано, что в молекулярной системе конечных объема V и числа частиц N все термодинамические функции — аналитические и не имеют разрывов даже в области фазового перехода. Математически переход от одной фазы к другой в пространстве термодинамических параметров (например температуры) происходит непрерывно, но в очень узкой области, имеющей ненулевые размеры. При этом, чем больше объем системы, тем уже переходная область в пространстве термодинамических параметров. И только в термодинамическом пределе ($N \rightarrow \infty$, $V \rightarrow \infty$, $N/V = \text{const}$) размеры указанной области стремятся к нулю [44], и в уравнении состояния появляются разрывы.

В реальной же макроскопической системе нельзя с нулевой неопределенностью задать температуру фазового перехода или сосуществования трех фаз (например, температуру тройной точки воды (ТТВ) в энергетической шкале $\theta_{\text{ТТВ}}$), поскольку переходная область в пространстве термодинамических параметров формально имеет ненулевой размер. Это относится и к $T_{\text{ТТВ}}$. Коэффициент, связывающий

эти две температурные шкалы, можно задать точно, что и служит основой предлагаемого переопределения единицы термодинамической температуры.

Физически термометрические установки имеют неопределенность измерения на много порядков большую, чем размеры указанной области фазового перехода для реальной макроскопической системы. Поэтому термометр воспринимает ее как одну точку разрыва, которая и называется точкой фазового перехода. В настоящее время для определения кельвина используют одну из таких точек (тройную точку воды) и с точным значением $T_{\text{ТТВ}} = 273,16$ К. Однако фиксация точного значения k физически ближе к представлениям современной статистической механики, чем фиксация точного значения температуры фазового перехода в одной из температурных шкал [43, 45].

Другая задача введения нового определения кельвина — нахождение точного значения k . Самый прямой метод нахождения $\theta_{\text{ТТВ}}$ — ее теоретический расчет в рамках статистической механики [43, 45]. Однако до настоящего времени не существует методов не только точного, но и приближенного расчета с точностью, с которой эта величина измеряется в современных газовых термометрах различных типов. Поэтому наиболее реально экспериментальное определение k с $u_r \leq 1 \cdot 10^{-6}$.

Измерение $\theta_{\text{ТТВ}}$ с помощью первичных термометров позволяет найти k из соотношения $k = \theta_{\text{ТТВ}}/273,16$, точность которого равна точности измерения $\theta_{\text{ТТВ}}$. Это значение k далее будет использоваться во всех измерениях термодинамической температуры, а ее неопределенность будет влиять на общую неопределенность измеряемой термодинамической температуры. Как показано в разделе 1, эта задача успешно решается, и вполне вероятно, что в ближайшие 3—4 года значения k с требуемой точностью для перехода к новому определению кельвина будут получены в нескольких независимых лабораториях.

Отметим также различие в переопределениях кельвина и килограмма, моля, ампера. Точность термометрических измерений на полтора-два порядка ниже точностей современных значений h , N_A , e . Поэтому можно будет вводить новое определение кельвина независимо от их точностей при надежном повышении точности измерения k . В противоположность этому новые определения единиц массы и количества вещества взаимозависимы, и переход к ним возможен только одновременно для обеих величин.

Заключение. Проанализированы предлагаемые варианты новых определений килограмма, ампера, кельвина и моля на основе фиксации точных значений ряда ФФК. В конце раздела 2 сформулированы критерии выбора ФФК с фиксированными значениями для переопределений основных единиц СИ, которым, в частности, удовлетворяют масса атома ^{12}C и e . Показаны преимущества определения килограмма на основе атомной единицы массы u («атомного килограмма»), при котором сохраняется значение молярной массы ^{12}C , равное 12 г/моль.

Фиксация u , N_A приведет к наглядным и логически безупречным определениям килограмма и моля, совместимым с ныне действующими определениями этих двух единиц и сложившейся практикой измерений массы, молярной массы и

количества вещества [25, 39]. Кроме того, значение массы ^{12}C является природным инвариантом. Отметим, что в 2011 г. Комиссия по относительному содержанию изотопов и атомным весам (CIAAW) Международного союза чистой и прикладной химии (IUPAC) поддержала определение килограмма на основе атомной единицы массы (daltona) [26].

