

«Эталон на столе» – новая реальность в условиях глобальной трансформации Международной системы единиц

А. А. Чернышенко

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии
им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия

vacuum@vniim.ru

Аннотация. Рассматриваются вопросы, связанные с новыми подходами при определении основных единиц измерения физических величин, таких, как единица массы – килограмм. Они обоснованы глобальными трансформациями международной системы метрологического обеспечения. В первой части автор показывает в исторической ретроспективе, какие тенденции и стратегии доминировали в этой сфере человеческой деятельности. Анализируются причины и основания, обусловившие пересмотр Международной системы единиц и переопределение ряда основных единиц – килограмма, кельвина, ампера и др. Формулируются трудные вопросы, связанные с тем, что основные единицы СИ сегодня стали определяться через фиксированные значения фундаментальных физических постоянных. Во второй части анализируются перспективы исследования системы метрологического обеспечения РФ в области измерений массы с целью выбора наиболее прогрессивного вектора ее дальнейшего развития в рамках переопределения основных единиц СИ. Автор предлагает свое видение будущей системы метрологического обеспечения в области измерений массы. Особый акцент ставится на идее создания так называемого эталона на столе взамен первичного эталона килограмма. Показаны основные этапы теоретических и практических научно-исследовательских работ, проведенных в этом направлении, в том числе и в ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». Подчеркивается, что в научном сообществе Российской Федерации существуют колоссальный эвристический потенциал и солидная материальная база, которые позволяют ожидать новейших прогрессивных подходов и решений в области метрологического обеспечения.

Ключевые слова: Международная система единиц, первичный эталон килограмма, система метрологического обеспечения, фундаментальные физические константы, вакуумная система ватт-весов, эталон на столе

Для цитирования: Чернышенко А. А. «Эталон на столе» – новая реальность в условиях глобальной трансформации Международной системы единиц // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 2. С. 5–22. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-2-5-22.

Original article

«Standard on the table» – a new reality in the context of global transformations of the International system of units

A. A. Chernyshenko

D. I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM), Saint Petersburg, Russia

vacuum@vniim.ru

Abstract. The paper discusses issues related to new approaches in determining the basic units of the SI system, such as the unit of mass – kilogram. They are justified by global transformations of the International System of metrological support. In the first part of the article, the author shows in historical retrospect the trends

and strategies dominated in this sphere of human activity. The reasons and grounds that led to the revision of the International System of Units and the redefinition of a number of basic units, such as the kilogram, Kelvin, Ampere, are analyzed. Difficult questions are formulated concerning the fact that the basic SI units today have become defined through fixed values of fundamental physical constants. In the second part, the prospects for the study of metrological support system of the Russian Federation in the field of mass measurements are analyzed in order to select the most progressive vector of its further development within the redefinition of the basic SI units. The author offers his vision of the future metrological support system in the mass measurements. Special emphasis is placed on the idea of creating a so-called «Standard on the table» to replace the primary standard of the kilogram. The article shows the main stages of theoretical and practical research work carried out in this direction, including in the D. I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM). It is emphasized that in the scientific community of the Russian Federation there is a colossal heuristic potential and a solid material base to expect new progressive approaches and solutions in the field of metrological support.

Keywords: International System of Units, International prototype of the kilogram, metrological support system, fundamental physical constants, vacuum system of Watt-scales, Standard on the table

For citation: Chernyshenko A. A. «Standard on the table» – a new reality in the context of global transformations of the International System of Units // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 2. P. 5–22. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-2-5–22.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Часть первая. Взгляд в историю вопроса.

Когда говорят о метрологии, то вспоминаются слова Уильяма Томсона (Кельвина), которые часто цитируются сокращенно: ‘If you cannot measure it, then it is not science’ (Если вы не можете это измерить, то это не наука). В развернутом виде цитата выглядит так: «Когда вы можете измерить то, о чем говорите, и выразить это в цифрах, вы что-то знаете об этом; но когда вы не можете измерить это, когда вы не можете выразить это в цифрах, ваши знания скудны и неудовлетворительны: это может быть началом знания, но вы едва ли в своих мыслях продвинулись до стадии науки, в чем бы ни заключался вопрос»¹. Зачастую авторство этих слов приписывают Д. И. Менделееву, который хотя и был младше своего британского коллеги на десять лет, но, скорее всего, был хорошо с ним знаком. Об этом свидетельствует и групповое фото, где среди участников 52-го съезда Британской ассоциации содействия развитию наук (Манчестер, 1887) У. Томсон и Д. И. Менделеев стоят рядом².

