

## О переопределении килограмма и ампера в терминах фундаментальных физических констант

С.Г. Каршенбойм

*Летом 2005 г. состоялось заседание Консультативного комитета по единицам Международного комитета мер и весов, на котором обсуждался, в частности, вопрос о возможном переопределении килограмма в терминах фундаментальных физических констант. Этот вопрос затрагивает широкий круг специалистов — от школьных учителей до физиков, работающих в самых различных областях. Дается краткий обзор ситуации и отчет об обсуждении этого вопроса Консультативным комитетом по единицам и другими заинтересованными организациями. Рассматриваются также и другие обсуждавшиеся вопросы, связанные с системой единиц СИ.*

PACS numbers: 06.20. – f, 06.20.F –, 06.30. – k

### Содержание

1. Введение (975).
  2. Прецизионные измерения масс и электрических величин (976).
  3. Константы и единицы (976).
  4. Два подхода к переопределению килограмма (978).
  5. Отношение различных комиссий и комитетов к переопределению килограмма (979).
  6. О переопределении моля и кельвина (979).
  7. Переопределение единиц СИ и точности значений фундаментальных констант (980).
  8. Об обязательности использования системы СИ в физике (981).
  9. Система СИ и физики (981).
  10. Будущее системы СИ (981).
  11. Приложение. Полные и сокращенные названия международных организаций, упоминаемых в статье (982).
- Список литературы (982).

### 1. Введение

Метрическая система мер появилась вскоре после Великой французской революции и постепенно стала доминирующей международной системой единиц в индустрии, торговле, преподавании и науке. За это время, следуя прогрессу в физике, она претерпела существенные изменения. Тем не менее даже сейчас, в XXI веке, одна из основных единиц международной системы СИ, килограмм, по-прежнему определена посредством артефакта — искусственно созданного эталона. При этом,

как известно, килограмм — не изолированная единица: с его использованием определены еще три основные единицы СИ: ампер, моль и кандела. Так что речь идет о *большинстве* основных единиц системы СИ.

Концептуальные недостатки такого эталона килограмма очевидны: он доступен только в одном месте (в Международном бюро мер и весов в Севре под Парижем); опасность его порчи или утраты приводит к тому, что доступ к нему крайне ограничен (он использовался всего три раза за приблизительно сто лет); его необходимо хранить и использовать в воздухе, что само по себе опасно; он может стареть и менять свойства. Однако у этого эталона есть одно достоинство: как в прошлом не было, так и в настоящее время нет никакой возможности создать естественную эталонную массу с лучшими техническими показателями.

В связи с недостатками современного эталона килограмма время от времени возникают предложения по его переопределению в более фундаментальных и естественных терминах. Подобное возможное переопределение килограмма, ампера и некоторых других единиц системы СИ и явилось центральным вопросом очередного ежегодного заседания международной Рабочей группы CODATA по фундаментальным физическим константам (CODATA task group on fundamental constants) и семнадцатого заседания Консультативного комитета по единицам (ККЕ) Международного комитета мер и весов (МКМВ)<sup>1</sup>.

Рассмотрение было инициировано недавним предложением [1] такого рода, однако не ограничилось только этим. Консультативный комитет по единицам должен был подготовить рекомендации для заседания МКМВ в октябре 2005 г., решения которого, в свою очередь, подлежат утверждению Генеральной конференцией мер и весов (ГКМВ) в 2007 г. Следующие заседания МКМВ и ГКМВ должны состояться в 2009 г. и 2011 г. соответственно. Заседания ККЕ и Рабочей группы CODATA прошли в

С.Г. Каршенбойм. ГНЦ "Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева",  
190005 Санкт-Петербург, Московский просп. 19,  
Российская Федерация  
Тел. (812) 323-96-75. Факс (812) 713-01-14  
Max-Planck-Institut für Quantenoptik,  
85748 Garching, Hans-Kopfermann Str. 1, Germany  
E-mail: sgk@vniim.ru; sek@mpq.mpg.de

Статья поступила 27 декабря 2005 г.

<sup>1</sup> Полные и сокращенные названия международных организаций, упоминаемых в данной статье, приведены в приложении.

Международном бюро мер и весов в Севре под Парижем соответственно 29 июня – 1 июля и 28 июня 2005 г.

Данная заметка посвящена обсуждению ситуации, сложившейся в области прецизионных измерений, связанных с определением килограмма, и краткому отчету о результатах заседаний, на которых рассматривался этот вопрос. Консультационный комитет по единицам рассматривал также новую редакцию брошюры СИ, и мы упомянем о некоторых изменениях в ней.

## 2. Прецизионные измерения масс и электрических величин

Существует некоторая аналогия между сегодняшней ситуацией и ситуацией, которая имела место более двадцати лет назад, когда была принята современная версия СИ [2]. В то время эксперименты по определению скорости света, в которых сравнивались криптовая длина волны (основа определения "старого" метра) и частота сверхтонкого перехода в цезии, оказались настолько успешными, что основным источником их погрешности стала неточность в определении метра. Решением этой проблемы стало новое определение метра путем фиксирования величины скорости света в вакууме в 1983 г. [3], так что теперь метр равен  $1/299\,792\,458$  части пути, проходимого светом за одну секунду. Здесь и далее под фиксированием мы подразумеваем принятие некоторого точного численного значения величины по определению.

Ситуация, сложившаяся с основными единицами СИ, качественно иная, и указанная аналогия на самом деле неуместна. Мы кратко описали современную ситуацию в работе [4], которая является расширенной версией рабочего документа CCU/05-27.

