

## О переопределении четырех основных единиц СИ

Л. К. ИСАЕВ, С. А. КОНОНОВ, В. В. ХРУЩЕВ

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

Предложено осуществлять выбор фундаментальной физической константы для переопределения основной единицы измерения обновленной СИ по принципу согласования размерностей константы и единицы измерения, когда они либо совпадают, либо отличаются на фактор размерности времени. Предложены количественный критерий согласованности новых прототипов килограмма с его международным прототипом и количественное ограничение их нестабильности. Рассмотрена возможность сохранения связи между определениями моля и килограмма в обновленной СИ. Предложено переопределять килограмм и моль с помощью фиксированного значения постоянной Авогадро, кельвин и ампер — после повышения точности измерения постоянной Больцмана и замыкания «квантового треугольника».

**Ключевые слова:** переопределение основных единиц СИ, фундаментальная физическая константа, размерность физической величины, нестабильность международного прототипа килограмма.

*A principle of concordance for physical dimensions of a base unit of the SI and a fundamental physical constant is proposed. In this case the dimensions of the constant and the base unit coincide or differ with a time dimension factor. A quantitative criterion of correspondence of new BIPM prototypes of the kilogram and the IPK and also quantitative limitation of the instability of new BIPM prototypes of the kilogram are presented. A possibility to preserve the connection between the definitions of the mole and kilogram in the updated SI is considered. It is proposed to redefine the kilogram and mole using a fixed value of the Avogadro constant and the kelvin and ampere after the improvement of measurement accuracy of the Boltzmann constant and the closure of the «quantum triangle».*

**Key words:** redefinition of the SI base units, fundamental physical constant, dimension of a physical quantity, instability of the International Prototype of the Kilogram.

В принятой на 24-й Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) Резолюции 1 «О возможном будущем пересмотре Международной системы единиц (СИ)» предлагается: «МКМВ продолжить работу, направленную на улучшение формулировок определений основных единиц СИ через фундаментальные константы и сделать, насколько возможно, более простыми описания для понимания пользователей, следуя при этом принципам научной строгости и ясности изложения» [1]. Целью данной статьи является обсуждение некоторых модификаций новых формулировок четырех основных единиц СИ (килограмма, моля, ампера и кельвина) и процедуры переопределения этих единиц с помощью фиксированных значений фундаментальных физических констант (ФФК), что должно способствовать решению заявленных на 24-й ГКМВ задач.

Как известно, переопределение четырех единиц на основе фиксированных значений ФФК в рамках новой СИ опирается на принцип фиксации точного значения соответствующей константы, 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—7]. Использование точных значений ФФК имеет большое значение для метрологии [8—12], и эти предложения получили поддержку со стороны метрологических организаций, совещаний и конференций [1, 3, 5, 6]. Для уточнения формулировок определений и выбора ФФК в настоящей статье обращено внимание на некоторые недостатки предложений [7] и представлен модифицированный подход к выбору констант для проведения процедуры переопределения четырех единиц.

**Некоторые условия и последствия фиксации значений констант.** Рассмотрим более подробно фиксацию значения скорости света  $c$ , которая является метрологической процедурой для определения основной единицы измерения — единицы длины. Можно считать введение фиксированного значения скорости света переходом в рамках действующей СИ к новой основной единице измерения, а именно, к единице скорости. При этом единица длины становится производной единицей, которая определяется через скорость света и время. Конечно, этот вопрос можно свести к выбору между двумя типами определений (так называемые определения «точной константы» и «точной единицы» [7]) и принимаемого соглашения. Более важным является то, что при введении определения «светового метра» в 1983 г. были достигнуты условия высокоточного определения частоты и скорости света, на порядок и выше превышающие точность измерения длины, что и обусловило возможность фиксации значения  $c$ .

