



С. А. Конозов,
д.т.н., профессор, директор
ФГУП «ВНИИМС»

Ключевые слова: международная система единиц СИ, переопределение основных единиц СИ, фундаментальная физическая константа, нестабильность Международного прототипа килограмма.

О ПЕРЕОПРЕДЕЛЕНИИ НЕКОТОРЫХ ОСНОВНЫХ ЕДИНИЦ СИ

Рассмотрены различные варианты переопределения четырех основных единиц международной системы СИ на основе фундаментальных физических констант (ФФК). Рассматривается связь между определениями моля и килограмма в действующей СИ и возможность её сохранения в обновленной СИ. Предложено переопределить килограмм и моль с помощью фиксированного значения постоянной Авогадро и после повышения точности измерения разными способами постоянной Больцмана, а также замыкания «квантового треугольника» предлагается переопределить кельвин и ампер.

Сегодня взаимное влияние физики и метрологии, тенденция к единому подходу метрологического обеспечения науки и практики проявляется и в предстоящих серьёзных преобразованиях Международной системы единиц – СИ. В настоящее время Международный комитет мер и весов готовит реформу СИ, которая предполагает переопределение ряда основных единиц системы на основе фиксации значений ряда фундаментальных физических констант (ФФК) – естественных природных инвариантов с нулевой неопределенностью. Это революционное для метрологии изменение основных представлений о единицах физических величин и их эталонах опирается на достижения в области физики, квантовой и гравитационно-релятивистской метрологии и современные технологии. Работа в этом направлении ведется совместными усилиями физиков и метрологов уже несколько десятилетий, в частности и во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологической службы (ВНИИМС).

Как известно, предложения по переопределению четырех единиц на основе фиксированных значений ФФК в рамках новой СИ базируются на принципе фиксации точного значения соответствующей ФФК, который был использован при определении метра в 1983 г. Предлагается зафиксировать с нулевой неопределенностью точные значения четырех констант h , e , k и N_A , и затем с их помощью переопределить килограмм, ампер, кельвин и моль [1–4].

В качестве основных вариантов новых определений килограмма рассматриваются два определения на основе ФФК, а именно: определение килограмма на основе постоянной Планка h и определение килограмма на основе постоянной Авогадро N_A и атомной единицы массы (*a.e.m.*). Эти два определения килограмма было предложено осуществить с помощью следующих экспериментальных устройств. Определение единицы массы на основе постоянной Планка h было предложено реализовать с помощью ватт-весов, в кото-

рых используется определенное равенство электрической и механической мощностей. Это достигается, в частности, балансировкой образца с заданной массой и катушки с током в магнитном поле. Ток и сопротивление катушки измеряются с помощью квантовых стандартов Джозефсона и Холла. Воспроизводимая таким образом единица массы получила название «электрический килограмм». Единица массы на основе постоянной Авогадро N_A и атомной единицы массы $a.e.m.$ может быть реализована с помощью кристаллических кремниевых шаров, реализуемая таким образом единица массы называется «атомным килограммом». Для реализации атомного килограмма необходимо создать образец с практически идеальной кристаллической решеткой, образец делается в виде шара с высочайшей геометрической точностью [4,5].

Решением XIV Генеральной конференции по мерам и весам (1971 г.) единица количества вещества – моль была утверждена в качестве седьмой основной единицы SI. «Моль есть количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг». Постоянная Авогадро N_A – число атомов (молекул), содержащихся в одном моле вещества, – принята равной (данные CODATA 2006 г.) $6,022\ 141\ 79(30) \times 10^{23}$ моль⁻¹, стандартная относительная неопределенность этого значения равна: 5×10^{-8} .

Как известно, есть два основных варианта переопределения моля. Первый вариант основан на переопределении килограмма путем фиксации постоянной Планка и заряда электрона. Второй вариант основан на фиксации числа Авогадро, что приводит к замене обычного выражения, связывающего молярную массу с относительной атомной массой выражением, содержащим корректирующий коэффициент $(1 + \kappa)$, относительная неопределенность которого и сама величина κ не должны превышать 2×10^{-9} .

Предполагаемое переопределение ампера на основе постоянных Джозефсона и фон Клитцинга должно было бы заменить устаревшее определение, привязанное к измерению сил между параллельными проводниками с током, и привести определение единицы

СИ в соответствие с современной практикой измерений, которая в России уже с 1991 г. опирается на действующий ГОСТ 8.022-91. Проблема, однако, заключается в том, что соотношения Джозефсона и фон Клитцинга, позволяющие связать единицу силы тока с фундаментальными константами и до настоящего времени хорошо подтверждаемые экспериментом, обоснованы теорией лишь на полуклассическом уровне, т. е. для достаточно большого числа электронов, а это приближение уже не работает в некоторых современных устройствах, особенно нанотехнологического характера.