Необходимость измерять неизбежно выводит на вопросы о том, с чем следует соотносить измеряемый объект, что считать «мерой измерения». Иначе говоря, мы выходим на понятие эталона, некоего идеального образца, который будет служить единицей измерения. Казалось бы, нет ничего проще, как договориться о такой единице измерения, исходя из утилитарных задач, которые

в нем нуждаются. Но, как показывает история развития измерительных систем, эталон в физическом смысле, как и идеал в философском, и определяется, и обеспечивается весьма непросто. Вот как об этом написано в словарной статье знаменитого словаря Брокгауза и Эфрона: «Эталонами называют образцы мер, содержащие возможно точно определенное число единиц той меры, образцом которой должен служить эталон. ... Эти эталоны раз и навсегда измеряются с большой точностью в абсолютной мере; копируя их, создают другие эталоны, а сравнивая с ними однородные, подлежащие измерению величины, определяют и последние в абсолютной мере. ... Наиболее важным свойством всякого эталона является его возможная *неизменяемость* от времени и окружающих условий. Поэтому при конструкции эталонов их стараются построить из материалов, по возможности мало подвергающихся изнашиванию, стараются придать им формы, гарантирующие наибольшую сохранность их и наименьшее влияние на них окружающих условий. Кроме того, если влияние внешних условий (например, температуры) неизбежно, то старательно изучают это влияние, так чтобы известно было, какой абсолютной величиной обладает данный эталон при всякой возможной комбинации внешних условий. ... Абсолютное измерение эталонов и сравнение их друг с другом представляет столь сложную задачу, что она иногда не по силам не только отдельным наблюдателям, но и прекрасно обставленным лабораториями. Ввиду

¹ Цит. по: [1], перевод наш – А. Ч.

² Фото хранится в Музее-архиве Д. И. Менделеева (СПбГУ).

этого все работы этого рода стараются в последнее время сосредоточить в особых правительственных, специально к тому приспособленных учреждениях. Первым таким учреждением стало Bureau des Poids et Mesures в Севре близ Парижа; в Германии аналогичным учреждением является Physikalisch-Technische Reichsanstalt в Шарлоттенбурге близ Берлина, в России – Главная палата мер и весов в Санкт-Петербурге» [2].

Эту сложность и неоднозначность в развитии системы мер и весов подчеркивают все историки науки, которые зачастую начинают исчисление метрологической истории с библейских времен (см., например [3], [4]). Здесь мы даже встретим такое понятие, как «библейская метрология», которое использовал Дмитрий Иванович Прозоровский в своих исторических обзорах по истории становления систем измерения [5], [6]. Вообще, в российской традиции фундаментальные исторические работы о системе мер и их значении для жизни человека появляются в первой половине XIX в. Из ранних авторов кроме Прозоровского следует указать таких, как Ф. И. Петрушевский [7], [8], П. И. Рейнбот [9], Ю. Ф. Виппер [10], С. К. Кузнецов [11]. Говоря о начале сугубо российской традиции, сошлемся еще раз на Прозоровского, который писал: «История не знает другого Русского веса, кроме „законного“, т. е. „указного“. В договорах Олега (912) и Игоря (945) с греками в литры переложено количество серебра, установленное за известное действие „по закону Русскому“ ... впоследствии изложенному письменно (в Русской Правде). В 996 г. св. Владимир, поручая заведывание весами Духовенству, повелел: “Пискупу блюсти без пакости, ни умалити, ни умножити, за все то дати ему слово в день суда великого, яко же о душах человеческих”» [6, с. 125]. Прозоровский подчеркивал, что «Русские ни сами не изобретали веса, ни заняли его от инуду; в первом не было надобности, ибо вес уже существует повсюду и Русские знали его; второго не позволяли сделать благоразумие и чувство независимости, отличительное качество Русского духа, который или решительно отвергает чуждое, или, заимствуя оное, переделывает на свой лад: середины нет. Так именно и поступили наши предки в отношении к весу. Иностранцами весами они воспользовались как образцами, по коим учредили свой особенный независимый вес, делением и содержанием не похожий на образцы» [6, с. 125]. Известно, что в XVI в. «вес решительно сделался казенным», образцы, утвержденные

