

## **Существует ли объективная необходимость скорейшего переопределения килограмма и моля?**

**Т. П. ХИЛЛ\*, В. В. ХРУЩЕВ\*\***

\* Школа математики, Технологический институт штата Джорджия, Атланта, США,  
e-mail: hill@math.gatech.edu

\*\* Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва,  
Россия, e-mail: khkon@vniims.ru

*Рассмотрены причины отсрочки принятия новых определений килограмма и моля СИ на основе Резолюции 1, принятой на 24-й Генеральной Конференции по мерам и весам.*

**Ключевые слова:** переопределение основных единиц СИ, постоянные Авогадро и Планка, моль, килограмм, реализация определений единицы массы.

*The reasons for postponing the confirmation of new definitions for the kilogram and mole of SI based on the Resolution 1 taken by the 24 CGPM are considered.*

**Key words:** redefinition of basic SI units, Avogadro and Planck constants, mole, kilogram, realization of the mass definitions.

В настоящее время существует общее мнение, что система измерений (СИ) нуждается в модернизации [1], в первую очередь, в отношении определений килограмма и моля. При этом имеются разногласия по поводу, как именно и в какие сроки должна проходить модернизация СИ. Предлагалось принять новые определения четырех основных единиц — килограмма, моля, ампера и кельвина — на 24-й Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ). Однако из-за расхождений результатов по определению значений постоянных Планка и Авогадро двумя разными методами — методом ватт-весов [2] и кристаллических кремниевых шаров [3], принятие новых определений было отложено, по крайней мере, до 2014 г., когда должна состояться 25-я ГКМВ.

Международное Бюро мер и весов (МБМВ) и Консультативный комитет по количеству вещества: метрология в химии, в частности, подтвердили свою приверженность поощрять изучение и обсуждение возможных вариантов пересмотра СИ, как указано в Резолюции 1 [1]. Покажем, что некоторые важные вопросы остаются нерешенными и даже без внимания, и поддержим мнение, что лучше проявить сдержанность и преемственность при принятии новых определений единиц массы и количества вещества СИ. В этой связи рассмотрим три веские причины отсрочки принятия новых определений килограмма и моля: первая — за время, прошедшее после опубликования новых определений, были достигнуты значительные успехи в области физики и техники эксперимента, обработке экспериментальных данных, которые могут быть использованы для переопределения единиц СИ; вторая — научная критика новой СИ, высказанная рядом авторов и экспертов международных метрологических организаций, осталась без ответа архитекторов новой СИ и МКМВ; третья — исправление недостатков новой СИ, если она будет принята в 2014 г., потребует больших затрат времени и средств, поэтому лучше внести необходимые исправления до принятия новой СИ.

**Новые достижения в физике и технике эксперимента, обработке экспериментальных данных.** После того, как предлагаемые переопределения базовых единиц СИ были введены в 2005 и 2006 гг. [4, 5], появились несколько ключевых достижений в области физики и обработки экспериментальных данных, что непосредственно влияет на основные принципы предлагаемой новой СИ.

Во-первых, были получены дополнительные доказательства, что постоянная тонкой структуры, а следовательно, и постоянная Планка, могут меняться во времени и в пространстве [6]. Авторы этого исследования были удостоены научной премии Eureka Science Award в 2012 г. Известно, что такие изменения констант могут вызвать проблемы для фундаментальной метрологии [7], и существующее предложение определять килограмм с помощью фиксированного значения постоянной Планка следует дополнительно изучить в свете этого нового обстоятельства.

Во-вторых, теоретические достижения в области статистики привели к новым математическим методам объединения данных различных экспериментов [8]. В частности, CODATA использует линейный метод и предположение о нормальных распределениях данных при согласовании значений фундаментальных физических констант. В [8] был предложен более общий уникальный метод «слияния», который позволяет легко проводить вычисления и сводит к минимуму потери информации Шеннона при объединении данных принципиально различных экспериментов. Предложенная новая статистическая методика может помочь минимизировать существующие расхождения в результатах экспериментов по определению постоянных Планка и Авогадро с помощью ватт-весов и кремниевых шаров и, таким образом, повлиять на решения, касающиеся выбора вариантов переопределения четырех основных единиц СИ.

В-третьих, что, вероятно, имеет самое непосредственное отношение к существующей и новой или модифицированной

СИ, это последние открытия в физике и технике эксперимента. Прежде всего, повышение точности результатов Международного проекта «Авогадро» по определению постоянной Авогадро методом кремниевых шаров [3], что делает его самым точным методом по определению постоянных Авогадро и Планка. Таким образом, выбор определения килограмма на основе фиксации постоянной Авогадро и массы атома углерода-12 является наиболее естественным. Причем реализовать это определение можно не только с помощью шаров из кристаллического кремния, но и, например, призм, составленных из листов графена [9].