Идея метрической конвенции и ее реализации в виде системы СИ, создание различных организаций, таких как Международное бюро мер и весов (МБМВ) и МКМВ, — все это имело целью обеспечить согласованное измерение всех величин в одной самосогласованной системе единиц — СИ. Однако, несмотря на то, что последняя версия СИ была принята в 1983 г., уже в 1988 г. было вынесено решение МКМВ, утвержденное ГКМВ в 1990 г., о применении в прецизионных электрических измерениях несколько другой версии СИ [5] (см. также [6]).

Эта другая версия СИ основана на двух так называемых практических единицах: ом-1990 и вольт-1990, в терминах которых постоянная Планка  $h$  и элементарный заряд  $e$  имеют точные, известные по определению значения, удовлетворяющие условиям

$$\begin{aligned} R_K &= \frac{h}{e^2} = 25\,812,807 \text{ Ом}_{90}, \\ K_J &= \frac{2e}{h} = 483\,597,9 \text{ ГГц}_{90}^{-1}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $R_K$ ,  $K_J$  — постоянные фон Клитцинга и Джозефсона.

В этой версии СИ константа  $\mu_0$  становится измеримой, а "электрический" аналог килограмма

$$1 \text{ В}_{90}^2 \text{ Ом}_{90}^{-1} \text{ с}^3 \text{ м}^{-2} = [1 + 1,0(1,7) \times 10^{-7}] \text{ кг} \quad (2)$$

несколько отличается от килограмма СИ.

Таким образом, выясняется, что в течение достаточно долгого времени у нас не было единой системы единиц,

которую можно применять во всех измерениях. В макроскопических измерениях масс применяется стандартная система СИ, тогда как в прецизионных электрических измерениях используются практические единицы. При микроскопических измерениях масс фактически также имеют дело с практическими единицами. Строго говоря, результат измерения массы частицы или атома, выраженный в электронвольтах, будет более точен, если мы пользуемся вольт-1990, а не стандартным вольт-ом. Это связано с тем, что собственно измерительная погрешность может быть (и часто бывает) ниже, чем погрешность определения единиц. Аналогичная ситуация возникает и при переводе результатов, выраженных в атомных единицах массы. Перевод атомных единиц массы в килограммы менее точен, чем, например, перевод в электронвольты при условии использования вольта-1990.

Симптоматично, что такая практика введена именно теми организациями, которые призваны обеспечивать единство измерений. Это является результатом известной беспомощности в решении вопроса, связанного с экспериментальной ситуацией. Почему нельзя воспользоваться одной системой единиц? Проблема состоит в том, что эксперименты, подобные экспериментам по определению скорости света, которые связывают разные области измерений, обладают сравнительно невысокой точностью. В отличие от случая, когда фиксировали скорость света, в данном случае области измерений устроены более сложно и для их связи служат несколько типов экспериментов. Что еще важнее, эти области измерений не независимы.

Существует только два независимых параметра, в качестве которых можно взять, например, массу прототипа килограмма  $m(K)$  и величину константы  $\mu_0$ . Задавая их, мы тем самым задаем единицы в обеих областях измерений (масс и электрических величин). Альтернативное определение фиксирует значения двух фундаментальных констант, например постоянной Планка  $h$  и элементарного заряда  $e$ . При фиксировании одной пары величин другая должна находиться экспериментально. В стандартной версии СИ речь идет об экспериментах, определяющих постоянную тонкой структуры

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \quad (3)$$

и постоянную Планка. Если мы фиксируем  $h$  и  $e$ , то для определения массы прототипа килограмма и  $\mu_0$  необходимо провести *те же самые* эксперименты, которые сейчас используются для определения  $\alpha$  и  $h$ .

## 3. Константы и единицы

Что означают упомянутые выше величины с практической точки зрения? Масса прототипа килограмма определяет на практике единицу измерения всех макроскопических масс, и поскольку основной способ сравнения таких масс — взвешивание, то для того, чтобы определить все массы в достаточно широком диапазоне, мы должны каким-то образом определить одну из них (например массу прототипа) и иметь хорошие весы.

Величина  $\mu_0$  не применяется на практике для измерения токов. Она, а вернее, величина  $\epsilon_0$ , используется при создании так называемого расчетного конденсатора — макроскопического эталона фарада.

На основе фарада можно перейти и к ому, однако более успешным является подход, основанный на квантовом эффекте Холла, в рамках которого все сопротивления сравниваются с величиной  $R_K$ , которая в практических единицах известна без погрешности. На основе ома-1990 можно определить соответствующую единицу емкости. Таким образом, ом-1990 и фарад СИ являются естественными конкурентами, что также видно из соотношения

$$R_K = \frac{c\mu_0}{2\alpha}, \quad (4)$$

которое позволяет зафиксировать значение или  $R_K$ , или  $\mu_0$ , но не обеих констант одновременно. Эти эталоны представляют собой реализацию двух конкурирующих подходов. Расчетный конденсатор является классическим макроскопическим устройством, и, как и у всякого классического объекта, его свойства изменяются со временем. "Расчетной" является некая идеализированная ситуация, следовательно, и необходимо тщательно контролировать все возможные отклонения от нее. Напротив, эталон, основанный на макроскопическом квантовом эффекте (квантовом эффекте Холла), обладающая размерами, характерными для классической физики, имеет тем не менее характеристики, которые квантуются и поэтому не изменяются со временем. Сравнение этих двух типов эталонов позволяет сделать однозначный вывод о преимуществе квантового эталона.

На практике напряжение измеряется с помощью эффекта Джозефсона в единицах вольт-1990. Для измерения токов используют единицу, определенную посредством практических ома и вольта, однако она не входит непосредственно в рекомендации МКМВ, и поэтому говорить о ней как об ампере-1990 необходимо с некоторой осторожностью.