Для четырех предлагаемых для переопределения единиц СИ, с точки зрения фиксации значений ФФК  $h$ ,  $e$ ,  $k$  и  $N_A$ , современное положение дел другое, причем свое для каждой константы. Возникает вопрос об условиях и последствиях этой фиксации. Например, если одновременно принять все новые определения единиц СИ на основе фиксированных значений  $h$ ,  $e$ ,  $k$  и  $N_A$ , то это приведет к проблеме согласования констант. Так, при одновременной фиксации  $h$  и  $N_A$  возникнет жесткая связь между скоростью света в вакууме  $c$ , молярной постоянной  $M_u$ , относительной атомной массой электрона  $A_r(e)$ , постоянными тонкой структуры  $\alpha$  и Ридберга  $R_\infty$ . На эту связь указывает известное соотношение [13, 14]:  $R_\infty/(A_r(e)\alpha^2) = M_u c/(2hN_A)$ ,  $M_u = 10^{-3}$  кг/моль и  $M_u = M(^{12}\text{C})/12$ , где  $M(^{12}\text{C})$  — молярная масса углерода. В

настоящее время константы  $c$  и  $M_u$  зафиксированы, тогда как  $A_r(e)$ ,  $R_\infty$  и  $\alpha$  определяются из опыта с высокой точностью (порядка  $10^9$ ). Поэтому одновременная фиксация значений  $h$  и  $N_A$  при действующих определениях ФФК приведет к дополнительному соотношению между  $A_r(e)$ ,  $R_\infty$  и  $\alpha$ . Для того чтобы такая связь не возникала, требуется изменение действующих определений этих констант, например, молярной постоянной  $M_u$ , что и предлагается при введении новых определений килограмма и моля на основе фиксированных значений  $h$  и  $N_A$  [15]. Это является недостатком новых определений, поскольку переводит молярную постоянную в разряд изменяющихся физических величин:  $M_u = M_{u0}(1 + \kappa)$ , где  $\kappa$  — рассчитываемая по экспериментальным данным поправка. Ниже будет показано, что от этого недостатка можно избавиться, если воспользоваться определением килограмма на основе фиксированного значения постоянной Авогадро [16].

**Принцип соответствия размерностей основных единиц и ФФК — природных инвариантов.** Как для новых определений единиц СИ выбрать константы, значения которых могут быть непротиворечивым образом зафиксированы? На первый взгляд, кажется, что ФФК, значение которой определяется в результате проводимых измерений, не может быть зафиксирована, так как ее значение обязательно содержит неопределенность измерений. Однако если эта неопределенность меньше некоторого предела, обусловленного максимальной точностью измерений, результат которых выражен в выбранных единицах СИ, то для нового определения единицы допустимо зафиксировать значение соответствующей ФФК. При этом данная процедура не должна приводить к противоречию при применении других констант с фиксированными значениями. Вводимое метрологическое соглашение, конечно, в определенной мере будет влиять на физический смысл используемой ФФК в настоящее время и в будущем. При этом надо учитывать, что статус любой константы не является абсолютным, поэтому при обобщении теории, а также повышении точности измерений ее значение может испытывать вариации при изменении пространственно-временных и энергетических масштабов [17, 18].

Таким образом, желательно, чтобы число фиксируемых констант было минимально возможным и связь между используемой ФФК и соответствующей единицей измерения была наиболее простой. Например, это достигается, когда основная единица измерения и используемая ФФК имеют одинаковую физическую размерность: если  $[D]_{BU}$  — размерность основной единицы,  $[D]_{NI}$  — размерность природного инварианта, желательно, чтобы  $[D]_{BU} = [D]_{NI}$ . Однако применение этого принципа приведет к тому, что к основным единицам измерений новой СИ нельзя будет отнести метр и ампер. Основными единицами измерений становятся при этом единицы скорости и электрического заряда, и в этом случае необходимо менять набор основных единиц. В то же время известно, что набор основных единиц СИ определяется набором основных физических величин по классификации Международной системы величин ISQ. Поэтому если требовать, чтобы метр и ампер остались в числе основных единиц новой СИ, то приведенное выше условие для выбора ФФК следует обобщить [19].

По аналогии с использованием скорости света для определения метра обобщенное условие использования ФФК может быть сформулировано в следующем виде: основная единица измерения определяется с помощью природного

инварианта с такой же размерностью или с размерностью, отличающейся от исходной на степень времени:

$$[D]_{BU} = [D]_{NI} \times [T]^d, \quad (1)$$

где  $d$  — рациональное число.

