

О выборе фиксируемых фундаментальных констант для новых определений единиц СИ

К. А. БРОННИКОВ^{1, 2}, В. Д. ИВАЩУК^{1, 2}, М. И. КАЛИНИН¹, В. Н. МЕЛЬНИКОВ¹,
В. В. ХРУЩЁВ^{1, 3}

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

² Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

³ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

Обсуждаются различные варианты выбора фиксированных фундаментальных физических констант в связи с планируемым переходом на новые определения четырёх основных единиц СИ (килограмм, моль, ампера и кельвина). Рассмотрены критерии оптимального выбора фундаментальных физических констант для этого перехода. Проанализированы преимущества и недостатки новых определений килограмма, моля, ампера и кельвина на основе различных совокупностей, отобранных из следующих констант: атомной единицы массы, постоянной Авогадро, элементарного электрического заряда, постоянной Больцмана, постоянной Планка и магнитной проницаемости вакуума.

Ключевые слова: переопределение единиц СИ, килограмм, моль, ампер, кельвин, фундаментальные физические константы.

The different variants of the choice of the fundamental physical constants (FPC) to be fixed in connection with the planned transition to new definitions of four base SI units (kilogram, mole, ampere and kelvin) are discussed. The possible criteria for an optimal choice of FPC applicable for that transition are considered. The advantages and shortcomings of new definitions of the kilogram, mole, ampere and Kelvin on the basis of different sets of constant chosen from the following FPC: the atomic mass unit, the Avogadro constant, the elementary electric charge, the Boltzmann constant, the Planck constant and the magnetic constant are analyzed.

Key words: redefinition of the SI units, kilogram, mole, ampere, kelvin, fundamental physical constants.

Фундаментальные физические константы (ФФК) в физических теориях характеризуют свойства устойчивости и сохранения различных видов масштабов для характеристик материальных объектов, процессов, взаимодействий и т. д. Важность ФФК связана с их неизменностью при разных обстоятельствах, по крайней мере, в пределах достижимых в определённый период времени неопределённостей результатов измерений. Для используемых единиц измерений ФФК и их комбинации могут являться естественными масштабами. По мере развития науки физические теории заменяются более общими с соответствующими наборами констант, возникают новые связи между различными константами и происходит изменение их числа. Поэтому необходимо обсуждать не абсолютный выбор каких-либо ФФК, а выбор, соответствующий современному состоянию науки [1, 2].

В настоящее время в качестве основных теорий фундаментальных взаимодействий выступают стандартная модель сильных и электрослабых взаимодействий и общая теория относительности Эйнштейна, которые согласуются с большинством имеющихся экспериментальных данных. В космологии, с её быстро растущим объёмом данных наблюдений и их теоретическим осмыслением, важную роль играют стандартная космологическая модель Λ CDM (пространственно-плоская модель Фридмана с космологической постоянной и холодной тёмной материей), а также её многочисленные модификации и обобщения. Каждая из теорий содержит наборы констант. Дальнейшее развитие физики, вероятно, объединит существующие наборы ФФК в единый набор, однако сейчас трудно предугадать, когда это произойдет.

Единицы измерений физических величин являются частью необходимого инструментария науки и основанных на ней современных технологий, производства и торговли. Как и любые инструменты, они должны соответствовать современ-

ной стадии развития областей человеческой деятельности. Планируемую реформу Международной системы единиц (СИ) можно рассматривать как ответ на возникшее требование [3]. Эта реформа опирается на предложение определить основные единицы СИ посредством фиксации точных значений некоторых ФФК, следуя принципу, уже использованному в 1983 г. для переопределения метра [4, 5]. Одна из причин изменения существующих определений единиц — выявленная временная нестабильность Международного прототипа килограмма (IPK) на уровне $5 \cdot 10^{-10}$ кг в год [6]. Использование точных значений ФФК принципиально важно в метрологии, поэтому предложение было поддержано многими метрологическими организациями [3, 5]. Препятствием к введению новых определений единиц СИ оказалась недостаточная точность экспериментальных значений соответствующих ФФК.