Согласованная система единиц предполагает, что одна пара величин принимается известной точно по определению, тогда как другая находится на основе экспериментов. Проблема состоит, однако, в том, что прецизионное измерение другой пары величин с достаточно высокой точностью невозможно.

Прогресс последних лет не повлиял на ситуацию в принципе, однако значительно изменил ее в деталях. Возросли точности электрических измерений в практических единицах, улучшилась точность экспериментов, объединяющих разные области измерений.

Современные точности таковы:

- измерения масс — масса эталона<sup>2</sup>, вероятно, не меняется на уровне одной единицы (или нескольких единиц) восьмого знака; для практических приложений достаточно нескольких единиц седьмого знака; сравнение масс порядка килограмма осуществляется со значительно лучшей точностью;
- измерения электрических единиц — в практических единицах погрешности находятся в девятом знаке; такие прецизионные измерения важны для использования

<sup>2</sup> Масса эталона равна по определению одному килограмму. Это означает только то, что ее численное значение равно единице и, следовательно, неизменно. Подобное определение не фиксирует массу прототипа, т.е. в данном случае величину того, что мы называем килограммом. Изменение массы объекта наблюдаемо, поскольку в уравнения движения входит производная импульса, произведения массы и скорости. Относительное изменение массы наблюдаемо независимо от определения единиц.

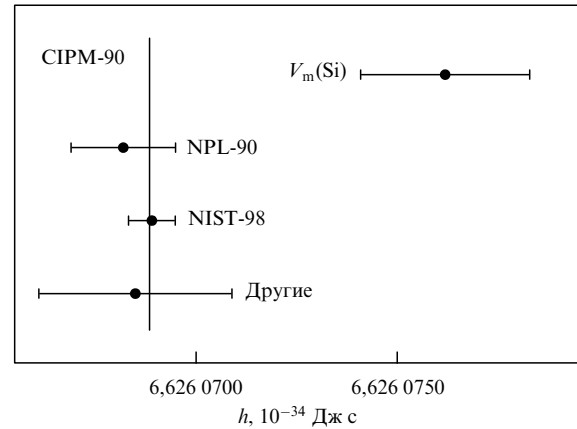


Рис. Определение постоянной Планка  $h$  различными методами (ср. [4]). Представлены два результата на основе ватт-весов (NIST-98 и NPL-90), а также результат, связанный с постоянной Авогадро ( $V_m(\text{Si})$ ), и среднее значение остальных измерений. Все значения взяты из [7], кроме последнего, которое на основе [7] получено П. Мором (P. Mohr). Вертикальная черта отвечает фиксированному значению постоянной Планка в практических единицах [5].

электрических явлений в различных датчиках (например для контроля температуры и т.д.);

- точность измерения постоянной тонкой структуры  $\alpha$ , отвечающая точности определения  $R_K$  при известной фиксированной величине  $\mu_0$  (или в другой версии СИ точности определения  $\mu_0$  при фиксированной величине  $R_K$ ), находится на уровне нескольких единиц девятого знака;
- точность измерения  $h$  является наиболее уязвимой частью схемы при любом сценарии: с точностью до возможных так называемых двоек (множителей 2 или  $1/2$ )<sup>3</sup> именно эта точность определяет точность воспроизведения ампера и вольта в современной версии СИ и будет определять точность реализации килограмма при фиксированных значениях  $h$  и  $e$ ; погрешности несколько ниже единицы седьмого знака, однако имеется расхождение на уровне 1 ppm (см. рис.).

Ясно, что в сложившейся ситуации невозможно проводить все измерения в единицах СИ без потери точности. Однако это не означает, что точные измерения не осуществимы во всех областях. Как упоминалось выше, выход заключается в том, что часть измерений проводится в практических единицах. Если переопределение килограмма будет принято, то масса прототипа и станет такой единицей на некоторое время.

Следует отметить, что в основном преимущество, которое предоставляется повсеместным использованием единой системы единиц, — это скорее удобство, чем что-либо иное. Если измерение проведено в произвольных, но строго определенных единицах (что на самом деле практикуется постоянно), то, с научной точки зрения, оно ничем не хуже, чем измерение в единицах СИ. Однако удобство использования единой системы и некоторых дополнительных универсальных единиц имеет колоссальное значение. Можно провести аналогию с правилами уличного движения. Такая вещь, как светофор, сама по себе почти бессмысленна. Его можно заменить любым другим аналогичным объек-

<sup>3</sup> Возникают для некоторых величин, так как комбинация  $e^2/h$  известна точнее, чем ее составляющие  $e$  и  $h$ .

том. Каждый отдельный элемент правил также не имеет особого смысла. Однако система правил в целом настолько упрощает движение, что ее достоинства вполне очевидны.

Конечно, ничего плохого в практических единицах нет. Однако гораздо проще говорить, например, о вольте, чем о "практической реализации вольта на основе эффекта Джозефсона с фиксированной величиной  $K_J$ ". Отчасти метрическая система единиц (и различные поддерживающие ее соглашения) потому и была введена, чтобы каждый раз не уточнять, что мы понимаем под теми или иными единицами.

#### 4. Два подхода к переопределению килограмма

Кроме намерения устранить проблему одновременного применения двух версий СИ, имеет место и явное стремление заменить искусственный эталон килограмма естественным. В принципе, если подобную замену провести без потери точности, то сразу возникнет ряд преимуществ: не нужно будет заботиться о стабильности эталона, не придется ездить в Париж и т.д. Предложение [1] сформулировано так, что именно реализация этих преимуществ воспринимается как главная мотивация статьи. Если иметь в виду только эталон килограмма, то существует ряд возможностей решения этой проблемы.