Как упоминалось выше, включение в условие (1) фактора с размерностью степени времени связано с необходимостью сохранить преемственность с делением на основные и производные единицы в действующей и обновленной СИ (действующее определение единицы длины на базе фиксированного значения скорости света и новое определение ампера на основе фиксированного значения электрического заряда). С учетом рекордной точности измерения величин с размерностями времени или частоты возможное присутствие в некоторых случаях дополнительного фактора  $[T]^d$  не повлияет на точность воспроизведения рассматриваемой единицы.

Известно, что применение в метрологии набора основных физических величин предполагает независимость этих величин, однако использование набора основных единиц измерений величин допускает зависимость их друг от друга. Например, определение моля в действующей СИ явно связано с определением килограмма. Тем не менее, моль является основной единицей измерения количества вещества, которая может быть определена только после определения килограмма. В обновленной СИ есть возможность сделать равноправными единицы массы и количества вещества даже при сохранении связи между ними.

**Выбор ФФК с фиксированными значениями.** Рассмотрим возможный выбор констант, значения которых могут быть зафиксированы в обновленной СИ. При этом необходимо учитывать их статус, точность измерений значений ФФК, возможность соблюдения условия преемственности новых и исторически сложившихся размеров единиц, а также предложенный выше принцип согласования размерностей. Напомним, что физическим обоснованием фиксации значения скорости света в вакууме являются неоднократные экспериментальные подтверждения выводов специальной теории относительности, а метрологической основой — более высокая точность измерений промежутков времени и скорости света по сравнению с точностью измерений интервалов длин. Какие физические величины, кроме скорости света, в настоящее время удовлетворяют этим требованиям? Например, это заряды и массы существующих элементарных частиц, атомов и молекул. Многочисленные экспериментальные подтверждения идентичности этих объектов не только в современную эпоху, но и в более ранние времена позволяют считать неизменными их физические характеристики. Таким образом, могут быть зафиксированы абсолютная величина электрического заряда электрона и масса атома, например атома углерода-12.

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. Среди различных критериев перехода на новые определения единиц СИ основным является достижение относительной стандартной неопределенности значений постоянных Планка и Авогадро уровня  $10^{-8}$  и совпадение их значений, получаемых разными методами, в пределах установленных стандартных неопределенностей. Даже после выполнения

этих условий вопрос о выборе конкретного варианта определения, например единицы массы, останется открытым. В настоящей статье предлагается выбирать определение любой основной единицы измерения на основе сформулированного выше дополнительного условия согласования размерностей ФФК и единицы измерения с учетом Рекомендации G1 Консультативного комитета по массе и связанным с ней величинам (ККМ), принятой в 2010 г. [20]. В ней предлагается смягчить ранее принятые следующие рекомендации МКМВ и 23-й ГКМВ для замены международного прототипа килограмма (МПК) [3, 6]:

как минимум в трех независимых экспериментах, включая эксперименты с ватт-весами и международный координационный проект «Авогадро», должны быть получены значения соответствующих констант с относительными стандартными неопределенностями не более  $5 \cdot 10^{-8}$ . По меньшей мере, один из этих результатов должен иметь относительную стандартную неопределенность не более  $2 \cdot 10^{-8}$ ;

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

согласованность новых прототипов килограмма с МПК должна быть подтверждена.

Эти ограничения являются предельными, потому что увеличение указанных выше относительных стандартных неопределенностей измерений постоянных Планка и Авогадро приведет к нарушению сложившейся практики измерений массы с высокой точностью для масс класса  $E_1$  [21]. Более того, последнюю рекомендацию, по мнению авторов, следует дополнить количественным критерием согласованности и ограничением возможной временной нестабильности:

должна быть подтверждена согласованность новых прототипов килограмма с МПК с относительной стандартной неопределенностью на уровне  $2 \cdot 10^{-9}$  и возможной временной нестабильностью за год на уровне  $5 \cdot 10^{-10}$ .

Приведенные выше количественные критерии согласованности новых прототипов килограмма с МПК получены исходя из требуемой максимальной точности определения постоянных Планка и Авогадро, а также зафиксированной временной нестабильности копий МПК за 100 лет [22].