Предложение о переопределении четырёх основных единиц СИ появилось в [7], а окончательный набор вариантов новых определений сформулирован в [4]. В частности, предложено фиксировать с нулевой неопределённостью значения констант h (постоянной Планка), e (элементарного электрического заряда), k (постоянной Больцмана) и N_A (постоянной Авогадро) и на их основе переопределить четыре единицы СИ — килограмм, ампер, кельвин и моль [3—5]. В настоящее время данный набор ФФК рассматривается как наиболее предпочтительный для перехода к новым определениям указанных величин [3].

Цель данной статьи — обсуждение различных наборов фиксируемых ФФК для использования в новых определениях четырёх единиц СИ и критериев оптимального выбора ФФК с учётом последних достижений в измерениях, а также сравнительный анализ новых определений. Авторы надеются, что такое обсуждение будет способствовать более ясному пониманию последствий будущей реформы СИ.

Для перехода к новым определениям единиц массы и количества вещества основными условиями являются достижение относительной стандартной неопределённости $u_r = 2 \cdot 10^{-8}$ значений N_A , h и их согласованность на уровне достоверности 95 % (решение G1 2010 г. Консультативного комитета по массе и связанным с ней величинам [3]). На 25-й Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) принятие новых определений рассматриваемых величин было отложено до 2018 г., так как поставленные условия не были выполнены. В конце 2014 г. — начале 2015 г. появились новые результаты измерений N_A , h в экспериментах с кремниевыми шарами и ватт-весами с $u_r = 2 \cdot 10^{-8}$, что оказало решающее значение для принятия и реализации нового определения килограмма [8—10].

Условием перехода к новому определению кельвина является неопределённость $u_r(k) \leq 1 \cdot 10^{-6}$ для постоянной Больцмана. В 2014 г. в рекомендациях Консультативного комитета по термометрии условия фиксации значения k с нулевой неопределённостью были сформулированы следующим образом: «1. Относительная стандартная неопределённость согласованного CODATA значения k должна быть меньше $1 \cdot 10^{-6}$; 2. Определение k должно основываться, по крайней мере, на двух принципиально различных методах, и по крайней мере один результат для каждого метода должен иметь неопределённость меньше $3 \cdot 10^{-6}$ » [11].

Новое определение ампера предложено ввести на основе фиксированного значения e . Однако окончательная формулировка определения зависит от выбора определения килограмма (точнее, от возможной фиксации h). Кроме того, большое значение имеет проблема так называемого квантового метрологического треугольника [12], решение которой ожидается в ближайшие годы и должно привести к созданию квантового эталона ампера на основе явления одноэлектронного туннелирования [13, 14].

Критерии оптимального выбора фиксированных ФФК для переопределения единиц измерений. На первый взгляд, значение какой-либо физической константы не может быть зафиксировано, так как оно обязательно содержит неопределённость измерений. Однако если неопределённость меньше некоторого предела, зависящего от максимальной точности передачи рассматриваемой единицы, то при новом определении этой единицы измерения можно считать значение соответствующей ФФК фиксированным, если это не противоречит использованию других ФФК с фиксированными значениями. В принципе, статус и значение фиксированной ФФК не являются абсолютными и могут изменяться при обобщении теории и повышении точности измерений.

Главное требование к СИ заключается в том, чтобы в случае реформы для любого пользователя ситуация не ухудшилась по сравнению с существующей. Прежде всего это означает преемственность по отношению к старой СИ, т. е. применение того же набора единиц и их значений в пределах принятой точности, существующей к моменту реформы. Это необходимо, чтобы огромное количество накопленных данных различных измерений сохранилось без дополнительных коррекций [15, 16].

Реформа СИ, очевидно, не должна приводить к использованию новых эталонов единиц, нестабильность которых больше, чем старых. Например, *возможная временная не-*

стабильность новых прототипов килограмма Международного комитета мер и весов (МКМВ) должна быть менее $5 \cdot 10^{-10}$ в год. Это требование должно выполняться для любого нового прототипа килограмма в любое время и в любом месте, так как именно временная нестабильность ИРК стала одной из причин планируемой реформы. Аналогичные требования относятся ко всем основным единицам СИ.