Килограмм, вообще говоря, можно переопределить фиксированием постоянной Планка или постоянной Авогадро  $N_A$ . Это может быть сделано или одновременно с переопределением ампера, или независимо от него. Авторы предложения [1] постарались занять нейтральную позицию по ряду вопросов и просто изложили достоинства и недостатки различных версий естественного определения килограмма, предоставляя читателям возможность самим принять решение. Естественным результатом такого подхода явилось то, что одновре-

менное переопределение ампера воспринимается как факультативная возможность, а не как необходимость. При переопределении собственно килограмма аналогия с переопределением метра в 1983 г. является достаточно естественной и не свидетельствует в пользу переопределения [1]. Это сделало предложение в целом крайне уязвимым для критики.

При одновременном переопределении килограмма и ампера возникает ряд преимуществ, которые могут компенсировать потерю точности при измерении масс в единицах СИ. При переопределении только килограмма эти преимущества значительно ограничиваются, и потеря точности в измерениях массы становится бесспорным недостатком. Одновременное переопределение килограмма и ампера с целью перехода на версию СИ, в которой фиксированы  $R_K$  и  $K_J$ , можно провести, только фиксируя  $h$  и  $e$ . Для переопределения собственно килограмма можно фиксировать и  $N_A$ ; ввиду того, что точность, с которой известна молярная постоянная Планка  $hN_A$  (см. табл.), выше, чем точность, с которой можно подтвердить стабильность килограмма, фиксация  $h$  или  $N_A$  для определения единицы массы приведет к практически тождественным результатам. Различия будут касаться электрических измерений.

Принципиально разным оказывается и отношение к расхождению при определении постоянной Планка различными методами (см. рис.). В случае переопределения только килограмма ситуация выглядит так, как будто вместо надежного, проверенного годами эталона предлагают метод, который приводит к противоречивым результатам. Возникает иллюзия, что если не принимать решение о переопределении килограмма, то это расхождение будет обычной научной проблемой, не имеющей никакого отношения к системе единиц СИ. Однако ампер СИ определяется именно с помощью тех же самых экспериментов (экспериментов по определению  $h$ ), и, таким образом, они играют ключевую роль в реализации единиц СИ в настоящее время. От нас

**Таблица.** Численные значения констант, упоминаемых в статье, представленные в различных единицах (ср. [4]) согласно определениям СИ [2], значениям КОДАТА [7] и рекомендациям МКМВ [5];  $u_r$  — относительное стандартное отклонение

Константа	Значение	Единица	$u_r$	Источник
$m(K)$	1 $1 - 1,0(1,7) \times 10^{-7}$	кг $V_{90}^2 \text{ м}^{-2} \text{ Ом}_{90}^{-1} \text{ с}^3$	точно $1,7 \times 10^{-7}$	СИ КОДАТА*
$c$	299 792 458	м с <sup>-1</sup>	точно	СИ
$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7}$ $4\pi \times 10^{-7} \times [1 - 17,4(3,3) \times 10^{-9}]$	Н А <sup>-2</sup> с Ом <sub>90</sub> м <sup>-1</sup>	точно $3,3 \times 10^{-9}$	СИ КОДАТА*
$e$	$1,602 176 53(14) \times 10^{-19}$ $1,602 176 49(66) \times 10^{-19}$ $1,602 176 492 \dots \times 10^{-19}$	Кл Кл $V_{90} \text{ с}^{-1} \text{ Ом}_{90}^{-1}$	$1,7 \times 10^{-7}$ $4,1 \times 10^{-7}$ точно	КОДАТА МКМВ* МКМВ
$h$	$6,626 069 3(11) \times 10^{-34}$ $6,626 068 9(38) \times 10^{-34}$ $6,626 068 854 \times 10^{-34}$	Дж с Дж с $V_{90}^2 \text{ с}^2 \text{ Ом}_{90}^{-1}$	$1,7 \times 10^{-7}$ $5,7 \times 10^{-7}$ точно	КОДАТА МКМВ* МКМВ
$R_K$	25 812,807 449(86) 25 812,807 0(25) 25 812,807	Ом Ом Ом <sub>90</sub>	$3,3 \times 10^{-9}$ $1 \times 10^{-7}$ точно	КОДАТА МКМВ МКМВ
$K_J$	$483 597,879(41) \times 10^9$ $483 597,9(2) \times 10^9$ $483 597,9 \times 10^9$	Гц В <sup>-1</sup> Гц В <sup>-1</sup> Гц $V_{90}^{-1}$	$8,5 \times 10^{-8}$ $4 \times 10^{-7}$ точно	КОДАТА МКМВ МКМВ
$N_A$	$6,022 141 5(10) \times 10^{23}$	моль <sup>-1</sup>	$1,7 \times 10^{-7}$	КОДАТА
$hN_A$	$3,990 312 716(27) \times 10^{-10}$	Дж с моль <sup>-1</sup>	$6,7 \times 10^{-9}$	КОДАТА

\* Величина не приведена в цитируемой работе, а получена из нее.

зависит только, к какой единице они будут иметь отношение. Важно также отметить, что реальные последствия этого противоречия были и будут крайне ограничены. Определение постоянной Планка необходимо для калибровки практической единицы в единицах СИ (сейчас — ампера и вольта, после переопределения килограмма и ампера — килограмма). Однако в подавляющем большинстве случаев достаточно знать результаты в практических единицах, и перевод в единицы СИ не нужен.