Основные физические величины, используемые в метрологии, предполагаются независимыми друг от друга, однако допустима зависимость между соответствующими единицами измерений. Например, в действующей СИ определение моля зависит от определения килограмма. Как следует из раздела 4, можно ввести независимые и равноправные определения единиц массы и количества вещества, при этом сохранив существующую связь между ними.

Концепция «электрического килограмма», включающая фиксацию h , не только нарушает упомянутые критерии, но и затрудняет определение ампера. При фиксации h , e величины $2e/h$, h/e^2 приобретают точно определенные значения, так что практические электрические единицы ома и вольта перейдут в новую СИ. Однако, как обсуждалось выше, это невозможно до замыкания «квантового метрологического треугольника» и, вероятно, оно не будет полным. Поэтому есть серьезные причины отнести h к классу электромагнитных квантовых констант вместе с K_J , R_K . Тогда определение ампера будет обеспечено новым квантовым эталоном на основе одноэлектронного туннелирования с фиксацией лишь e и не будет зависеть от определения килограмма и h . При этом в соответствии с согласованием результатов различных экспериментов K_J , R_K будут известны с современной или еще большей точностью. На определенном уровне точности целесообразно сохранить практику применения фиксированных значений K_J , R_K , оставив открытой возможность более точного измерения h для проверки существующих и поиска новых теорий. Таким образом, в варианте новой СИ с «атомным килограммом» все четыре обсуждаемые единицы оказываются независимыми.

Что касается кельвина, то, как следует из раздела 5, определять его, фиксируя точное значение k как пересчетного коэффициента между двумя температурными шкалами, предпочтительнее, чем фиксировать ТТВ в термодинамической температурной шкале. Наиболее точные значения k получены с помощью акустических газовых термометров, другие методы гораздо менее точные. Все экспериментальные результаты требуют тщательного анализа бюджетов неопределенностей вместе с оценкой точности уравнения состояния рабочего вещества, а также независимого подтверждения в экспериментах на установках различных типов. Быстрый прогресс первичной термометрии показывает, что надежное достижение требуемой точности измерения k в ближайшие годы вполне реально. После этого можно ввести новое определение кельвина вне зависимости от того, будут ли уже достигнуты необходимые условия перехода к новым определениям килограмма, моля и ампера.

Принятие новой СИ, как предполагается, произойдет на ГКМВ в 2018 г. [5]. Пока еще есть время рассмотреть достоинства и недостатки предлагаемых новых определений единиц СИ и их альтернативные варианты (см., например, [26, 27]) с учетом выполнения всех необходимых критериев и даль-

нейшего уменьшения неопределенностей ФФК с надеждой на достижение такого же прогресса в метрологии, какой сопутствовал введению нового определения метра в 1983 г.