В данной работе не рассматриваются вариации ФФК в космологических масштабах времён и расстояний, связанные с проблемами объединения взаимодействий, тёмной материей и тёмной энергией [17, 18]. Такие вариации, если они есть, слишком малы в настоящее время и не могут повлиять на нестабильность используемых эталонов. Однако они чрезвычайно важны для развития существующих физических теорий [1]. Желательно минимизировать число фиксируемых ФФК и сделать связь между ними и соответствующими единицами измерений максимально простой. В частности, это упростит преподавание основ метрологии в учебных заведениях различного уровня. Простота связи между ФФК и единицей измерения достигается при совпадении их физических размерностей или наиболее простом соотношении между ними. Например, размерности скорости света и метра, ампера и элементарного электрического заряда отличаются только размерностью степени времени. Размерности же килограмма и атомной единицы массы совпадают.

Допустима простота новой СИ и её преемственность со старой подразумевают независимость единиц измерений. Также при переходе к новым определениям не должно быть никаких корректирующих факторов или констант [19]. Таким образом, предложены следующие критерии оптимальности набора фиксируемых ФФК для переопределения единиц СИ: *преемственность* новых определений по отношению к старым; *максимально возможная стабильность* передачи вводимых единиц; *отсутствие* дополнительных корректирующих факторов.

Анализ различных наборов ФФК для переопределения четырёх основных единиц СИ. Переопределение четырёх основных единиц СИ на основе совокупности ФФК предполагается на 26-й ГКМВ в 2018 г. [3, 5]. В настоящее время рассматриваются преимущества и недостатки различных вариантов новых определений указанных величин [19—22]. Основным вариантом считается вариант В с фиксацией с нулевой неопределённостью значений h , e , k , N_A (таблица 1) [4]. Определённая в нём с помощью ватт-весов единица массы называется «электрическим килограммом». На основе последних результатов согласования ФФК методом наименьших квадратов (CODATA-2014 [2]) в [20] рассматривается другой вариант с фиксацией m_u (а.е.м. — атомной единицы массы), μ_0 (магнитной проницаемости вакуума), k , N_A . (Вариант с фиксацией N_A , m_u — «атомного килограмма» — рассмотрен в [7, 15, 16, 19].)

Таблица 1
Наборы фиксированных ФФК

Система	ФФК с точными значениями
A	$m(k), \mu_0, T_{TPW}, M(^{12}\text{C})$
B	h, e, k, N_A
C	m_u, e, k, N_A
D	h, μ_0, k, N_A
E	m_u, μ_0, k, N_A

Проведённый анализ возможных формулировок новых определений единиц СИ [23] основан на данных CODATA-2006, а для предложений 2006 г. использовали данные CODATA-2002 [4]. В данных CODATA-2014 [2] уровень точности значений ФФК значительно выше. Достигнутые результаты и осознание того, что отказ от общепринятых констант Джозефсона K_J и фон Клитцинга R_K 1990 г. изменит точность реализации электрических единиц лишь на уровне 10^{-8} по относительной неопределённости, приводят к новой ситуации по сравнению с 23-й ГКМВ в 2007 г. [24]. По этой причине в [20] (см. табл. 1) рассмотрены возможные варианты СИ с фиксацией определённых ФФК. Например, определения килограмма, ампера, кельвина и моля в действующей СИ можно рассматривать как условие фиксации значений ИРК $m(K)$, магнитной проницаемости вакуума μ_0 , тройной точки воды T_{TPW} и молярной массы ^{12}C $M(^{12}\text{C})$.