правительством, рассылались по городам и поверялись время от времени. В Пскове для наблюдения за весом было создано (1665) особое учреждение, а в Оружейной палате Московского Кремля хранится серебряный образец фунта и вески с именем царя Михаила Федоровича.

Ну, а после революции 1917 г. в молодом советском государстве метрологические службы становятся делом чрезвычайной государственной важности. Под патронажем НКВД СССР и совнаркома регулярно издаются журналы «Метрология и поверочное дело» и «Измерительная техника» [12], [13]. В этом нет ничего необычного, как пишет Прозоровский, «во все продолжение нашей истории правительство понимало важность веса и никогда не исключало его от своего влияния. Если в древнем весе замечается иногда неопределенность, то это происходило не от невнимания правительства, а от неразвития управления и простоты обычаев» [6, с. 127]. Вместе с тем, с начала XX в. метрология активно и широко входит в повседневность людей, и появляется необходимость в составлении удобных руководств и справочников для них (см., например [14], [15]).

Понимание и развитие систем физических измерений, от ранних элементарных до сложных современных, обсуждаются в научном сообществе. Очевидно, что в формате статьи нет возможности привести всю библиографию; приведенными примерами мы лишь показываем полифонию проблемного поля в данной отрасли научного знания. Назовем лишь несколько имен и работ: Э. Николсон [16], А. Е. Берриман [17]; Б. Д. Эллис [18]; Б. Кисч [19]; К. Эллис [20]; Х. А. Кляйн [21]; О. Бишоп [22]; О. А. У. Дилк [23]; В. Кула [24]; Р. Е. Зупко [25], [26]; М. Басьере, Е. Гайгнебет [27]. Полезная справочная информация в словарной или табличной форме систематизируется в книгах С. Дреснер [28]; Дж. Л. Фейер [29]; Х. Дж. Джеррард, Д. Б. Макнейл [30]; Дж. В. Дразил [31].

Современный британский физик и философ Р. П. Криз, говоря о традиции исторического анализа в области метрологии, в своей книге подчеркивает, что метрология всегда имела огромное значение для социальной жизни. И сегодня «миллионы транзакций каждый день зависят от надежной сети мер и весов». Криз строит ретроспективный взгляд на то, как непросто было создать такую сеть, как развивалась эта международная система: от связи между музыкальным тоном и расстоянием в династиях Древнего Китая и использованием статуэток для измерения золота

в Западной Африке до создания французской метрической и британской имперской систем. Криз предлагает читателям одно из величайших философских и научных приключений в истории [32].

Метрологическая революция. Очевидно, что система измерений и единицы измерений вошли в повседневную жизнь человека уже в раннюю историю человечества и на протяжении всей истории постоянно развивались и внедрялись в самые широкие сферы человеческой деятельности. Однако процессы, которые мы наблюдаем здесь сегодня, носят поистине революционный характер. С одной стороны, в эту эпоху быстрых технологических изменений растет запрос на темпы развития науки и технологий для их эффективной адаптации на благо общества и массового потребителя. С другой, мы все более зависим от технологий для комфорта, удобства и безопасности. Двадцатый век остро поставил эти тревожные вопросы, которые становятся делом государственной важности для современных обществ. В ежегодном докладе Национального бюро стандартизации США (National Bureau of Standards U.S.) подчеркивалось, что большинство приборов и машин, которые покупает человек, становятся все сложнее. Их качество и надежность не такие, какими они могли бы быть, услуги по ремонту дороги и медленны. Рынок услуг стремительно меняется, между производителем, продавцом и потребителем огромные размеры дистанции. Даже еда расфасована так, чтобы мы не могли прикоснуться к ней, понюхать или попробовать ее, прежде чем забрать домой. Но реальность времени такова, что к более простому рынку мы не вернемся: сегодняшние супермаркеты и массовые торговые точки существуют потому, что они являются наиболее эффективными системами для вывода продуктов массового производства на рынок со многими миллионами потребителей. И мы вряд ли вернемся к более простым продуктам. Таким образом возникает зависимость человека от встроенной безопасности и надежности продуктов, которые он покупает. Если мы не научимся контролировать нежелательные побочные эффекты технологий, то разрушим не только наше наследие чистого воздуха и воды, в которое мы можем вмешиваться, но и системы жизнеобеспечения, от которых зависит само наше существование [33, с. 6].