Независимое подтверждение указанных соотношений могло бы появиться, если бы удалось построить эталон силы электрического тока на основе прямого подсчета числа электронов, проходящих через заданное сечение проводника в единицу времени. Такие попытки делаются при помощи так называемых одноэлектронных транзисторов, которые в настоящее время активно разрабатываются и совершенствуются в ряде лабораторий мира, включая российские. Однако точность подсчета электронов пока далека от той, которая необходима для создания независимого квантового эталона ампера, и исследователи пока воздерживаются от прогнозов времени его реализации.

Единицу термодинамической температуры – кельвин предлагается определить в будущей Международной системе единиц (СИ) фиксацией постоянной Больцмана k_B . Принципиально такое предложение обосновано и соответствует физической сущности самого понятия температура [4,11]. Основной задачей в этой области сейчас является получение значения постоянной Больцмана с более высокой точностью, чем она известна в настоящее время. Считается, что если удастся получить величину постоянной Больцмана с относительной стандартной неопределенностью порядка 1×10^{-6} , то это значение можно будет зафиксировать в будущей системе единиц как точное, не имеющее неопределенности. Тогда температура тройной точки воды, которая сейчас считается заданной без неопределенности, станет физической величиной, имеющей такую же температуру 273,16 К, что и сейчас, но имеющей неопределенность 1×10^{-6} .

При этом не возникнет больших расхождений в значениях всех теплофизических величин, измеряемых в современной системе единиц и в новой. Прямым методом нахождения постоянной Больцмана в соответствии с ее определением является теоретический расчет характеристик тройной точки воды на основе микроскопических характеристик молекулярной системы методами статистической механики [4,11]. Однако в настоящее время методы расчёта характеристик критических явлений с необходимой метрологической точностью не разработаны. Основным методом определения значения постоянной Больцмана в настоящее время остается его экспериментальное измерение с помощью различных установок.

Наиболее обсуждаемая проблема в метрологическом сообществе – переопределение килограмма.

Для новых определений единиц измерений массы и количества вещества были предложены разные варианты, которые рассматривались международными метрологическими организациями и были представлены на 23-й и 24-й ГКМВ [1,3]. Среди различных критериев перехода на новые определения единиц СИ основным является достижение уровня 10^{-8} для относительной стандартной неопределенности значений постоянных Планка и Авогадро и совпадение их значений, определяемых разными методами, в пределах установленных стандартных неопределенностей. Даже после выполнения этих условий вопрос о выборе конкретного варианта определения, например единицы массы, останется открытым.

Позже в решении G1 Консультативного комитета по массе и связанным с ней величинам (ККМ), принятой на совещании в 2010 г. [8], было предложено смягчить ранее принятые рекомендации МКМВ и 23-й ГКМВ для замены Международного прототипа килограмма (IPK):

♦ как минимум три независимых эксперимента, включая эксперимент с ватт-весами и эксперимент Международного координационного проекта Авогадро, должны дать значения соответствующих констант с относительными стандартными неопределенностями, не превышающими 5×10^{-8} . По меньшей мере, один из этих результатов

должен иметь относительную стандартную неопределенность, не превышающую 2×10^{-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.

Среди основных результатов, полученных во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологической службы по анализу перехода на новые определения единиц СИ, основанные на ФФК, можно назвать переопределение на основе фиксации числа Авогадро (атомный килограмм) [6,7].

Предлагается сохранить действующую в СИ связь между единицами количества вещества и массы:

$$\{N_A^*\} = 0,012 \{Nkg^*\},$$

где фиксированное число атомов углерода (Nkg^*) задает макроскопическую единицу массы новой СИ – килограмм*, причем значение молярной постоянной M_u в новых единицах килограмм* и моль* не меняется [7,12].

Таким образом, будем считать основным следующее определение единицы массы: *килограмм** – единица массы – является точной массой $\{N_A^*\}/0,012$ свободных атомов углерода-12 в состоянии покоя и в основном квантовом состоянии.

Большим преимуществом этого определения единицы массы является то, что оно одновременно вводит новое определение единицы количества вещества, а именно: *моль**, единица количества вещества, содержит $\{N_A^*\}$ структурных элементов данного вещества. Или:

Килограмм – единица массы, точно равная сумме масс $50184507322443810599088 \times 10^3$ свободных атомов углерода-12 в состоянии покоя и в основном состоянии.

Моль – единица количества вещества, содержащая точно 602214087869325727188096 частиц этого вещества.

Такие определения килограмма и моля согласуются с существующими в настоящее время определениями этих единиц в рамках СИ и той связью, которая между ними суще-

ствуется. Следовательно, в этом случае можно сохранить существующие значения молярной массы углерода $M(^{12}\text{C})$ и константы молярной массы M_u , равные, соответственно, 12 г/моль и 1 г/моль.

Заметим, что определенная выше единица количества вещества становится в то же время независимой от определения килограмма. Основой нового определения килограмма является природный инвариант – масса атома углерода-12.

Если использовать фиксированное значение числа Авогадро, то новые определения килограмма и моля будут формулироваться следующим образом.

Килограмм – единица массы, точно равная сумме масс $50184507322443810599088 \times 10^3$ свободных атомов углерода-12 в состоянии покоя и в основном состоянии.