Варианты выбора ФФК для определения четырёх единиц СИ обозначены как системы А—Е. Система А — действующая СИ, представленная для сравнения. Система В соответствует варианту СИ, предложенному в [4] и выделенному Резолюцией 1 24-й ГКМВ [3], и приводит к нулевым неопределёностям констант K_J , R_K , используемых в качестве практических квантовых электромагнитных эталонов. Реализация системы В решит сегодняшнюю проблему электрической метрологии, а именно — существование договорных единиц. В момент их принятия в 1990 г. значения R_K , K_J находились в пределах установленных неопределённостей в рамках СИ. В настоящее время ситуация изменилась, поэтому необходимо отменить принятые ранее значения и зафиксировать значения констант R_K , K_J в рамках СИ. Однако даже это необязательно, так как для точных электромагнитных измерений требуется, чтобы значения R_K , K_J были определены с неопределённостями, меньшими известных пределов, и стабильны в обозримом будущем.

Если одновременно принять новые определения единиц СИ согласно системе В, то это приведёт, в первую очередь, к проблеме рассогласования констант и необходимости введения дополнительного корректирующего фактора. Одновременная фиксация h , N_A приводит к жёсткой связи между скоростью света в вакууме c , постоянной молярной массы M_u , относительной атомной массой электрона $A_r(e)$, постоянной тонкой структуры α и постоянной Ридберга R_∞ . Чтобы этого избежать, придётся изменить действующие определения этих констант, например определение M_u . Это явный недостаток новых определений в системе В, так как M_u перейдёт в разряд изменяющихся физических величин $M_u = M_{u0}(1 + \kappa)$, где κ — экспериментально определяемый поправочный коэффициент, значение которого надо будет изменять с появлением новых данных. Тот же недостаток присущ системе D.

Таким образом, «электрический килограмм», при котором вводится новая константа или поправочный коэффициент κ , нарушает введённый выше критерий об отсутствии дополнительных корректирующих факторов, тогда как «атомный килограмм» удовлетворяет ему [19]. В [20] отмечено, что переопределение килограмма с помощью m_u становится предпочтительнее, чем это было 10 лет назад, когда впервые было предложено модифицировать СИ. Каждый из предложенных вариантов имеет достоинства и недостатки, которые желательно рассмотреть и обсудить при подготовке решения 26-й ГКМВ и сделать окончательный выбор одного из вариантов с учётом результатов измерений значе-

ний ФФК, новых данных CODATA, рекомендаций различных теоретических работ и описанных выше критериев.

В [20] найдены неопределённости ФФК для системы Е, где m_u фиксировано при сохранении существующего значения μ_0 . Эта система имеет существенные достоинства с точки зрения определения килограмма и моля, которые ранее отвергались из-за изменяющихся с большими неопределённостями значений R_K , K_J , что отрицательно для электромагнитных измерений. Для оценки неопределённостей ФФК в системе Е можно использовать R_∞ , определяемую по спектроскопическим измерениям, которые зависят только от двух единиц — метра и секунды — и не зависят от рассматриваемых констант. Чтобы найти неопределённости нефиксированных констант в системе Е, надо выразить h , e через фиксированные константы m_u , μ_0 и три измеряемые константы α , $A_r(e)$, R_∞ . Введение новой СИ на основе системы Е представляет экспериментально обоснованный, когерентный и понятный подход.

Система С, в которой единица массы также определяется с помощью m_u наряду с фиксацией e , k , N_A , подробно рассмотрена в [15, 16, 19, 25]. Система С носит промежуточный характер между системами В, Е и, по мнению авторов, является оптимальной по изложенным критериям.

Дополнительным аргументом в пользу фиксации m_u является совпадение размерностей фиксируемой константы и единицы массы, тогда как при выборе в качестве фиксируемой константы h при определении единицы массы связь между размерностями более сложна, и для её объяснения необходимо привлекать квантовую физику. Использование же m_u значительно упрощает объяснение и реализацию нового определения единицы массы. Система С была предложена, в частности, чтобы сохранить точное значение $M_u = M(^{12}\text{C})/12$. В системах В, D M_u становится экспериментально определяемой величиной, что создаёт трудности в образовательном процессе и при точных измерениях молярных масс, тогда как фиксация m_u снимает эту трудность и приводит к фиксированным значениям M_u , N_A и справедливости соотношений $M_u = 1 \text{ г/моль}^{-1}$, $N_A = M_u/m_u$.