Рассмотрим, как можно использовать введенный выше количественный критерий согласованности новых прототипов килограмма с МПК. Так как новый килограмм  $1 \text{ кг}^*$  (звездочкой отмечены единицы, определяемые при фиксированном значении  $N_A$ ) может отличаться от МПК не более чем на  $2 \cdot 10^{-9}$  по относительной стандартной неопределенности, в формулах, куда входят постоянная Авогадро, определенная с точностью порядка  $10^8$ , и новый килограмм, можно положить  $1 \text{ кг}^* = 1 \text{ кг}$ . Таким образом, имеем

$$m_C N_A = 12 M_u, \quad (2)$$

где  $m_C$  — атомная масса углерода-12;  $M_u$  определена в рамках действующей СИ.

Из уравнения (2) получаем значение  $m_C$  с относительной стандартной неопределенностью порядка  $10^{-8}$  [16, 19, 20]. Заметим, что фиксация массы атома углерода является фактически выбором микроскопического эталона массы. Если определить новый килограмм с помощью постоянной Планка, то из трех постоянных  $N_A$ ,  $h$  и  $m_C$  можно непротиворечивым образом зафиксировать только две постоянные [23, 24].

Таким образом, в рассматриваемом случае представляется излишним фиксировать значение  $h$ , как это предлагается делать при определении электрического килограмма [25]. Постоянную Планка лучше отнести к классу констант, значения которых находят 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 с использованием приборов, основанных на одноэлектронном туннелировании, т. е. фактически создания квантового стандарта силы тока. Только тогда станет возможным замыкание так называемого «квантового треугольника» и обоснование в рамках новой СИ согласованной системы практических электрических единиц [26].

Такое замыкание означает взаимную согласованность значений постоянной Планка, элементарного заряда, соотношений Джозефсона и фон Клитцинга и необходимо для принятия и реализации предлагаемого нового определения ампера при фиксируемом значении  $e$ . Причем независимое измерение  $h$  с помощью ватт-весов после замыкания «квантового треугольника» явилось бы дополнительной проверкой соотношения  $K_J^2 R_K = 4/h$ , которое пока строго не доказано, и поэтому не следует исключать существование более общего соотношения

$$K_J^2 R_K (1 - 2\varepsilon_J - \varepsilon_K) = 4/h. \quad (3)$$

В (3) поправки  $\varepsilon_J$  и  $\varepsilon_K$  учитывают возможные отклонения констант Джозефсона  $K_J$  и фон Клитцинга  $R_K$  от значений  $K_{J0} = 2e/h$ ,  $R_{K0} = h/e^2$ , соответственно, т. е.  $K_J = K_{J0}(1 + \varepsilon_J)$ ;  $R_K = R_{K0}(1 + \varepsilon_K)$  [19]. В случае фиксации значения  $N_A$  возникает точный способ измерения  $h$  с помощью  $m_e$ ,  $R_\infty$  и  $\alpha$ , при этом метод ватт-весов становится методом точного определения

произведения  $K_J^2 R_K$ , что будет способствовать развитию теории макроскопических квантовых эффектов Джозефсона и Холла.

Таким образом, представляется целесообразным фиксировать значение постоянной Планка после создания квантового эталона силы электрического тока и проверки соотношений Джозефсона и фон Клитцинга на более высоком уровне точности, когда станет возможным использование практических электрических единиц  $\Omega_{90}$  и  $V_{90}$  в рамках новой СИ.

Переход к фиксированному значению постоянной Больцмана в настоящее время возможен, но не вызван практическими потребностями, так как существующая точность практических измерений температуры (около  $10^4$ ) не может быть существенно повышена в обозримом будущем. Однако при переходе к фиксированному значению постоянной Больцмана желательно, чтобы оно было получено из результатов нескольких экспериментов в области молекулярной физики с относительной стандартной неопределенностью не выше  $10^{-6}$  [27, 28].