Еще одним фактом, который ставит под сомнение выбор определения килограмма на основе постоянной Планка, является эксперимент, в котором исследователи из Университета Калифорнии и Национальной лаборатории Лоуренса Беркли применили импульс-спектроскопию на атомах отдачи для стабилизации генератора, тем самым обеспечив прямую связь между временем и массой. В отличие от используемых в методе ватт-весов вспомогательных измерений и дополнительных теоретических предположений метод отдачи основан на простых физических принципах и, как сообщается, является «в 10 раз более точным, чем методы действующей СИ» [10]. Недавно исследователи из NIST построили оптические часы на основе спектроскопии иона  $Al^{+}$  с квантовой логикой, которые могут быть более чем в 100 раз точнее цезиевых часов [11]. Каждое из этих открытий требует глубокого анализа со стороны МБМВ до принятия окончательного решения в отношении переопределения килограмма, а также, возможно, нового переопределения секунды [12].

**Вопросы без ответа относительно недостатков новой СИ.** Утверждения о серьезных недостатках предлагаемой новой СИ появились в последнее время, например [13—19]. Авторы [16] при освещении запланированного перехода к новым определениям единиц СИ заключили, что «все необходимые условия для такого перехода еще не удовлетворены». Среди наиболее важных критических замечаний следующие: предлагаемое переопределение килограмма требует введения нового квантового стандарта тока [13]; физически нереальные порядки  $10^{41}$  некоторых постоянных, входящих в предлагаемое новое определение для килограмма [14], и несоответствия и (или) циклические аргументы в предлагаемых новых определениях [15, 17, 20] (например, в определении секунды используется температура в кельвинах для атомов цезия, а определение кельвина зависит от значения постоянной Больцмана, выраженной в единицах с участием секунды [1], см. также [21]).

**Об использовании нового определения килограмма в образовательном процессе.** Президент Консультативного комитета по единицам и другие архитекторы новой СИ заявили, что «поскольку важно, чтобы основы нашей системы измерений преподавались в школах и университетах, предпочтительно, насколько это позволяет современная наука, чтобы определения основных единиц были понятными для студентов по всем дисциплинам» [5, стр. 228]. Однако за семь лет, прошедших после предложения новой СИ, до сих пор не принято определение предлагаемого на основе постоянной Планка килограмма, которое подходило бы для публикации в учебнике.

Существуют следующие варианты нового определения килограмма на основе постоянной Планка [5]:

*килограмм — это масса тела, которая эквивалентна энергии, равной энергии определенного числа фотонов, чья частота в сумме дают  $(299792458^2/66260693) \cdot 10^{41}$  Гц;*

*килограмм — это масса тела, чья частота де Бройля—Комптона точно равна  $(299792458^2/6,6260693 \cdot 10^{-34})$  Гц;*

*килограмм — это такая единица массы тела, при которой постоянная Планка точно равна  $6,6260693 \cdot 10^{-34}$  Дж · с.*

Приведенные определения трудно понять не только «студентам по всем дисциплинам», детальное объяснение этих определений является также сложной задачей даже для студентов университетов по специальности физика, тем более, если они еще не владеют квантовой механикой.

**Скрытая новая фундаментальная постоянная.** Вопросы, связанные с переопределением моля, также запутаны, как и те, что связаны с переопределением килограмма. «Новая постоянная молярной массы»  $M_u$  [1] в предлагаемой новой СИ связана с величиной  $1 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$  таким образом, что разница между ними «несет ту же информацию, которую несет коэффициент  $(1 + \kappa)$ » [22, стр. L19], где  $\kappa$  была введена в [5]. На самом деле,  $\kappa$  можно было бы назвать новой константой, так что новая СИ зависит от введения новой или дополнительной постоянной  $M_u = (1 + \kappa) \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$ .

В [20] было также отмечено, что в новой СИ остаются необъясненными «запутанные привнесенные неточные поправочные факторы, такие как  $(1 + \kappa)$  или предлагаемая «постоянная модифицированной молярной массы». Вопрос об изменении статуса постоянной молярной массы обсуждался в [13]. Разработчиками новой СИ предлагается просто скрыть постоянную  $\kappa$  внутри модифицированной постоянной молярной массы, установив  $M_u = (1 + \kappa) \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$  [4, 5, 20]. Таким образом, новая СИ основывается на введении специальной новой постоянной  $M_u$ , которая однако время от времени должна меняться с учетом изменения входящих в нее констант. Более того, изменение постоянной молярной массы

$$M'_u = M_u (1 + \kappa), \quad (1)$$

где  $M_u = 1 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$ , приводит к тому, что молярная масса углерода-12 теперь становится зависимой от значений других фундаментальных физических констант, таких как постоянные тонкой структуры  $\alpha$  и Планка  $h$ . Такая зависимость для  $M'_u$  приведет к необходимости многократного изменения огромного числа значений молярных масс, занесенных в многочисленные справочники, методические руководства, инструкции, базы данных различного типа. С физической точки зрения, это приводит к неверному выводу о непостоянстве массы любого атома или молекулы и ее зависимости, например, от знания значения  $\alpha$ . Действительно, например, для массы атома углерода должно выполняться соотношение

$$m(^{12}\text{C})N_A = 12M_u(1 + \kappa), \quad (2)$$

так как в рамках новой СИ при определении килограмма на основе фиксированного значения постоянной Планка и независимого определения моля на основе фиксированного значения постоянной Авогадро необходимо отказаться от