Детальный анализ вопросов, связанных с переопределением килограмма в вариантах с фиксированным значением e , проведён в [23, 26, 19]. Выбор h или m_u как определяющей константы не влияет на неопределённость измерения макроскопической массы, так как отношение h/m_u известно с относительной неопределённостью $u_r = 4,5 \cdot 10^{-10}$, пренебрежимо малой по сравнению с u_r в экспериментах с ватт-весами или кремниевыми шарами [5, 8, 9, 10] при реализации килограмма.

В 2002 г. ситуация была другая. Было предложено два аргумента для выбора h вместо N_A для переопределения килограмма [7], которые утратили значение вследствие прогресса в области экспериментальных измерений данных величин [20]. Во-первых, распространённость и точность экспериментов с кремниевыми шарами существенно улучшились, и их доступность повысится в ближайшем будущем [9, 27]. Этот путь реализации килограмма становится так же важен, как и ватт-весы. Во-вторых, уменьшение неопределённости h/m_u означает, что оба рассматриваемых метода могут реализовать килограмм одинаково, независимо от определения, выбранного в любой из систем В—Е [2].

В методе кремниевых шаров килограмм реализуется действительно как единица массы — меры инертности, тогда как ватт-весы реализуют килограмм опосредованно через значение силы в данной точке пространства в данное время, поскольку локальное значение ускорения свободного падения g зависит от места и времени воспроизведения килограмма. Процедура сличения нескольких реализаций кремниевого килограмма может осуществляться теми же методами и средствами, которые используются в настоящее время. Сличение же удалённых друг от друга ватт-весов не представляется возможным из-за указанной нестабильности локального значения g в местах расположения установок в различных национальных метрологических институтах, реализующих килограмм.

Заметим, что существующие неопределённости R_K , K_J достаточно малы, поэтому ими можно пренебречь [20]. Значения $u_r(K_J) = 6,1 \cdot 10^{-9}$; $u_r(R_K) = 2,3 \cdot 10^{-10}$ могут быть включены в бюджет неопределённостей даже для наилучших первичных эталонов без всяких последствий [2].

Постоянная α важна при оценке неопределённостей значений R_K , K_J . Между CODATA-2006 и CODATA-2010 неопределённости значения α изменялись в 6,5 раз (относительный сдвиг равен $4,4 \cdot 10^{-9}$) [20]. Сейчас достоверность экспериментального определения α резко возросла, так как найдена погрешность теоретического значения аномалии электронного магнитного момента a_e , которое теперь не основывается на единственном вычислении [20]. Значение α , выведенное с использованием a_e , также подтверждено полностью независимым способом атомного эксперимента с отдачей (например, измерение h/m (^{87}Rb) [28]). Достоверность измеренного значения α , подтверждённая в CODATA-2014 [2], является ключом к принятию системы Е или С. Заметим, что α будет и дальше уточняться в результате активных экспериментальных и теоретических исследований, что приведёт к ещё меньшим неопределённостям R_K , K_J . После переопределения система Е (или С) будет только улучшаться.

В системе Е предполагается сохранение имеющегося значения $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$. Обсуждение системы В привело к тому, что если μ_0 будет иметь экспериментальное значение [4], причем с такой же неопределённостью, как у α , и пренебрежимо малой для любых известных приложений, то это не создаст дополнительных проблем. Однако имеются аргументы в пользу сохранения существующего фиксированного значения μ_0 [20]. В модифицированной СИ, основанной на системе В, эта постоянная изменится в соответствии с экспериментальными значениями и неопределённостями. Запишем новую зависимость $\mu_0 = 4\pi(1 + \delta) \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$, где $\delta = (\alpha/\alpha_{2018} - 1)$, α_{2018} — точнейшее экспериментальное значение α к моменту переопределения. Неопределённость δ такая же, как и относительная неопределённость α , при условии, что значение α_{2018} взято как точное и неизменное. Если $\alpha = \alpha_{2018}$, то $\delta = 0$; в общем случае $|\delta| < 2u_r(\alpha)$ с достоверностью 95 %. При введении μ_0 в учебниках электродинамики будет трудно объяснить фактор $(1 + \delta)$ без обсуждения используемой СИ на высоком уровне. Данная проблема аналогична проблеме с M_u и поправкой k для молярных величин. Отличие заключается в малости величины δ по сравнению с k .