**Переопределение моля и килограмма на основе фиксированного значения постоянной Авогадро.** Рассмотрим более подробно возможную процедуру переопределения



единиц массы и количества вещества на основе фиксированного значения постоянной Авогадро  $N_A^*$  и массы атома углерода-12. Заметим, что, фиксируя определенное численное значение  $N_A$ , т. е. так называемое число Авогадро  $\{N_A\}$ , выбираем однозначную и прослеживаемую связь между микро- и макромирами, которая не противоречит физическим законам. При этом, чтобы соблюсти преемственность с действующей СИ, удобно сохранить определение молярной массы углерода-12. Итак, надо выбрать такую совокупность числа атомов углерода, общая масса которых будет наиболее близка к массе МПК с учетом предложенной неопределенности  $2 \cdot 10^{-9}$ . С помощью такой процедуры будет задан как микроскопический эталон массы, основанный на массе атома углерода, так и ее макроскопический эталон, согласованный с МПК и основанный на двух инвариантах — массе атома углерода и фиксированном значении  $N_A$ . В этом случае инвариантом является также молярная масса углерода.

В настоящей работе предлагается сохранить действующую в СИ связь между единицами количества вещества и массы, тогда имеем

$$\{N_A^*\} = 0,012 \{N_{kg}^*\},$$

где фиксированное число атомов углерода ( $N_{kg}^*$ ) задает макроскопическую единицу массы новой СИ — килограмм\*, причем значение молярной постоянной  $M_u$  в новых единицах килограмм\* и моль\* не меняется [19, 29].

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 непосредственно связано с новым определением единицы количества вещества, а именно: *моль\*, единица количества вещества, содержит  $\{N_A^*\}$  структурных элементов данного вещества*. Такие определения килограмма и моля согласуются с имеющимися в настоящее время определениями этих единиц в рамках СИ и той связью, которая между ними есть. Следовательно, в этом случае можно сохранить существующие значения молярной массы углерода  $M(^{12}\text{C})$  и константы молярной массы  $M_u$ , равные соответственно 12 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. Вполне естественно, чтобы широко используемые единицы массы СИ и СГС (килограмм и грамм) содержали целое число атомов углерода-12. В этом случае значение  $\{N_A^*\}$  должно делиться на 12 [19]. Теперь главная задача — выбрать значение  $\{N_A^*\}$  из определенного интервала, чтобы относительная разность значений существующего килограмма  $\{K\}$  и нового килограмма  $\{K^*\}$  была порядка  $10^{-9}$ . Тогда новые молярная масса углерода и константа молярной массы будут выражаться через килограмм ( $\text{кг}^*$ ) и моль (моль\*) аналогично старым величинам:

$$M(^{12}\text{C})^* = 12 \cdot 10^{-3} \text{ кг}^*/\text{моль}^*; \quad M_u^* = 10^{-3} \text{ кг}^*/\text{моль}^*.$$

Такой вариант новых определений килограмма, моля и константы молярной массы очень удобен, поскольку не нарушает сложившейся практики расчетов масс и количества вещества в химии [29].

Рассмотрим, каким образом может происходить выбор конкретного фиксированного значения числа Авогадро  $\{N_A^*\}$ . В настоящее время для этого можно использовать полученные в результате проведения международного координационного проекта «Авогадро» в экспериментах с кремниевыми шарами значения  $\{N_A\}$ , которые принадлежат интервалу отклонения стандартных неопределенностей на уровне  $1\sigma$  ( $1\sigma$ -интервалу) [14]:

$$\{N_A\} = (6,02214066 \dots 6,02214102) \cdot 10^{23}. \quad (4)$$

Кроме того, недавно опубликованы результаты NRC [30], согласно которым  $1\sigma$ -интервалом для числа Авогадро является интервал  $(6,02214102 \dots 6,02214140) \cdot 10^{23}$ , однако при этом существует расхождение между значениями атомной массы кремния, которые были получены в IAC [14] и NRC.

