

Альтернативный набор определяющих констант для переопределения четырёх единиц Международной системы единиц

В. В. ХРУЩЁВ^{1,2}

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Россия, e-mail: khkon@vniims.ru

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

Обсуждаются различные наборы констант, фиксированные значения которых могут быть выбраны для новых определений четырёх единиц (килограмма, моля, ампера и кельвина) Международной системы единиц (СИ). Предложено понятие «порядка константы» в заданной системе единиц. Рассмотрены критерии оптимального выбора определяющих констант, а также набор констант, который состоит из постоянных Планка h , Авогадро N_A , Больцмана k и магнитной проницаемости вакуума μ_0 . Предложенный набор является альтернативным основному набору из h , e , k , N_A .

Ключевые слова: переопределение единиц СИ, размерность физической величины, определяющая константа, постоянная Планка, постоянная Авогадро, постоянная Больцмана, магнитная проницаемость вакуума.

Different sets of constants with fixed values which can be chosen for new definitions of four base SI units (the kilogram, mole, ampere and kelvin) are discussed. A notion of "order of the constant" in the system of units is offered. The criteria for the optimal choice of defining constants and an alternative set to the basic set of h , e , k , N_A consisting of the Planck constant h , the Avogadro constant N_A , the Boltzmann constant k and the magnetic constant μ_0 are considered.

Key words: redefinition of the SI units, dimension of a physical quantity, defining constant, Planck, Avogadro, Boltzmann, magnetic constants.

Существующие системы единиц физических величин являются частью необходимого комплекта средств измерений для проведения научных исследований. Современные технологии, развитие промышленности и международной торговли предполагают соответствующий научный уровень единиц физических величин. Однако в настоящее время продолжается использование Международного прототипа килограмма (МПК) из платино-иридиевого сплава, несмотря на то, что была обнаружена его временная нестабильность на уровне $5 \cdot 10^{-10}$ кг в год [1, 2]. Это неприемлемо при проведении высокоточных измерений и последующем использовании результатов этих измерений в течение долгого времени. Переопределение четырёх основных единиц Международной системы единиц (СИ) (пересмотр СИ), которое сейчас находится в стадии подготовки, будет решением этой проблемы [3, 4]. Планируемый пересмотр СИ основан на предложении переопределить четыре единицы измерения путём фиксации точных значений выбранных физических констант, следуя способу переопределения ампера в 1946 г. и метра в 1983 г. [5–7]. В 9-й редакции Брошюры СИ [4] вместо физических констант с фиксированным значением используется новый термин *определяющая константа* (ОК). Основным препятствием перехода к новым определениям является недостаточная точность экспериментальных значений предложенных ОК.

Предложение по переопределению ряда единиц СИ появилось в 1999 г. [8], более полный набор предложений – в 2006 г. [6]. Были рассмотрены несколько наборов ОК. В частности, было предложено точно без экспериментальной неопределённости фиксировать значения постоянной Планка h , элементарного заряда e , постоянной Больцмана k

и постоянной Авогадро N_A для переопределения килограмма, ампера, кельвина и моля, соответственно [4, 6, 7]. Сейчас этот набор ОК рассматривается как наиболее предпочтительный. В [4] изложение СИ с новыми определениями четырёх основных единиц, т. е. Модифицированной СИ (МСИ) или Новой СИ, ведётся на основе этого набора.

Сложившаяся ситуация с переходом к МСИ отражена в Резолюции 1 24-й ГКМВ в 2011 г.: «продолжить работу по улучшению формулировок определений основных единиц СИ на основе фундаментальных констант, обладающих научной строгостью и ясностью, для более лёгкого, по возможности, понимания их пользователями». Тем не менее, 25-я ГКМВ в 2014 г., отмечая прогресс, достигнутый после 24-й ГКМВ, рекомендовала продолжить выполнение Резолюции 1 24-й ГКМВ ввиду недостаточной точности измеренных значений ОК. Предполагается, что МСИ будет принята на 26-й ГКМВ в 2018 г. [3].