Отметим, что отклонения μ_0 , M_u от точных значений $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$ и 1 г/моль будут достаточно малы, и их можно было бы игнорировать на практике [4]. Однако принятые

сейчас точные значения не будут применимы в новой СИ, основанной на системе В, что будет непросто объяснить в образовательном процессе. Это несовместимо с требованием 24-й ГКМВ новые формулировки определений единиц «упростить для понимания пользователей, следуя при этом принципам научной строгости и ясности изложения». К тому же экспериментальное значение μ_0 будет сильно отличаться новую СИ от систем, которые с успехом используются в теоретической физике. Система Е переводит эти проблемы в проблемы, связанные со значениями R_K , K_J , введёнными только для пользователей электрических единиц высокого уровня. Таким пользователям легче понять сложности, связанные с сохранением когерентности СИ.

Заключение. В настоящее время изменилась оценка аргументов, использованных при принятии предложений по переопределению единиц СИ в 2005—2006 гг., так как новые результаты измерений постоянных Планка и Авогадро и результаты согласования значений ФФК, представленные CODATA-2014, оказывают существенное влияние на выбор возможных формулировок основных единиц СИ. Около 10 лет назад была поставлена цель — получить с требуемой точностью согласованные значения постоянных Авогадро и Планка, которая была достигнута только в 2015 г. В это время были измерены с относительной неопределённостью $u_r = 2 \cdot 10^{-8}$ постоянная Авогадро методом кремниевых шаров и постоянная Планка методом ватт-весов в экспериментах, проведённых NMIJ, BIPM, PTB, INRIM, NIST и NRC. Тогда же с неопределённостью $1 \cdot 10^{-6}$ было измерено значение постоянной Больцмана в экспериментах NPL, LNE, INRIM. Полученные результаты позволяют принять новые определения килограмма, моля, а также ампера и кельвина, на следующей 26 ГКМВ в 2018 г. В настоящее время ещё можно рассмотреть и проанализировать достоинства и недостатки различных предлагаемых определений единиц СИ с учётом выполнения необходимых критериев введения новой СИ на основе точных фиксированных значений определяющих констант.

Предложенным в статье критериям удовлетворяют масса атома углерода-12, постоянная Авогадро, элементарный электрический заряд и постоянная Больцмана. Хотя определения всех четырёх обсуждаемых единиц (килограмма, ампера, кельвина и моля) формально независимы, можно сохранить ту же связь между определениями моля и килограмма, что и в действующей СИ. При этом не важно, будет ли килограмм реализовываться с требуемой неопределённостью с помощью ватт-весов или кремниевых шаров. В этом варианте определение ампера непосредственно привязано к величине элементарного заряда и будущему квантовому эталону силы тока. Понимание смысла постоянной Больцмана как переводного коэффициента между «энергетической» и термодинамической температурными шкалами позволяет утверждать, что значение величины k можно зафиксировать с нулевой неопределённостью для нового определения кельвина в СИ, причём независимо от фиксации других констант. Точность, с которой сейчас измеряют величину k , гарантирует преемственность нового определения кельвина по отношению к предыдущему и сохранение всего массива теплофизических данных для различных веществ во всех температурных диапазонах.