Таким образом, могут существовать несколько вариантов выбора  $N_A^*$ . Поэтому следует привлечь дополнительные доводы при выборе того или иного фиксированного значения  $N_A^*$ . Так, можно использовать геометрическое условие, чтобы моль углерода-12 заполнял воображаемый куб [31], тогда  $N_A^* = 84446889^3$ . Также при выборе  $N_A^*$  можно учитывать особенности структуры кристаллической решетки кремния. Правда в поверхностном слое кремниевого шара, где эта структура сильно нарушена, ее приходится восстанавливать с помощью компьютерного моделирования, из-за чего наблюдается значительная потеря точности. В связи с этим представляет интерес предложение о реализации моля или одного грамма углерода с помощью четного числа листов графена. Это предложение может быть физически реализовано в обозримом будущем. В [32] были вычислены параметры шестигранной призмы из графена, которая содержит определенное число атомов углерода, делящееся на 12, при этом было показано, что число, близкое к числу Авогадро, может быть выбрано как  $\{N_A\} = 12(m/2)^2 (1 + 3(m/2))$  при  $m = 51150060$ . Интересно, что при  $m = 51150058$  значение  $\{N_A\}$  попадает в допустимый  $1\sigma$ -интервал (4), который получен после завершения проекта «Авогадро» [14]. Таким образом, можно в качестве  $\{N_A^*\}$  выбрать значение

$$\{N_A^*\} = 602214087869325727188096. \quad (5)$$

В результате приходим к следующим определениям килограмма и моля, если использовать, например, фиксированное значение числа Авогадро (5).

*Килограмм — это единица массы, точно равная сумме масс  $50184507322443810599088 \cdot 10^3$  свободных атомов углерода-12 в состоянии покоя и в основном квантовом состоянии. Моль — это единица количества вещества, содержащая точно  $602214087869325727188096$  частиц этого вещества.*

Эти определения килограмма и моля сохраняют преемственность с действующими определениями СИ и не нару-

шат существующие метрологические цепочки передачи единиц массы, количества вещества и сложившуюся практику измерений этих величин [19—21, 23, 24, 29].

**Заключение.** Замена существующих определений четырех основных единиц СИ (килограмма, ампера, кельвина и моля) определениями на основе точных значений постоянных Планка, Авогадро, Больцмана и заряда электрона пока не решена на рекомендуемом уровне точности этих ФФК. В настоящее время преобладает мнение, что новое определение килограмма должно быть основано на фиксируемом значении постоянной Планка, которая является ФФК квантовой механики, как  $c$  — ФФК теории относительности. При этом переопределение ампера через фиксацию заряда электрона  $e$ , когда величины  $2e/h$  и  $h/e^2$  имеют точно определенные значения, даст преимущества метрологии электрических измерений и переведет практические электрические единицы  $\Omega_{90}$  и  $V_{90}$  в разряд единиц новой СИ. Однако, как обсуждалось выше, лучше отнести  $h$  к классу электромагнитных квантовых констант и зафиксировать  $h$ ,  $e$  после создания квантового стандарта силы тока и проверки соотношений для постоянных Джозефсона и фон Клитцинга.

Рассмотрены критерии выбора ФФК с фиксированными значениями для переопределений основных единиц СИ, которые сводятся к согласованию размерностей основной единицы измерения и соответствующей ей ФФК. В частности, этим критериям удовлетворяют масса атома углерода-12 и электрический заряд электрона. Предложены также количественный критерий согласованности новых прототипов килограмма с МПК и количественное ограничение возможной нестабильности этих новых прототипов. После повышения точности измерения  $N_A$  предлагается переопределить килограмм и моль на основе фиксированных значений постоянной Авогадро и молярной массы углерода-12, т. е. килограмм — это такая единица массы, когда молярная масса углерода-12 равна 12 г/моль. Рассмотренная процедура фиксации  $N_A$  и  $m_C$  ведет к наглядным и логически безупречным определениям килограмма и моля, совместимым с принятыми в настоящее время определениями этих двух единиц и сложившейся практикой измерений массы и количества вещества. Условиями для переопределения кельвина и ампера являются повышение точности измерения различными методами постоянной Больцмана и создание квантового стандарта силы тока, после чего могут быть зафиксированы значения  $k$ ,  $h$ ,  $e$ .