Л и т е р а т у р а

1. **Melnikov V. N.** Gravitation and cosmology as key problems of the millennium / A. Einstein Century Int. Conf. // AIP Conf. Proc. Paris: 2006. N. 861. P. 109—126.
2. **Kononogov S. A., Melnikov V. N., Khrushchov V. V.** Constants of the Extended Standard Model and search for their temporal variations // Gravitation and Cosmology. 2009. V. 15. N. 2. P. 158—163.
3. **Официальный сайт МБМВ.** www.bipm.org. (дата обращения 02.09.2014 г.).
4. **Mills I. M. e. a.** Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005) // Metrologia. 2006. V. 43. N. 3. P. 227—246.
5. **Milton M. J. T., Davis R., Fletcher N.** Towards a new SI: a review of progress made since 2011 // Metrologia. 2014. V. 51. N. 3. P. R21—R30.
6. **Girard G.** The third periodic verification of national prototypes of the kilogram // Metrologia. 1994. V. 31. P. 317—336.
7. **Кононогов С. А., Мельников В. Н.** Фундаментальные физические константы, гравитационная постоянная и проект космического эксперимента SEE // Измерительная техника. 2005. № 6. С. 3—9; **Kononogov S. A., Mel'nikov V. N.** The Fundamental Physical Constants, the Gravitational Constant, and the See Space Experiment Project // Measurement Techniques. 2005. V. 48. N. 6. P. 521—531.
8. **Gläser M. e. a.** Redefinition of the kilogram and the impact on its future dissemination // Metrologia. 2010. V. 47. P. 419—428.
9. **Moldover M. R. e. a.** Measurement of the Universal Gas Constant R Using a Spherical Acoustic Resonator // J. Res. NBS. 1988. V. 93. N. 2. P. 85—144.
10. **Grabert H., Devoret M. H.** Single charge tunneling: Coulomb blockade phenomena in nanostructures. N.Y.: Plenum Press, 1992.
11. **Jehl X. e. a.** Hybrid Metal-Semiconductor Electron Pump for Quantum Metrology // Phys. Rev. X. 2013. V. 3. P. 021012 [Электрон. ресурс]. <http://Arxiv:1302.6470> (дата обращения 15.09.2014 г.).
12. **Connolly M. R. e. a.** Gigahertz quantized charge pumping in graphene quantum dots [Электрон. ресурс]. <http://Arxiv:1207.6597> (дата обращения 15.09.2014 г.).
13. **Wulf M.** Error accounting algorithm for electron counting experiments // Phys. Rev. B. 2013. V. 87. P. 035312.
14. **Fricke L. e. a.** Counting Statistics for Electron Capture in a Dynamic Quantum Dot // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. P. 126803.
15. **Devoille L. e. a.** Quantum metrological triangle experiment at LNE: Measurements on a 3 junction R pump using a 20 000:1 winding ratio CCC // Meas. Sci. Technol. 2012. V. 23. P. 124011.
16. **Mirovsky P. e. a.** Towards quantized current arbitrary waveform synthesis // J. Appl. Phys. 2013. V. 113. P. 213704.
17. **Fricke L. e. a.** A self-referenced single-electron quantized-current source // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 112. P. 226803 [Электрон. ресурс]. <http://Arxiv:1312.5669> (дата обращения 02.09.2014 г.).