Целью данной работы является критическое обсуждение предложенных новых определений четырёх единиц СИ в свете последних теоретических и экспериментальных результатов [9–13]. При этом вводится новое понятие, а именно – *порядок константы* в заданной системе единиц, и предлагается совокупность критериев, которые могут быть использованы для выбора подходящего набора ОК. Предложен альтернативный набор ОК из h , k , N_A и магнитной проницаемости вакуума μ_0 . Отмечены преимущества этого набора по сравнению с выбранным в настоящее время основным набором из h , e , k , N_A . Следует ожидать, что рассмотрение этих вопросов будет полезным для выбора оптимального набора ОК и последующего его использования.

В статье предлагается новая классификация ОК в соответствии с их размерностями по отношению к основным единицам на основе вводимого понятия *порядка константы* и обсуждаются критерии для предпочтительного выбора ОК. Далее проанализированы различные наборы ОК, предложенные для переопределения четырёх единиц СИ. Затем рассмотрены новые определения килограмма, моля, ампера и кельвина на основе фиксированных значений h , μ_0 , k , N_A (система D). Отдельно рассмотрено применение понятия порядка ОК и описаны критерии выбора ОК. Отмечены достоинства и недостатки системы D по отношению к другим наборам.

Классификация определяющих констант и критерии их предпочтительного выбора. В [4] МСИ представлена на основе фиксированных значений h , e , k , N_A . Используется общее понятие ОК вместо более специальных понятий, таких как физическая константа, природная константа, МПК, материальный параметр и т. д. Совокупность констант делится на четыре класса, а именно: фундаментальные физические константы (ФФК), специальные атомные параметры, переводные коэффициенты и технические константы. Однако такая классификация имеет недостатки. Например, скорость света в вакууме c является ФФК, но после фиксации значения она становится переводным коэффициентом, в том смысле как это используется в рамках МСИ [4]. После фиксации N_A тоже становится переводным коэффициентом между единицей количества вещества и единицей для счёта объектов [4, 14], однако она является также природной константой (закон Авогадро). Известно, что количество констант изменяется вместе с изменением количества основных единиц [15]. Кроме того, количество констант в рамках определённой системы единиц зависит от используемой физической теории или модели. Например, в рамках нерелятивистской классической механики нет констант c , h , тогда как они появляются в релятивистской квантовой механике. В [16] с показателями степеней единиц для размерностей величин было ассоциировано векторное пространство, также был предложен критерий для определения полного набора констант. Различные классификации физических констант с учётом их роли при описании физических явлений рассмотрены в [17].

Ниже предлагается новая характеристика для констант, определяемых в какой-либо системе единиц. Константа, которая не зависит от основных единиц заданной системы, называется константой *нулевого порядка*. Константа, которая зависит от одной основной единицы, называется константой *первого порядка* и т. д. Такая классификация констант в соответствии с их порядками применяется далее для выбора совокупности ОК.

На первый взгляд, кажется, что значение физической константы не может быть зафиксировано, учитывая среднее значение и неопределённость результата измерений, которые приписываются значению физической константы. Однако с учётом связи между физической константой и единицей измерения, значение физической константы может быть зафиксировано точно, если при этом не происходит существенного увеличения неопределённости при реализации переопределяемой единицы и это приводит к дополнительным преимуществам при измерении других величин. Такая физическая константа с фиксированным значением будет являться ОК для рассматриваемой единицы измерения. Желательно, чтобы набор ОК был согласован, минимален и не приводил к противоречиям при одновременном использовании нескольких ОК. Конечно, статус любой выбранной ОК не является абсолютным и может изменяться при обобщении используемой теории или повышении точности

измерений некоторых физических констант.

В любом случае, ключевым является требование к МСИ, чтобы она не ухудшала положение, сложившееся для пользователей СИ в настоящее время. Это означает, что должна выполняться определённая преемственность или непрерывность по отношению к существующей СИ. Преемственность предполагает использование действующих ко дню ревизии основных единиц и их значений, чтобы сохранить огромный набор накопленных измерительных данных без проведения коррекции.