## Л и т е р а т у р а

1. **BIPM 2011.** 24 CGPM Resolutions [Официальный сайт]. [http://www.bipm.org/utis/common/pdf/24\\_CGPM\\_Resolutions.pdf](http://www.bipm.org/utis/common/pdf/24_CGPM_Resolutions.pdf) (дата обращения: 24.10.2012).
2. **Mills I. M. e. a.** Redefinition of the kilogram: a decision whose time has come // *Metrologia*. 2005. V. 42. P. 1—80.
3. **BIPM 2005.** CIPM Recommendation 1 [Официальный сайт]. <http://www.bipm.org> (дата обращения: 24.10.2012).
4. **Mills I. M. e. a.** Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM Recommendation 1 (C1—2005) // *Metrologia*. 2006. V. 43. P. 227—246.
5. **BIPM 2008.** The International System of Units 8<sup>th</sup> edn [Официальный сайт]. <http://www.bipm.org> (дата обращения: 24.10.2012).
6. **BIPM 2007.** CGPM Resolution 12 [Официальный сайт]. <http://www.bipm.org> (дата обращения: 24.10.2012).
7. **Mills I. M. e. a.** Adapting the International System of Units to the twenty-first century // *Phil. Trans. R. Soc. London*. 2011. V. A 369. P. 3907—3924.
8. **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., Melnikov V. N.** The fundamental physical constants, the gravitational constant and the SEE space experiment project // *Measurement Techniques*. 2005. V. 48. N 6. P. 521—536.
9. **Кононогов С. А.** Метрология и фундаментальные физические константы. М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2008.
10. **Пятьдесят лет по пути к квантовым единицам СИ:** Материалы Междунар. симп. С.Петербург, 2010.
11. **Француз Э. Т.** Фундаментальные физические константы новой Международной системы единиц (СИ) // *Измерительная техника*. 2010. № 3. С. 3—9; **Frantsuz E. T.** Fundamental physical constants in the new SI // *Measurement Techniques*. 2010. V. 53. N 3. P. 228—231.
12. **Quinn T., Burnett K.** The fundamental constants of physics, precision measurements and the base units of the SI // *Phil. Trans. R. Soc. London*. 2005. V. A363. P. 2101.
13. **Mohr P. J., Taylor B. N., Newell D. B.** CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010 // *Rev. Mod. Phys.* 2012. V. 80 P. 633—730.
14. **Andreas B. e. a.** (IAC) Counting the atoms in a <sup>28</sup>Si crystal for a new kilogram definition // *Metrologia*. 2011. V. 48. P. S1—13.
15. **Taylor B. N.** Molar mass and related quantities in the New SI // *Metrologia*. 2009. V. 46. P. L16—19.
16. **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 standard of the mass unit // *Measurement Techniques*. 2006. V. 49. N 10. P. 953—956.
17. **Бронников К. А., Мельников В. Н.** Фундаментальные константы и переход на новые определения единиц СИ // *Измерительная техника*. 2010. № 11. С. 3—9; **Bronnikov K. A., Melnikov V. N.** The fundamental constants and the transition to the new definitions of the SI units // *Measurement Techniques*. 2010. V. 53. N 11. P. 1196—1203.
18. **Ивашук В. Д., Кононогов С. А., Мельников В. Н.** Анализ результатов измерений постоянной тонкой структуры и их влияния на новые определения единиц СИ // *Измерительная техника*. 2011. № 8. С. 25—28; **Ivashchuk V. D., Kononogov S. A., Melnikov V. N.** An analysis of the results of measurements of the fine-structure constant and their effect on the new definitions of the SI units // *Measurement Techniques*. 2011. V. 54. N 8. P. 887—892.
19. **Хрущев В. В.** Об оптимальном наборе фундаментальных констант с фиксированными значениями для переопределения единиц СИ // *Измерительная техника*. 2011. № 10. С. 3—8; **Khrushchev V. V.** Optimum choice of fundamental physical constants with fixed values for redefinition of SI units // *Measurement Techniques*. 2012. V. 54. N 10. P. 1103—1110.
20. **BIPM 2010.** CCM Recommendation G1 [Официальный сайт]. <http://www.bipm.org> (дата обращения: 24.10.2012).
21. **Gläser M. e. a.** Redefinition of the kilogram and the impact on its future dissemination // *Metrologia*. 2010. V. 47. P. 419—428.
22. **Davis R. S.** Possible new definitions of the kilogram // *Phil. Trans. R. Soc. London*. 2005. V. A363. P. 2249—2264.
23. **Leonard B. P.** Comments on recent proposals for redefining the mole and kilogram // *Metrologia*. 2010. V. 47. P. L5—8.