## 5. Отношение различных комиссий и комитетов к переопределению килограмма

До заседания ККЕ предложение [1] рассматривалось соответствующими консультативными комитетами (по электричеству и магнетизму — ССЕМ; по массе и связанным величинам — ССМ; по количеству вещества и метрологии в химии — ССQM) Международного комитета мер и весов. Указанные комитеты рассматривали предложение в основном с позиции переопределения только килограмма и сочли его неприемлемым на современном этапе. Тем не менее они посчитали возможным при необходимости вернуться к этому вопросу через четыре года перед следующим заседанием МКМВ.

Примерно в то же время Комиссия SUNAMCO (Symbols, units, nomenclature, atomic masses and fundamental constants) подготовила рекомендацию для МКМВ. Являясь комиссией Международного союза чистой и прикладной физики, SUNAMCO должна, казалось бы, выражать по данному вопросу мнение физиков, а не метрологов. На самом деле эта комиссия представляет собой группу, включающую и физиков, и метрологов. Ее рекомендация существенно отличается от рекомендаций трех упомянутых комитетов. Хотя окончательное решение — отложить решение вопроса на четыре года — совпадает, но постановка вопроса качественно иная: речь идет об одновременном переопределении килограмма и ампера. Ключевым критерием признается не точность новой реализации килограмма сама по себе, а необходимость общего улучшения ситуации, при этом допускается некоторое понижение точности измерения масс в единицах СИ при значительном улучшении точности применения единиц СИ к электрическим величинам.

Такая рекомендация продиктована несколькими обстоятельствами. Общая позиция определяется составом группы: учитывая, что в состав группы входит много метрологов, невозможно проигнорировать практические вопросы и обсуждать только общефизические аспекты проблемы. Важно и то, что вопрос о необходимых точностях и общем объеме прецизионных измерений фактически не исследовался, а поэтому делать какие-либо выводы о том, принесет ли данное переопределение пользу, если принять его сейчас, было невозможно. Во всяком случае, являясь членом этой комиссии, я не отметил никаких попыток обсуждения этого вопроса.

Позиция Рабочей группы CODATA по фундаментальным константам достаточно близка к позиции SUNAMCO. Учитывая, что различные комитеты МКМВ уже практически заблокировали возможность переопределения килограмма и ампера решением МКМВ в 2005 г., группа отметила, что в целом переопределение желательно и его нужно сделать, как только появится возможность. При этом подчеркивалось, что речь должна идти об одновременном переопределении

килограмма и ампера и о том, что их необходимо переопределять фиксированием численных значений  $h$  и  $e$ . Был также поднят вопрос о других единицах, который мы рассмотрим ниже.

Решение заседания ККЕ, которое состоялось после принятия всех перечисленных выше рекомендаций, заключалось в том, что необходимо создать технические предпосылки для того, чтобы решение о переопределении могло быть принято МКМВ в 2009 г. Речь идет об обращении к МКМВ с просьбой дать ККЕ поручение разработать соответствующее предложение. Учитывая, что базовые документы о системе единиц СИ являются предметом международного соглашения, столь бюрократический подход не должен удивлять.

## 6. О переопределении моля и кельвина

На заседаниях Рабочей группы CODATA и ККЕ обсуждалась также возможность переопределения моля и кельвина. Сразу отметим, что здесь практическая ситуация в значительной степени аналогична ситуации, сложившейся в 1983 г., когда был переопределен метр. Переопределение касается каждой из единиц по отдельности и не затрагивает одновременно разные области измерений. Ввиду известной изолированности соответствующих областей измерений, предложения по этому переопределению обсуждались в меньшей степени, чем переопределение килограмма.

Мы не будем здесь рассматривать техническую сторону, оставив это специалистам из соответствующих профильных комитетов, мнение которых будет решающим при выборе сроков переопределения, однако отметим концептуальное отличие этих переопределений от переопределения метра. Это отличие касается не технической стороны, поскольку с технической точки зрения аналогия полная, а возможных последствий. Как известно, кельвин и моль не являются, вообще говоря, необходимыми единицами (ср., например, [6]). Когда они возникли и начали затем традиционно использоваться, связь температуры со средней энергией, приходящейся на одну степень свободы, и количества вещества с числом частиц (атомов, молекул и т.д.) была неясна. Однако последующее длительное использование этих единиц связано не столько с традицией, сколько с тем, что работа напрямую с термодинамическими параметрами оказалась в смысле точности более успешной, чем с микроскопическим описанием тех же объектов. Например, количество вещества — это, в сущности, некоторое неизвестное число частиц, масса которых известна. Напротив, говоря о числе частиц, имели в виду известное число частиц с некоторой не известной точно массой. Можно было характеризовать количество вещества взвешиванием гораздо точнее, чем подсчетом числа частиц. С измерительной точки зрения число частиц и количество вещества являются в настоящее время дополнительными величинами: нельзя знать и то, и другое с абсолютной точностью.

Фиксирование значения постоянной Авогадро изменит физический смысл количества вещества и моля. Предполагается [8] определить моль через фиксированное значение  $N_A$  при том, что килограмм будет определен независимо (например посредством фиксированного значения  $h$ ). Это означает, что количество вещества будет отождествлено с числом частиц. Слово "моль" ста-

нет обозначением некоторого известного безразмерного числа (равного переопределенному числу Авогадро<sup>4</sup>), т.е. будет являться аналогом, например, слова "миллион". Описания в терминах количества вещества и числа частиц будут полностью аналогичны. Фактически, такое переопределение станет первым шагом по деавуированию моля как основной единицы СИ и устранению из физических учебников самого понятия "количество вещества".