Очевидно также, что пересмотр СИ не должен понизить стабильность реализации единиц. Например, новые прототипы единицы массы, утверждённые МБМВ, должны иметь временную нестабильность менее $5 \cdot 10^{-10}$ в год в любое время и в любом месте. Напомним, что несоблюдение этого условия для МПК привело к планируемому переходу к МСИ [1, 2]. Чтобы не было противоречий между системой или набором ОК и существующими физическими теориями, количество ОК должно быть минимальным, и соотношения между ОК и единицами измерения должны быть наиболее простыми. Эти же требования желательно соблюдать для успешного преподавания основ метрологии в университетах и колледжах, что достигается, если основная единица измерения и соответствующая ОК имеют одинаковую размерность или связь между их размерностями наиболее простая. Например, размерности скорости света и метра, заряда электрона и ампера отличаются только на определённую степень времени. Размерность килограмма совпадает с размерностью атомной единицы массы $m_u = m_{^{12}\text{C}}/12$, где $m_{^{12}\text{C}}$ – масса ^{12}C . В терминах порядков констант, которые были введены выше, критерий, необходимый для этой цели, можно сформулировать следующим образом: *порядок ОК должен быть минимально возможным*.

Таким образом, предлагаются следующие *критерии выбора оптимального набора ОК для новых определений единиц* [18–20]: а) преемственность между старыми и новыми определениями; б) стабильность при передаче единиц измерений; в) минимальное число ОК; г) минимально возможный порядок ОК.

Анализ наборов определяющих констант, предложенных для переопределения четырёх основных единиц СИ. В настоящее время продолжаются дискуссии относительно достоинств и недостатков предложенных новых определений четырёх основных единиц СИ [9, 19, 20–22]. Предпочтительным вариантом является набор ОК, состоящий из h , e , k , N_A [6]. Были предложены также другие варианты [8, 9, 19, 20]. Например, по мнению авторов [9] достигнутый уровень данных CODATA-2014 [13] определяет новый контекст для выбора оптимального набора ОК по сравнению с тем, который был в 2007 г. на 23-й ГКМВ [6, 23]. Так, в [9] были рассмотрены пять возможных вариантов СИ с различными наборами ОК, включая действующую. В действующей СИ определения килограмма, ампера, кельвина и моля основаны на фиксированных значениях массы МПК $m(K)$, μ_0 , тройной точки воды T_{tpw} и молярной массы ^{12}C $M(^{12}\text{C})$. В [9] действующая СИ обозначена как система A . Другие варианты МСИ основаны на фиксированных значениях наборов констант, содержащих h , e , k , N_A , m_u , μ_0 . Учитывая, что во всех этих вариантах значения k , N_A фиксированы, можно различить эти варианты, выбирая две ОК из h , e , m_u , μ_0 . Так, система B содержит h , e , система C – e , m_u , система D – h , μ_0 , система E – m_u , μ_0 . Заметим, что пара h , m_u была исключена в работе [9], поскольку она приводит к переопределению секунды, а пара e , μ_0 исключена по причине отсутствия преимуществ по сравнению с вариантами B , C , D , E . Рассмотрим более подробно системы B , C , E (система D будет

описана далее). Система *B* – это вариант МСИ, предложенный в [6] и отмеченный в Резолюции 1 24-й ГКМВ как основной. В системе *B* обеспечивается нулевая неопределённость констант Джозефсона K_J и фон Клитцинга R_K , которые используются как практические электромагнитные эталоны, т. е. в этом варианте решается текущая проблема электрической метрологии, а именно существование фиксированных значений K_J , R_K , принятых в 1990 г. и согласованных с экспериментальными в пределах их неопределённостей. Однако в настоящее время это не соответствует действительности, т. е. значения 1990 г. должны быть заменены новыми значениями на основе последних данных CODATA для h , e к моменту ревизии, предполагая их известную связь с K_J , R_K .