Перед национальными измерительными лабораториями встает задача не только обеспечить эту самую безопасность, но и сделать систему

стандартизации доступной массовому потребителю. Осознание формулируется еще в 1970-е гг. Например, в годовом отчете американского Бюро стандартизации читаем: «Мы движемся в двух направлениях, во-первых, чтобы повысить точность измерений, а во-вторых, чтобы сделать улучшенные стандарты и методы измерения доступными для тех, кто в них нуждается» [33, с. 7]. На самом деле это исследование имеет важное значение для постоянного улучшения продуктов и услуг: современные коммуникационные компьютеры и системы для обработки данных и управления процессами, медицинские технологии, высокоточные производственные процессы нуждаются в усовершенствовании программ мер и весов, в разработке улучшенных эталонов измерений. Необходимо, чтобы усовершенствованные технологии измерения работали и на промышленность, и на потребителей.

Вызовы для метрологов. Сегодня в системе метрологического обеспечения в целом происходят изменения, связанные с переопределением основных единиц СИ – метра, килограмма и др. (см., например [34]–[37]). Новые определения основных единиц теперь опираются на основные фундаментальные константы. Это, в свою очередь, означает, что эталоны и средства измерений, определяемые подобным образом, становятся предпочтительными, а на языке метрологов – первичными, в том числе и эталоны производных единиц системы СИ, таких, как эталоны в области измерений давлений. «СИ не является статичной, она отслеживает прогресс в области метрологии, поэтому некоторые решения были отменены или изменены; другие были уточнены добавлениями» [38, с. 48]. Произошедшая трансформация Международной системы единиц ставит ряд вопросов перед международным метрологическим сообществом: «А что изменится для метрологов, работающих на местах?», «Что будет с производными единицами – давлением, силой и другими?», и т. д. И, конечно, важны и анализ изменений, которые возможны в ближайшей перспективе в области измерения давлений, и учет их для выбора направлений развития в данной области измерений. С целью поиска ответов на эти вопросы во ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» были проведены исследования процессов и перемен, происходящих в области измерения давлений и вакуума. Некоторые размышления на эту тему, направленные на изучение составов пер-

вичных эталонов ведущих и передовых стран в области измерения давлений и вакуума – США, Германии и др. – были представлены на 26-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технологии-2019» [39]. Сопоставление результатов международных сличений в области измерений абсолютных давлений и вакуума, а также метрологических характеристик лучших эталонов в данной области измерения позволяет выделить основные дефициты комплекса первичных эталонов Российской Федерации в области абсолютных давлений и вакуума и оценить степень критичности технического и метрологического отставания от лучших мировых эталонов.

Точно так же, как первоначальная концепция метрической системы выросла из проблем, с которыми ученые сталкивались при работе со средневековой системой, так и новая система выросла из проблем, с которыми столкнулось широкое научное сообщество при распространении подсистем, импровизированных для обслуживания конкретных дисциплин. Стало очевидно, что первоначальные стандарты XVIII в. не были точны в той степени, в какой этого требовали научные достижения XX в.; требовались новые определения. После длительных дискуссий на 11-й Генеральной конференции по мерам и весам (General Conference on Weights and Measures), собравшейся в Париже в октябре 1960 г., научное сообщество сформулировало новую Международную систему единиц (сокращенно СИ). В дальнейшем последующими созывами конференции в СИ вносились поправки. Были приняты и определены ряд базовых единиц. Как сказано в брошюре Международного бюро мер и весов (Bureau international des poids et mesures, BIPM): «С момента своего создания в 1960 г. резолюцией, принятой Генеральной конференцией мер и весов (CGPM) на ее 11-м заседании, Международная система единиц (СИ) используется во всем мире в качестве предпочтительной системы единиц и в качестве основного языка науки, техники, промышленности и торговли». Эта брошюра по СИ опубликована Международным бюро мер и весов для объяснения и продвижения СИ³. В ней собраны наиболее важные резолюции CGPM и решения Международного комитета по мерам и весам (CIPM), касающиеся метрической системы, с мо-