Аналогичная ситуация сложилась и с температурой. Долгое время постоянная Больцмана была известна не слишком точно, и поэтому средняя энергия в расчете на одну степень свободы и температура определялись с разной степенью точности. Если мы фиксируем постоянную Больцмана  $k$ , то это приведет к переходу от термодинамической температуры, измеряемой в кельвинах, к энергетической температуре, измеряемой в джоулях.

Учитывая вышесказанное, важно подчеркнуть, что фиксация  $k$  и  $N_A$ , решение о которой будет принято на основе рекомендаций соответствующих консультативных комитетов МКМВ, будет иметь далеко идущие методические последствия.

Отметим, что сейчас понятия моля и постоянной Авогадро тесно связаны с атомной единицей массы. Если бы мы фиксировали постоянную Авогадро и определили на ее основе килограмм, то изменилась бы связь между килограммом и атомной единицей массы, — они оказались бы жестко связанными известным переводным множителем, определяемым через ту же постоянную Авогадро. При одновременной фиксации  $h$  и  $N_A$  связь хотя и меняется, но иным образом: соотношение между этими единицами измерения массы *a priori неизвестно*, но оно и не описывается с помощью постоянной Авогадро.

Необходимо также упомянуть, что терминология, связанная с молем и количеством вещества, неприемлема для современной физики. Ключевой является идея о том, что вещество состоит из атомов. Современные взгляды на строение вещества несколько иные. Например, жидкие проводники, очевидно, содержат в себе ионы, а в случае кристаллических тел нужно говорить об электронах и решетке, сформированной атомными остовами. Физик полагает, что дейтрон состоит из протона и нейтрона, потому, что может вывести целый ряд свойств дейтрона исходя из свойств этих двух нуклонов. Химик считает, что молекула воды состоит из атомов водорода и кислорода, имея в виду, что молекула диссоциирует на эти атомы. Это не одно и то же. Изменение определения моля и количества вещества может явиться удобной возможностью привести в порядок терминологию в этой области.

## 7. Переопределение единиц СИ и точности значений фундаментальных констант

Фиксирование значений некоторых фундаментальных констант повышает точность значений констант в целом. Так, фиксирование значения постоянной Планка автоматически улучшает точность определения постоянной Авогадро, поскольку их произведение сейчас известно точнее, чем каждая из этих констант по отдель-

ности. Однако необходимо различать численные значения (в определенных единицах) и собственно константы (см., например, [6]). Улучшить наши знания о природе без дополнительных измерений или расчетов невозможно. Точность численных значений возрастает за счет подмены их содержания. Погрешность массы электрона в килограммах отражает точность, с которой мы умеем сравнивать микроскопические массы и массы макроскопических объектов, таких, как, например, электрон и гиря. Определение килограмма в терминах фиксированных значений  $h$  или  $N_A$  приведет к тому, что килограмм станет микроскопической единицей. В первом случае измерение в килограммах будет эквивалентно измерению в единицах частоты, во втором — в атомных единицах массы. Масса электрона в этих микроскопических единицах и сейчас известна точнее, чем в килограммах. При переопределении масса электрона в килограммах уже не будет иметь отношения к сравнению электрона и гири, а точность этого сравнения станет точностью, с которой известна масса прототипа килограмма.

Для большинства констант меняется физический смысл их численных значений. Некоторые константы, такие как постоянная Авогадро, в известном смысле тривиальны (это просто аналог единицы), а основной смысл заключается как раз в их численных значениях. Это подчеркивается и тем, что наряду с размерной постоянной Авогадро  $N_A$  рассматривают и ее численное значение  $\{N_A\}$  (безразмерное число Авогадро).

Можно проследить, как будет меняться смысл числа Авогадро при разных модификациях системы СИ. Сейчас  $\{N_A\}$  отвечает числу частиц в количестве вещества с массой, известной в макроскопических терминах (в килограммах), например эффективному числу<sup>5</sup> атомов в бруске или гире. Если мы переопределим килограмм в микроскопических терминах, фиксируя  $h$ , то точность числа Авогадро возрастет, однако смысл ее изменится. Речь пойдет не о том, сколько атомов содержится в некоторой гире, а о том, сколько электрон-позитронных пар можно создать с помощью известного числа фотонов с известной частотой (большинство подобных аналогий бессмысленно с экспериментальной точки зрения, так как необходимо также проконтролировать отсутствие у электрон-позитронных пар кинетической энергии и т.д., тогда как говорить о равенстве энергии покоя некоторого числа атомов суммарной энергии фотонов представляется менее наглядным). При переопределении килограмма путем фиксации  $\{N_A\}$  смысл этой постоянной также изменится и станет банальным, поскольку масса в килограммах будет отвечать массе в атомных единицах и, хотя формальное определение постоянной Авогадро сохранит силу, оно превратится в тавтологию. Если мы переопределим моль, фиксируя  $\{N_A\}$ , то также изменим физический смысл этой константы. Число Авогадро станет отвечать известному по определению числу частиц в количестве вещества неизвестной массы. При этом точность определения эффективного числа частиц в количестве вещества с массой, известной в макроскопических терминах, например, в углеродном бруске с массой, равной массе прототипа килограмма, остается той же. Меняется только связь этого вполне реального числа с абстрактным числом Авогадро.

<sup>4</sup> Следует различать безразмерное число Авогадро (в настоящее время — число атомов в 12 граммах углерода-12) и размерную постоянную Авогадро  $N_A$ , которая в некотором смысле равна единице.

<sup>5</sup> Как мы отметили выше, твердые тела не состоят из атомов, и поэтому можно говорить только об эффективном числе атомов.