18. **Schlamminger S. e. a.** Determination of the Planck constant using a watt balance with a superconducting magnet system at the National Institute of Standards and Technology // *Metrologia*. 2014. V. 51. N. 2. P. S15—S24.
19. **Sanchez C. A. e. a.** A determination of Planck's constant using the NRC watt balance // *Metrologia*. 2014. V. 51. N. 2. P. S5—S14.
20. **Andreas B. e. a.** (IAC) Counting the atoms in a ^{28}Si crystal for a new kilogram definition // *Metrologia*. 2011. V. 48. P. S1—S13.
21. **Narukawa T. e. a.** Molar-mass measurement of a ^{28}Si -enriched silicon crystal for determination of the Avogadro constant // *Metrologia*. 2014. V. 51. P. 161—168.
22. **Vocke Jr. R. D., Rabb S. A., Turk G. C.** Absolute silicon molar mass measurements, the Avogadro constant and the redefinition of the kilogram // *Metrologia*. 2014. V. 51. P. 361—365.
23. **Li Shi-Song e. a.** Progress on accurate measurement of the Planck constant: watt balance and counting atoms [Электрон. ресурс]. <http://arXiv:1409.7597> (дата обращения 15.09.2014 г.).
24. **Mohr P. J., Taylor B. N., Newell D. B.** CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2010 // *Rev. Mod. Phys.* 2012. V. 84. P. 1527—1595.
25. **Hill T. P., Miller J., Censullo A. P.** Towards a better definition of the kilogram // *Metrologia*. 2011. V. 48. P. 83—86.
26. **De Bievre P.** Second opportunity for chemists to re-think the mole // *Accred. Qual. Assur.* 2013. V. 18. P. 537—540.
27. **Хилл Т. П., Хрущев В. В.** Существует ли объективная необходимость скорейшего переопределения килограмма и моля? // *Измерительная техника*. 2013. № 7. С. 14—17; **Hill T. P., Khrushchov V. V.** Is there an objective need for an urgent redefinition of the kilogram and mole? // *Measurement Techniques*. 2013. V. 56. N 7. P. 747—752.
28. **D'Agostino G. e. a.** Instrumental neutron activation analysis of an enriched ^{28}Si single crystal [Электрон. ресурс]. <http://arXiv:1309.4865> (дата обращения 15.09.2014 г.).
29. **Merlone A. e. a.** Design and Capabilities of the Temperature Control System for the Italian Experiment Based on Precision Laser Spectroscopy for a New Determination of the Boltzmann constant // *Int. J. Thermophys.* 2010. V. 31. N. 7. P. 1359—1370.
30. **Pitre L. e. a.** Measurement of the Boltzmann Constant k_B Using a Quasi-Spherical Acoustic Resonator // *Int. J. Thermophys.* 2011. V. 32. N. 9. P. 1825—1886.
31. **Zandt T. e. a.** Capabilities for Dielectric-Constant Gas Thermometry in a Special Large-Volume Liquid Bath Thermostat // *Int. J. Thermophys.* 2011. V. 32. N. 7—8. P. 1355—1365.
32. **Temperature:** Its measurement and control in science and industry / 9th Int. Temperature Symp. 19—23 Mar. 2012, Los Angeles, CA // *AIP*. 2013. V. 8. N. 1552.
33. **De Podesta M. e. a.** A law-uncertainty measurement of the Boltzmann constant // *Metrologia*. 2013. V. 50. N. 4. P. 354—376.
34. **Lemarchand C. e. a.** A revised uncertainty budget for measuring the Boltzmann constant using the Doppler Broadening Technique on ammonia // *Metrologia*. 2013. V. 50. N. 6. P. 623—630.
35. **Lin H. e. a.** Improved determination of the Boltzmann constant using a single, fixed-length cylindrical cavity // *Metrologia*. 2013. V. 50. N. 5. P. 417—432.
36. **Moldover M. R. e. a.** Acoustic gas thermometry // *Metrologia*. 2014. V. 51. N. 1. P. R1—R19.
37. **Бронников К. А., Кононогов С. А., Мельников В. Н.** Вариации постоянной тонкой структуры и многомерная гравитация // *Измерительная техника*. 2013. № 1. С. 7—13; **Bronnikov K. A., Kononogov S. A., Melnikov V. N.** Variations in the Fine Structure Constant and Multidimensional Gravitation // *Measurement Techniques*. 2013. V. 56. N. 1. P. 8—16.
38. **Бронников К. А., Кононогов С. А., Мельников В. Н.** Вариации гравитационной постоянной G в обобщенных теориях гравитации // *Измерительная техника*. 2014. № 11. С. 22—26.
39. **Исаев Л. К., Кононогов С. А., Хрущев В. В.** О переопределении четырех основных единиц СИ // *Измерительная техника*. 2013. № 2. С. 3—8; **Issaev L. K., Kononogov S. A., Khrushchov V. V.** On the redefinition of the four base SI units // *Measurement Techniques*. 2013. V. 56. N. 2. P. 113—120.
40. **Steiner R., Williams E.R., Newell D. B.** Towards an electronic kilogram: an improved measurement of the Planck constant and electron mass // *Metrologia*. 2005. V. 42. P. 431—441.
41. **Кононогов С. А., Хрущев В. В.** О возможности замены прототипа килограмма атомным эталоном единицы массы // *Измерительная техника*. 2006. № 10. С. 3—8; **Kononogov S. A., Khrushchov V. V.** Scope for replacing the prototype kilogram by an atomic mass unit // *Measurement Techniques*. 2006. V. 49. N. 10. P. 953—956.
42. **Leonard B. P.** Why the dalton should be redefined exactly in terms of the kilogram // *Metrologia*. 2012. V. 49. P. 487—491.
43. **Калинин М. И., Кононогов С. А.** Постоянная Больцмана, энергетический смысл температуры и термодинамическая необратимость // *Измерительная техника*. 2005. № 7. С. 5—8; **Kalinin M. I., Kononogov S. A.** Boltzmann's Constant, the Energy Meaning of Temperature, and Thermodynamic Irreversibility // *Measurement Techniques*. 2005. V. 48. N. 7. P. 632—636.
44. **Yang C. N., Lee T. D.** Statistical Theory of Equations of State and Phase Transitions. I. Theory of Condensation // *Phys. Rev.* 1952. V. 87. N. 3. P. 404—409.
45. **Калинин М. И., Кононогов С. А.** Переопределение единицы термодинамической температуры в Международной системе единиц (СИ) // *Теплофизика высоких температур*. 2010. Т. 48. № 1. С. 26—31.

Дата принятия 04.11.2014 г.