24. Jeannin Y. What is a mole?: old concepts and new (continued) // Chem. Int. 2010. V. 32. N 1. P. 8—11.

25. Steiner R., Williams E. R., Newell D. B. Towards an electronic kilogram: an improved measurement of the Plank constant and electron mass // Metrologia. 2005. V. 42. P. 431—441.

26. Wulf M., Zorin A. B. Error accounting in electron counting experiments // arXiv. 0811.3927.

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

28. BIPM 2010. CCT Recommendation T2 [Офици. сайт]. <http://www.bipm.org> (дата обращения: 24.10.2012).

29. Leonard B. P. Why the dalton should be redefined exactly in terms of the kilogram // Metrologia. 2012. V. 49. P. 487—491.

30. Steele A. G. e. a. Reconciling Planck constant determinations via watt balance and enriched-silicon measurements at NRC Canada // Metrologia. 2012. V. 49. P. L8—10.

31. Hill T. P., Miller J., Censullo A. C. Towards a better definition of the kilogram // Metrologia. 2011. V. 48. P. 83—86.

32. Fraundorf P. A multiple of 12 for Avogadro // arXiv. 1201.5537.

Дата принятия 20.11.2012 г.

## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

519.6

### Оценка внешних воздействий на состояние динамических объектов

О. Н. НОВОСЕЛОВ

Московский государственный университет леса, Москва, Россия, e-mail: onn@mgul.ac.ru

*Представлен метод анализа внешних воздействий на состояние динамического объекта, идентифицированного уравнением эволюции состояния. Одно из важных применений — выработка стабилизирующего воздействия на природный объект для предотвращения катастрофы.*

**Ключевые слова:** динамический объект, стабилизирующее воздействие, уравнение эволюции состояния, поле решений.

*The method of analysis of exposure on the state of dynamic object identified by the equation of state evolution is presented. One of the important applications — the development of stabilizing exposure upon natural object for catastrophe prevention.*

**Key words:** dynamic object, stabilizing exposure, state evolution equation, solution field.

Методы идентификации, разработанные в [1], позволяют контролировать состояние динамического объекта в процессе функционирования в естественной среде, чтобы принять надлежащие меры в случае опасного приближения к критическим границам. Одна из таких мер — управляющее внешнее воздействие для возвращения объекта в устойчивое состояние. Например, в геофизике в качестве такого воздействия рассматривалась длительная упругая волна, создаваемая мощным вибратором, препятствующая блокировке природных блоков в граничных структурах геологической среды для предотвращения землетрясения [2, 3].

Однако подходящей теории для обоснования видов управляющих воздействий и оценки их результативности применительно к произвольным объектам пока не существует. Чтобы решить эту задачу, предлагается практический метод, универсальный для любых объектов. Он основан на новом математическом описании динамического объекта в форме разностного уравнения эволюции состояния [1]. Для

построения уравнения необходимы только измеряемые параметры и не требуются сведения о специфике объекта. Это придает черты универсальности математическому описанию и полученному на его основе методу оценки внешнего воздействия на состояние динамического объекта.

**Метод анализа.** В отсутствие воздействия будем представлять объект однородным разностным уравнением эволюции состояния. Для практических целей можно остановиться на уравнении 2-й степени и 2-го порядка [1]:

$$x_{k+2} = ax_{k+1} + bx_k + cx_{k+1}^2 + dx_k^2, \quad (1)$$

где  $x_k$  — измеряемый параметр объекта;  $k = 0, 1, 2, \dots$  — дискретное время измерений;  $a, b, c, d$  — индивидуальные для различных объектов коэффициенты, которые оцениваются по последовательности значений  $x_k$  измеряемого параметра [4];  $x_0, x_1$  — зарегистрированные начальные значения.