Заметим, что для системы *B* постоянные μ_0 , M_u (постоянная молярной массы) должны изменяться в зависимости от текущих экспериментальных данных. Например, зависимость для μ_0 может быть представлена как $4\pi(1+\delta) \cdot 10^{-7}$ Н/А², где $\delta = \alpha/\alpha_{2018} - 1$, α_{2018} – наилучшее доступное экспериментальное значение α к моменту переопределения [9]. Значения u_r для δ и α равны, при условии, что значение α_{2018} является точным. Таким образом, если отклонения μ_0 , M_u от значений $4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/А² и 1 г·моль⁻¹ будут достаточно малы, то практически не будет проблем. Но фактор $1+\delta$ тяжело объяснить при введении μ_0 в учебниках и на лекциях по электромагнетизму, т. е. наличие этого фактора не согласуется с Резолюцией 1 24-й ГКМВ о том, что МСИ должна быть легко понимаема для пользователей в целом и совместима с научной строгостью и ясностью [3]. Эта ситуация подобна проблеме с изменяющейся постоянной молярной массы M_u в рамках систем *B*, *D*.

Новые определения килограмма и моля в системах *E*, *C* могут быть реализованы как с помощью ватт-весов, так и кремниевых шаров. Эквивалентность этих методов следует из известного соотношения

$$N_A h = A_r(e) M_u c \alpha^2 / (2 R_\infty),$$

где $A_r(e) = m_e/m_u$ – относительная атомная масса электрона; $M_u = M(^{12}\text{C})/12$, $M_u = N_A m_u$ совпадает с $M_{u0} = 1$ г·моль⁻¹ в действующей СИ; R_∞ – постоянная Ридберга. Значение молярной постоянной Планка известно с $u_r = 4,5 \cdot 10^{-10}$ [13], так что нет потери точности при определении значения N_A с помощью значения h и наоборот. Системы *E*, *C* имеют преимущества при определении килограмма и моля [24], которые ранее не принимались во внимание из-за больших неопределённостей для значений R_K , K_J , приводящих к снижению точности электромагнитных измерений. Система *C* была рассмотрена детально в [20, 22, 25-27]. Эта промежуточная система между системами *B* [6] и *E* [9], она оптимальна по предложенным критериям.

Новые определения килограмма, ампера, кельвина и моля в системе *D*. Каждый вариант набора ОК имеет преимущества и недостатки, которые желательно рассмотреть и обсудить при подготовке решения 26-й ГКМВ. В настоящей работе подробно рассматривается альтернативный набор ОК, применимый для новых определений четырёх единиц СИ. Этот набор (система *D*) состоит из h , μ_0 , k , N_A . Он был впервые предложен Рабочей группой по основным единицам СИ и фундаментальным константам Академии наук в Париже (было предложено фиксировать заряд Планка $q_p = (2e_0 hc)^{1/2}$) [30].

В системе *D* новые определения моля и кельвина основаны на фиксированных значениях N_A и k , также как и в системах *B*, *C* и *E*, килограмма – на фиксированном значении h как в системе *B*,

ампера – на фиксированном значении μ_0 как в действующей СИ. В результате отсутствия фиксированного значения заряда электрона e в системе *D* присутствуют экспериментальные неопределённости для R_K , K_J , однако они очень малы ($\sim 10^{-10}$) и ими можно пренебречь. Для точных электромагнитных измерений необходимо только, чтобы значения R_K , K_J были стабильны и известны с неопределённостями, меньше некоторых предельных. Постоянная тонкой структуры α играет центральную роль при определении неопределённостей значений R_K , K_J . Недавно значение α было подтверждено результатом независимого от квантовой электродинамики прецизионного эксперимента по отдаче атома (измерение $h/m_u(^{87}\text{Rb})$ [28]). Усовершенствования способов определения α будут продолжены, что будет приводить к высокой точности определения постоянных R_K , K_J .