Если, как мы видим, ничего "на самом деле" не уточняется, то можно ли считать, что переопределение единиц дает какие-то преимущества, связанные с фундаментальными константами? Ответ оказывается утвердительным. Кроме того, что значения констант отражают наши знания о природе, они служат в качестве некоторых специфических справочных данных, важных ввиду удобства или в силу традиции. Например, принято характеризовать массы элементарных частиц, ядер и атомов величинами, измеренными в электронвольтах. В современной версии СИ, многие из этих величин известны существенно лучше в атомных единицах массы. Другой пример — широко применяемая практика приводить значения энергии рентгеновских и гамма-переходов в электронвольтах, а не частоты переходов в герцах (или волнового числа в обратных метрах), которые сейчас известны, как правило, с более высокой точностью. Проблема с точностью возникает из-за того, что принято оперировать не непосредственно измеряемыми величинами, а их производными. Как необходимо поступать с подобными величинами для адекватного представления результатов? Есть три основных способа: можно отойти от традиции и пользоваться только теми единицами, в которых результат выражается наиболее точно; можно следовать традиции, но явно указывать погрешность перевода в электронвольты и отдельно погрешность собственно измерения; можно ввести условные электронвольты, воспользовавшись, например, вольт-1990. Любое из этих решений требует усилий и приводит к определенным неудобствам, однако, оставляя ситуацию такой, как она есть, мы неизбежно теряем в точности. Численные значения констант в данном случае играют роль переводных множителей из одних единиц в другие. Если эти значения улучшатся (даже путем изменения их физического смысла), то полезный эффект будет налицо — результаты в электронвольтах, которыми пользуются повсеместно, приобретут адекватную высокую точность. Таким образом, при переопределении килограмма, ампера и, возможно, других единиц можно говорить о существенном упрощении в пользовании обширным массивом справочных данных и переводных множителей, существенной частью которых являются фундаментальные константы или их численные значения. Как мы уже отмечали, вопрос о системе единиц — это, в значительной степени, вопрос удобства описания результатов измерений.

## 8. Об обязательности использования системы СИ в физике

Наряду с вопросами определений основных величин системы СИ в терминах фундаментальных физических констант, ККЕ рассматривал также новую редакцию брошюры СИ<sup>6</sup>, которая должна заменить [2]. В качестве бесспорно положительного изменения следует отметить упоминания о том, что некоторые единицы, отличные от единиц СИ, широко используются и будут использоваться и что нельзя запрещать ученым применять те единицы, которые они считают удобными для решения своих задач. Первое из утверждений уже содержалось в предыдущей редакции брошюры [2] в несколько более слабой форме, второе появилось сейчас.

<sup>6</sup> См. [http://www1.bipm.org/en/si\\_brochure/](http://www1.bipm.org/en/si_brochure/). (Добавлено автором при корректуре. — *Примеч. ред.*)

## 9. Система СИ и физики

Учитывая то, что речь идет о физических единицах, хорошо было бы уточнить, что такое физика и как мнение физиков представлено в ККЕ и других аналогичных организациях. Внятно выраженного понимания того, что такое физика, в ККЕ, по-видимому, нет. Характер обсуждения и ряд утверждений показывает, что речь идет скорее об образовательной физике, а не об исследовательской. Ясно, что разные области явлений представлены в преподавании и исследованиях в достаточно разной пропорции. Если СИ играет важную роль в школьном и общем курсах физики, то в исследованиях существенно выше роль отдельных внесистемных единиц. Это происходит хотя бы потому, что упомянутые курсы физики предназначены для описания широкого круга явлений, тогда как большинство исследований связано со сравнительно узкими областями, в которых определенные внесистемные единицы чрезвычайно удобны.

Между тем ни в ККЕ, ни в SUNAMCO мнение преподавателей не представлено, хотя в ряде обсуждений вопросы, связанные с образованием, затрагивались. Если в силу случайных особенностей карьеры часть участников обсуждения в ККЕ и имеет некоторый опыт преподавания в университете, то ни в коем случае не в школе. Точка зрения профессиональных преподавателей и авторов популярных учебников в обсуждении не представлена. Мнение физиков-исследователей должно, в принципе, учитываться комиссией союза физиков SUNAMCO. Комиссия формируется в основном из специалистов в области масс-спектропии, фундаментальных констант, эталонов и прецизионных измерений в целом. Ее участники, бесспорно, являются экспертами в области физической метрологии. Однако общие вопросы системы единиц не сводятся к метрологии, они имеют ряд важных методических и концептуальных аспектов. Построение системы единиц — это проблема физики в целом и затрагивает интересы всех физиков. Однако профессиональные физики-исследователи с достаточно широким кругозором имеют, к сожалению, весьма ограниченные знания по метрологическим вопросам. Для создания успешной системы единиц (в настоящее время речь идет о версии системы СИ) необходим диалог между физиками-метрологами и неметрологическим большинством физиков. Существует только одна профессиональная группа физиков, которая занимается подобными вопросами, — это Рабочая группа Французской академии наук по Основным единицам и физическим константам. Комиссия SUNAMCO и подобные группы хорошо дополняют друг друга и было бы целесообразно иметь такую группу и в России. Наличие подобных групп тем более важно, что следует ожидать значительных изменений международной системы СИ, и физики должны иметь возможность обсуждать эти вопросы и довести свое мнение до Международного комитета мер и весов, который будет принимать решения.

## 10. Будущее системы СИ

Характер обсуждения в ККЕ позволяет предположить, что переопределение килограмма и ампера будет, с большой вероятностью, принято через четыре года. Причем определение будет основано на фиксированных значениях  $h$  и  $e$ . Это, может быть, не столь очевидно из

обсуждений разных рабочих групп и комитетов. Однако дело заключается в том, что занимая отрицательную позицию, часто игнорируют многие практические обстоятельства. Эти обстоятельства неизбежно сыграют существенную роль при переопределении. Учитывая требования, связанные с электрическими измерениями, свобода выбора при решении вопроса о переопределении килограмма и ампера в терминах фундаментальных констант крайне незначительна.