Моль – единица количества вещества, содержащая точно 602214087869325727188096 частиц этого вещества.

Приведенные выше определения килограмма и моля сохраняют преемственность с действующими определениями и не нарушают существующие метрологические цепочки передачи размеров единиц массы, количества вещества и сложившуюся практику измерений масс, молярных масс и количества вещества.

Таким образом, в рассматриваемом случае представляется излишним фиксировать значение h , как это предлагается делать при определении электрического килограмма [9]. Постоянную Планка лучше отнести к классу констант, значения которых находятся путем согласования результатов различных экспериментов. Это связано с тем, что использование ватт-весов и введение электрического килограмма, основанного на электрических квантовых единицах сопротивления и напряжения, требуют проверки взаимной согласованности рекомендованных в настоящее время значений констант Джозефсона и фон Клитцинга посредством приборов, основанных на одноэлектронном туннелировании, т. е. фактически создания квантового стандарта тока. Только тогда станет возможным замыкание так называемого «квантового треугольника» и обоснование в рамках новой СИ согласованной системы практических электрических единиц [10].

Отметим, что необходимо обратить внимание членов Метрологической академии на необходимость более активного участия в работах по переопределению основных единиц СИ.

На XXIII сессии Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) в ноябре 2007 г. была принята Резолюция 12 [3], в которой указано следующее:

«Генеральная конференция рекомендует национальным метрологическим институтам и МБМВ:

- ♦ проводить соответствующие эксперименты, чтобы Международный комитет мог составить мнение о возможности переопределения килограмма, ампера, кельвина и моля, используя фиксированные значения фундаментальных констант;

- ♦ работать вместе с Международным комитетом, его консультативными комитетами и соответствующими рабочими группами над практическими способами реализации любых новых определений, основанных на фиксированных значениях фундаментальных констант, подготовить «Практическое руководство» (*mise en pratique*) для каждого из них и рассмотреть самый удобный способ объяснения новых определений пользователям;

- ♦ инициировать кампании по оповещению и предупреждению сообществ пользователей о возможности переопределений, а также о том, что технические и законодательные последствия таких переопределений и их практическая реализация внимательно рассматриваются и обсуждаются».

Литература

1. Bureau International des Poids et Mesures 2011. 24 CGPM Resolutions. – URL: http://www.bipm.org/utis/common/pdf/24_CGPM_Resolutions.pdf.
2. Mills I.M. e. a. Redefinition of the kilogram: a decision whose time has come // *Metrologia*. – 2005. – Vol. 42. – P. 1–80.
3. Bureau International des Poids et Mesures 2007. CGPM Resolution 12. – URL: <http://www.bipm.org>.
4. Кононогов С. А. Метрология и фундаментальные физические константы / С. А. Кононогов. – М: СТАНДАРТИНФОРМ, 2008.
5. Andreas B. (IAC) Counting the atoms in a ^{28}Si crystal for a new kilogram definition / B. Andreas [et al] // *Metrologi*. – 2011. – Vol. 48. – P. S1–13.

6. Кононов С. А. О возможности замены прототипа килограмма атомным эталоном единицы массы / С. А. Кононов, В. В. Хрущев // Измерительная техника. – 2006. – №10. – С. 3-8; *Kononogov S.A.* Scope for replacing the prototype kilogram by an atomic standard of the mass unit / S. A. Kononogov, V. V. Khrushchov // Meas. Tech. – 2006. – Vol. 49. – P. 953–956.

7. Хрущев В. В. О возможном определении единицы массы и фиксации значений фундаментальных физических констант / В. В. Хрущев // Измерительная техника. – 2010. – №6. – С. 3–9; *Khrushchov V. V.* Possible definition of the unit of mass and fixed values of the fundamental physical constants / V. V. Khrushchov // Meas. Tech. – 2010. – Vol. 53. – P. 583–591.

8. Bureau International des Poids et Mesures 2010. CCM Recommendation G1. – URL: <http://www.bipm.org>.

9. Steiner R. Towards an electronic kilogram: an improved measurement of the Planck constant and electron mass / R. Steiner, E. R. Williams, D. B. Newell // Metrologia. – 2005. – Vol. 42. – P. 431–441.

10. Wulf M. Error accounting in electron counting experiments / M. Wulf, A. B. Zorin // ArXiv. – 2008. 0811.3927. – P. 1–12.

11. Калинин М. И. Переопределение единицы термодинамической температуры и международная система единиц (СИ) / М. И. Калинин, С. А. Кононов // Теплофизика высоких температур. – 2010. – Т. 48. – №1. – С. 26–29; *Kalinin M. I.* Redefinition of the Unit of Thermodynamic Temperature in the SI System / M. I. Kalinin, S. A. Kononogov // High Temperat. – 2010. – Vol. 48. – P. 23–28.

12. Leonard B. P. Why the dalton should be redefined exactly in terms of the kilogram / B. P. Leonard // Metrologia. – 2012. – Vol. 49. – P. 487–491.

© С. А. Кононов