Обратим внимание на преимущество фиксированного значения μ_0 в системе *D*, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/А². Прежде всего, фиксация μ_0 совместима с фиксацией c , которая произошла в 1983 г. Так как диэлектрическая ϵ_0 и магнитная проницаемости μ_0 вакуума подчиняются соотношению $\epsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$, то ϵ_0 тоже фиксировано и равно $8,854187817 \dots \text{Ф} \cdot \text{м}^{-1}$. Приняв во внимание, что $\alpha = e^2/(2\epsilon_0 hc)$, получим $u_r(e^2) = u_r(\alpha)$. Для оценок неопределённостей различных констант в системе *D* заметим, что результаты спектроскопических измерений зависят только от единиц длины и времени. Например, достаточно выразить m_u , e через фиксированные константы h , μ_0 и измеряемые константы α , $A_r(e)$, R_∞ . Фиксированное значение μ_0 предполагает, что вакуумный импеданс Z_0 также фиксирован. Так что можно определить не только R_K путём прямого сравнения с Z_0 с помощью эксперимента с расчётным конденсатором, но также и K_J с помощью ватт-весов, без проверки справедливости формул, связывающих e , h и α . Таким образом, система *D* лучше подходит для обеспечения научного и технологического прогресса.

Порядки определяющих констант и применение критериев выбора к системам *B*, *C*, *D*, *E*. Найдём порядки ОК h , e , k , N_A , m_u , μ_0 , предложенных для переопределения четырёх единиц СИ. Это необходимо для применения критериев выбора ОК. Размерности этих констант по отношению к базовым физическим величинам СИ следующие:

$$[h] = ML^2T^{-1}, [e] = TI, [N_A] = N^{-1}, \\ [k] = ML^2T^{-2}\Theta^{-1}, [m_u] = M, [\mu_0] = LMT^{-2}I^{-2}.$$

Теперь можно вычислить порядки этих констант в соответствии с определением порядка константы:

$$O(h) = 3, O(e) = 2, O(N_A) = 1, O(k) = 4, O(m_u) = 1, O(\mu_0) = 4,$$

где $O(\text{ОК})$ обозначает порядок ОК.

Более того, можно определить порядок системы констант

$$S = \{c_1, c_2, c_3, \dots\}$$

следующим образом:

$$O(S) = \sum O(c_i).$$

Тогда $O(B) = 10$, $O(C) = 8$, $O(D) = 12$, $O(E) = 10$.

В системах *B*, *C*, *D*, *E* используются k , N_A для новых определений единиц температуры и количества вещества, соответственно. Остаётся выбрать две константы для новых определений единиц массы и силы тока. Если непосредственно использовать критерий d , то получим константы m_u , e . В этом

случае должна быть выбрана система C , предложенная в работе [8] и детально рассмотренная для переопределения килограмма, моля, ампера и кельвина в работах [20, 22, 25, 26]. Реализация новых определений должна выполняться с учётом критерия b .

Выше однозначно была выбрана наиболее оптимальная система C для переопределения четырёх основных единиц СИ с помощью рассмотренных ранее критериев. Однако существуют другие критерии, которые могут быть применены для выбора ОК. Например, авторы 9-й редакции Брошюры СИ [4] выбрали систему B , используя тот факт, что система B обладает большими достоинствами для проведения электромагнитных измерений, что является важной причиной выбора констант h , e , k , N_A . В свою очередь другие наборы обладают собственными достоинствами, например система D , основанная на наборе h , μ_0 , k , N_A . Преимуществом этого набора является стабильность значений h , μ_0 , отражающая стабильность свойств вакуума относительно квантовых явлений. В то же время фиксация значений e , m_e отражает стабильность свойств атомных частиц, связанных с массой и электромагнитными полями. Существуют две системы B , C , содержащие e , и две системы D , E , содержащие μ_0 . Известно, что значение e зависит от расстояния взаимодействия или энергии процесса, например, $\alpha^{-1} \sim 137$ при низких энергиях, но $\alpha^{-1} \sim 128$ на масштабе массы Z бозона [28]. С этой точки зрения предпочтительно использовать систему D или E для новых определений четырёх основных единиц СИ.

Заключение. Предложенная новая классификация ОК, основанная на новом понятии *порядка константы* в заданной системе единиц, вместе с приведёнными критериями позволяет выбрать ОК для переопределения единиц СИ. Однако рассмотренные критерии не являются единственно возможными. Существуют другие аргументы относительно свойств нового набора ОК. В данной работе детально рассмотрена альтернативная система констант для переопределения четырёх единиц СИ (система D), которая состоит из h , μ_0 , k , N_A . В этой системе отражена стабильность свойств вакуума, в котором происходят квантовые явления. Это совместимо с фиксацией c в 1983 г. и приводит к фиксации ϵ_0 и импеданса вакуума Z_0 .