Судьба кельвина и моля менее ясна, поскольку вопрос обсуждался не так интенсивно. Однако ясно, что их переопределение — это дело времени и, похоже, эти переопределения, если не через четыре года, то, весьма вероятно, через восемь или, в крайнем случае, через двенадцать лет будут приняты.

Преобразование системы СИ на этом не остановится. Не очень скоро, но во вполне обозримом будущем возможно также обсуждение нового определения секунды — после нескольких десятилетий доминирования радиочастотного сверхтонкого перехода в атоме цезия впервые появилось много альтернативных часов. Они несколько уступают цезиевым, однако прогресс в данной области достаточно быстр.

Может измениться и статус кандеры. Роль измерений "субъективных" величин, связанных с человеком, экологией и т.д., в обществе непрерывно возрастает, следовательно, необходимо адекватное метрологическое обеспечение. Сейчас подход к таким единицам носит в некотором смысле случайный характер и, например, тогда как кандера (единица субъективного восприятия интенсивности источника света) представляет собой одну из основных единиц СИ, зиверт (единица субъективного восприятия дозы излучения) является производной единицей. Между тем эти единицы аналогичны. Мы надеемся, что при систематическом подходе к проблеме будет признано, что соответствующие величины не вполне относятся к физике, поэтому их единицы, включая и кандеру, должны рассматриваться иначе, чем единицы действительно физических величин.

Вероятно, единственное, что сохранится от современных определений основных единиц СИ, — это фиксированное значение скорости света. Принятие его в 1983 г. явилось первым шагом в решении проблемы представления единиц основных физических величин в терминах фундаментальных физических констант. Следующий важный шаг будет сделан, вероятно, через четыре года. Это будет переопределение килограмма и ампера, которое устранил последний артефакт из определений единиц физических величин.

### On the redefinition of the kilogram and ampere in terms of fundamental physical constants

S.G. Karshenboim

The State Research Center of the Russian Federation "D.I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology"

Moskovskii prosp. 19, 190005 St. Petersburg, Russian Federation

Tel. (7-812) 323-96 75. Fax (7-812) 713-01 14.

Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Hans-Kopfermann Str. 1, 85748 Garching, Germany

E-mail: sgk@vniim.ru; sek@mpq.mpg.de

In the summer of 2005 a meeting of the Consultative Committee for Units of the International Committee of Weights and Measures took place. One of the topics discussed at the meeting was a possible redefinition of the kilogram in terms of fundamental physical constants — a question of relevance to a wide range of specialists, from school teachers to physicists in a wide variety of fields. In this paper the current situation regarding this question is briefly reviewed, and its discussion by the Consultative Committee for Units and other bodies involved is reported on. Some other issues related to the International System of Units (SI) and covered at the meeting are also discussed.

PACS numbers: 06.20. – f, 06.20.F – , 06.30. – k

Bibliography — 8 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk 176 (9) 975–982 (2006)

Автор признателен Б. Вуду (B.M. Wood), Р. Дэвису (R. Davis), П. Мору (P.J. Mohr), Л. Б. Окуно и Б. Тэйлору (B.N. Taylor) за полезные обсуждения.

### 11. Приложение.

#### Полные и сокращенные названия международных организаций, упоминаемых в статье

КОДАТА (CODATA) — Комитет по данным Международного союза науки (Committee on Data of International Council of Science (ICSU));

Рабочая группа CODATA по фундаментальным константам — CODATA task group on fundamental constants; МКМВ (CIPM — от франц. Comité International des Poids et Mesures) — Международный комитет мер и весов в (International committee on weights and measures);

ККЕ (CCU) — Консультативный комитет по единицам МКМВ (Consultative Committee for Units of CIPM);

МБМВ (BIPM — от франц. Bureau International des Poids et Mesures) — Международное бюро мер и весов в (International bureau on weights and measures);

ГКМВ — Генеральная конференция мер и весов (General conference on weights and measures);

IUPAP — International Union of Pure and Applied Physics (Международный союз чистой и прикладной физики);

IUPAC Commission on Symbols, Units, Nomenclature, Atomic Masses, and Fundamental Constants (SUNAMCO) — Комиссия SUNAMCO Международного союза чистой и прикладной физики;

ССЕМ — Consultative Committee for Electricity and Magnetism (Консультативный комитет по электричеству и магнетизму);

ССМ — Consultative Committee for Mass and Related Quantities (Консультативный комитет по массе и связанным величинам);

ССQM — Consultative Committee on the Amount of Substance — metrology in chemistry (Консультативный комитет по количеству вещества и метрологии в химии).

### Список литературы

1. Mills I M et al. *Metrologia* **42** 71 (2005)
2. *The International System of Units (SI)* (Sèvres: BIPM, 1998)
3. Giacomo P *Metrologia* **20** 25 (1984)
4. Karshenboim S G, physics/0507200
5. Quinn T J *Metrologia* **26** 69 (1989), см. p. 70; **38** 89 (2001), см. p. 91; **26** 69 (1989), p. 69
6. Каршенбойм С Г *УФН* **175** 271 (2005)
7. Mohr P J, Taylor B N *Rev. Mod. Phys.* **77** 1 (2005)
8. Mills I M et al. *Metrologia* **43** 227 (2006)

Received 27 December 2005  
Physics – Uspekhi **49** (9) (2006)