Литература

1. **Melnikov V. N.** Gravitation and cosmology as key problems of the millennium // A. Einstein Century International Conference. AIP Conference Proceedings, Paris: 2006. N. 861. P. 109—126.
2. **Mohr P. J., Newell D. B., Taylor B. N.** CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2014 // arXiv:1507.07956v1—2015.
3. **Bureau International des Poids et Mesures.** [Официальный сайт] <http://www.bipm.org> (дата обращения: 01.05.2016)
4. **Mills I. M.** Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005) // Metrologia. 2006. V. 43. N. 3. P. 227—246.
5. **Milton M. J. T., Davis R., Fletcher N.** Towards a new SI: a review of progress made since 2011 // Metrologia. 2014. V. 51. N. 3. P. R21—R30.
6. **Girard G.** The third periodic verification of national prototypes of the kilogram // Metrologia. 1994. V. 31. P. 317—336.
7. **Taylor B. N., Mohr P. J.** On the redefinition of the kilogram // Metrologia. 1999. V. 36. P. 63—66.
8. **Sanchez C. A.** A determination of Planck's constant using the NRC watt balance // Metrologia. 2014. V. 51. N. 2. P. S5—S14.
9. **Azuma Y.** Improved measurement results for the Avogadro constant using a ^{28}Si -enriched crystal // Metrologia. 2015. V. 52. P. 360—375.
10. **Sanchez C. A.** Corrigendum to the 2014 NRC determination of Planck's constant // Metrologia. 2015. V. 52. N. 4. P. L23.
11. **Recommendations** of the Consultative Committee for Thermometry submitted to the International Committee for Weights and Measures [Электронный ресурс] http://www.bipm.org/cc/CCT/Allowed/Summary_reports/RECOMMENDATION_web_version.pdf (дата обращения: 01.05.2016)
12. **Gallop J.** The quantum electrical triangle // Phil. Trans. Roy. Soc. A. 2005. V. 363. P. 2221—2247.
13. **Tuomo Tantt.** Three-waveform bidirectional pumping of single electrons with a silicon quantum dot // ArXiv: 1603.01225.
14. **Quantum** ampere: Realisation of the new SI ampere — <https://www.ptb.de/emrp/868.html>
15. **Исаев Л. К., Кононогов С. А., Хрущев В. В.** О переопределении четырёх основных единиц СИ // Измерительная техника. 2013. № 2. С. 3—8.
16. **Хрущев В. В.** Об оптимальном наборе фундаментальных физических констант с фиксированными значениями для переопределения единиц СИ // Измерительная техника. 2011. № 10. С. 3—8.
17. **Бронников К. А., Кононогов С. А., Мельников В. Н.** Вариации постоянной тонкой структуры и многомерная гравитация // Измерительная техника. 2013. № 1. С. 7—13.
18. **Бронников К. А., Кононогов С. А., Мельников В. Н.** Вариации гравитационной постоянной G в обобщённых теориях гравитации // Измерительная техника. 2014. № 11. С. 22—26.
19. **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.
20. **Fletcher N., Davis R. S., Stock M., Milton M. J. T.** Modernizing the SI-implications of recent progress with the fundamental constants // arXiv. 2015. 1510.08324. P. 1—12.
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 // arXiv. 2016. 1601.00857. V. 2. P. 1—13.
22. **Borde Ch. J.** Reforming the international system of units: on our way to redefine the base units solely from fundamental constants and beyond // arXiv. 2016. 1602.01752. P. 1—29.
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. **Fletcher N., Rietveld G., Olthoff J., Budovsky I., Milton M.** Electrical Units in the New SI: Saying Goodbye to the 1990 Values // NCSLI Measure J. Meas. Sci. 2014. V. 9. P. 30—35.
25. **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—43.
26. **Gläser M.** Redefinition of the kilogram and the impact on its future dissemination // Metrologia. 2010. V. 47. P. 419—428.
27. **Bettin H., Fujii K., Man J., Mana G., Massa E., Picard A.** Accurate measurements of the Avogadro and Planck constants by counting silicon atoms // Ann. Phys. (Berlin). 2013. V. 525. P. 680—687.
28. **Bouchendira J.** 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.

Дата принятия: 14.04.2016.