Однако система B , которая сейчас рассматривается как наиболее предпочтительная, имеет преимущество для проведения электромагнитных измерений. В этом случае практические единицы Ω_{90} и V_{90} (или в дальнейшем Ω_{2018} и V_{2018}) переходят в единицы МСИ. Тем не менее, заметим, что с принципиальной точки зрения фиксация значения e имеет недостатки в силу изменения α при изменении энергии процесса, а также при возможных пространственно-временных вариациях [29]. К тому же в системах D , C , E можно сохранить практику фиксации значений K_J и R_K для проведения практических электромагнитных измерений при существующей точности измерения e и α и её повышении. Дальнейшее повышение точности измерения α позволит, кроме того, проверять существующие теории и искать новые варианты фундаментальных взаимодействий. Поэтому наилучшим вариантом МСИ является рассмотренная в этой работе система D , несмотря на то, что ККЕ её не выбрал [30].

В 2015 г. была достигнута цель, заключающаяся в получении точных значений постоянных Планка и Авогадро с относительной неопределённостью $u_r = 2 \cdot 10^{-8}$, благодаря результатам экспериментов NMJ, BIPM, PTB, INRIM, NIST и NRC [10–12]. Эта цель была сформулирована в решениях 24-й и 25-й ГКМВ [3]. Теперь следует ожидать принятие новых определений четырёх

основных единиц СИ в 2018 г. [3, 4]. Тем не менее, ещё есть время рассмотреть достоинства и недостатки предложенных определений четырёх единиц с учётом полученных новых теоретических и экспериментальных результатов.

Литература

1. **Girard G.** The third periodic verification of national prototypes of the kilogram // *Metrologia*. 1994. V. 31. P. 317–336.
2. **Nielsen L., Davis R. S., and Barat P.** Improving traceability to the international prototype of the kilogram // *Metrologia*. 2015. V. 52. P. 538–551.
3. **Bureau International des Poids et Mesures** [Официальный сайт] <http://www.bipm.org> (дата обращения: 23.05.2017).
4. **SI Brochure: The International System of Units (SI)** (Draft 9th edition) 2016 [Электронная версия] <http://www.bipm.org/en/measurement-units/new-si/#communication> (дата обращения: 23.05.2017).
5. **Comittee International des Poids et Mesures (CIPM)** 1946 Resolution 2 [Официальный сайт] <http://www.bipm.org/en/CIPM/db/1946/2>
6. **Mills I. M., Mohr P. J., Quinn T. J., Taylor B. N., and Williams E. R.** Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 // *Metrologia*. 2006. V. 43. P. 227–246.
7. **Milton M. J. T., Davis R., Fletcher N.** Towards a new SI: a review of progress made since 2011 // *Metrologia*. 2014. V. 51. P. R21–R30.
8. **Taylor B. N., Mohr P. J.** On the redefinition of the kilogram // *Metrologia*. 1999. V. 36. P. 63–66.
9. **Fletcher N., Davis R. S., Stock M., Milton M. J. T.** Modernizing the SI-implications of recent progress with the fundamental constants [Электронная версия] <https://arxiv.org/abs/1510.08324>
10. **Sanchez C. A., Wood B. M., Green R. G., Liard J. O., and Inglis D.** A determination of Planck's constant using the NRC watt balance // *Metrologia*. 2014. V. 51. P. S5–S14.
11. **Azuma Y., Barat P., Bartl G., Bettin H., Borys M., Busch I., Cibik L., D'Agostino G., Fujii K., Fujimoto H., Hioki A., Krumrey M., Kuetgens U., Kuramoto N., Mana G., Massa E., Meeb R., Mizushima S., Narukawa T., Nicolaus A., Pramann A., Rabb S., Rienitz O., Sasso C., Stock M., Vocke Jr. R. D., Waseda A., Wundrack S., and Zakel S.** Improved measurement results for the Avogadro constant using a ^{28}Si -enriched crystal // *Metrologia*. 2015. V. 52. P. 360–375.
12. **Sanchez C. A., Wood B. M., Green R. G., Liard J. O., and Inglis D.** Corrigendum to the 2014 NRC determination of Planck's constant // *Metrologia*. 2015. V. 52. P. L23–L23.
13. **Mohr P. J., Newell D. B. and Taylor B. N.** CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2014 // *Rev. Mod. Phys.* 2016. V. 88. P. 035009.
14. **Leonard B. P.** Why the Dalton should be redefined exactly in terms of the kilogram // *Metrologia*. 2012. V. 49. P. 487–491.
15. **Duff M. J., Okun L. B., and Veneziano G.** Dialogue on the number of fundamental constants // *JHEP*. 2002. V. 03. No 23. P. 2–30.
16. **Mohr P. J.** Defining units in the quantum based SI // *Metrologia*. 2008. V. 49. P. 487–491.
17. **Melnikov V. N.** Gravitation and cosmology as key problems of the millennium // *A. Einstein Century International Conference. AIP Conf. Proc.*, Paris: 2006. N 861. P. 109–127.

18. **Cabiati F. and Bich W.** Thoughts on a changing SI // Metrologia. 2009. V. 46. P. 457–466.
19. **Бронников К. А., Ивашук В. Д., Калинин М. И., Мельников В. Н., Хрущев В. В.** О выборе фиксируемых фундаментальных констант для новых определений единиц СИ // Измерительная техника. 2016. № 8. С. 11–15.
20. **Бронников К. А., Ивашук В. Д., Калинин М. И., Кононогов С. А., Мельников В. Н., Хрущев В. В.** О новых определениях основных единиц СИ. Почему предпочтителен атомный килограмм // Измерительная техника. 2015. № 2. С. 11–18.
21. **Pavese F.** The New SI and fundamental constants: different meanings assigned to the same data, and how to proceed from recommended numerical values to their stipulation and beyond [Электрон. версия] <https://arxiv.org/abs/1601.00857>
22. **Borde Ch. J.** Reforming the international system of units: on our way to redefine the base units solely from fundamental constants and beyond [Электрон. версия] <https://arxiv.org/abs/1602.01752>
23. **Becker P., de Bièvre P., Fujii K., Glaeser M., Inglis B., Luebbig H., Mana G.** Considerations on future redefinitions of the kilogram, the mole and of other units // Metrologia. 2007. V. 44. P. 1–14.
24. **Stock M. and Witt T.J.** CPEM 2006 round table discussion 'Proposed changes to the SI // Metrologia. 2006. V. 43. P. 583–587.
25. **Milton M. J. T., Williams J. M., Bennett S. J.** Modernizing the SI: towards an improved, accessible and enduring system // Metrologia. 2007. V. 44. P. 356–364.
26. **Ивашук В. Д., Исаев Л. К., Кононогов С. А., Мельников В. Н., Хрущев В. В.** Переопределение моля и результаты измерений постоянной Авогадро методом кристаллических кремниевых шаров // Измерительная техника. 2015. № 7. С. 38–42.
27. **Хрущев В. В.** Об оптимальном наборе фундаментальных физических констант с фиксированными значениями для переопределения единиц СИ // Измерительная техника. 2011. № 10. С. 3–8.
28. **Bouchendira R., Clade P., Guellati-Khelifa S., Nez F., Biraben F.** State of the art in the determination of the fine structure constant: test of Quantum Electrodynamics and determination of h/m_e // Ann. Phys. (Berlin). 2013. V. 525. P. 484–492.
29. **Bronnikov K. A., Kononogov S. A.** Possible variations of the fine structure constant α and their metrological significance // Metrologia. 2006. V. 43. P. R1–R9.
30. **Report of the 18th CCU meeting.** [Офиц. сайт] <http://www.bipm.org/utils/common/pdf/CC/CCU/CCU18.pdf> (дата обращения: 23.05.2017).

Дата принятия: 30.05.2017.