мента первого заседания CGPM в 1889 г. СИ всегда была удобной и динамичной системой, которая развивалась для использования новейших достижений науки и техники. В частности, огромный прогресс, достигнутый за последние 50 лет в области атомной физики и квантовой метрологии, позволил пересмотреть определения секунды и метра и скорректировать практическое представление электрических единиц, чтобы использовать преимущества атомных и квантовых явлений для достижения при создании этих единиц уровней точности, которые ограничены только нашими техническими способностями, а не самими определениями. Эти научные достижения, а также развитие технологий измерения привели к изменениям в СИ, которые были описаны в предыдущих изданиях этой брошюры. 9-е издание брошюры по СИ было подготовлено после того, как CGPM на своем 26-м заседании принял ряд глубоких изменений. CGPM принял новый способ формулирования определений единиц в целом и определений семи базовых единиц в частности, установив числовое значение семи констант, определяющих СИ. Среди этих констант есть фундаментальные константы природы – например, постоянная Планка и скорость света, – таким образом, определения берут за основу и представляют наше современное понимание законов физики. Впервые у нас есть полный набор определений, ни одно из которых не относится к физическим стандартам, свойствам материала или описаниям измерения. Изменения, внесенные в СИ, позволяют реализовать набор единиц на уровне точности, который в конечном итоге ограничен только квантовой структурой природы и нашими техническими способностями, но не самими определениями. Любое действительное уравнение физики, связывающее константы, определяющие СИ, с единицей измерения, может быть использовано для достижения рассматриваемой единицы измерения, что открывает новые возможности для инноваций, поскольку единица измерения достижима в любом месте с растущим уровнем точности по мере развития технологий. Таким образом, этот пересмотр СИ есть фундаментальное историческое достижение. Пересмотр СИ был принят CGPM в ноябре 2018 г. [40], а новые определения, как следует из текста, должны были вступить в силу с 20 мая 2019 г., годовщины подписания Конвенции об измерениях, отмечаемой как Всемирный день метрологии.

³ См.: [38], здесь и далее перевод наш – А. Ч.

В своей книге «От артефакта к атому» физик Терри Квин так написал о событии, когда BIPM осуществляло «величайшее изменение в мировой системе мер и весов – оно пересматривает килограмм, окончательный стандарт артефакта (the final artefact standard), и реорганизует систему международных единиц»⁴. Терри Квин в 1988–2003 гг. был директором Международного бюро мер и весов и хорошо знал, как он пишет, внутреннюю историю того, что привело к этим изменениям, начиная с событий, связанных с основанием BIPM в 1875 г., – вехи в истории международного сотрудничества, и до настоящего времени. Международное бюро мер и весов было первой международной научной лабораторией, базовыми задачами которой были сохранение новых международных стандартов метра и килограмма, проведение калибровок для государств-членов и проведение исследований для развития науки измерений. Основанная в 1875 г. для ответственности за сохранение прототипов артефактов, Метрическая конвенция теперь находится в центре мировой метрологии и готовится к переопределению последнего оставшегося артефакта, килограмма, в терминах фиксированной величины для одной из фундаментальных констант физики, постоянной Планка.

Часть вторая. Материальные эталоны и константы: новые отношения. Хотя эти определения отвечают многим требованиям универсальности и доступности и могут быть реализованы различными способами, они, тем не менее, ограничивают практические достижения опытом, прямо или косвенно связанным с конкретными условиями или состояниями, указанными в определениях. Поэтому точность применения таких определений на практике никогда не может быть лучше, чем точность реализации конкретных условий или состояний, указанных в определениях.

В настоящем пересмотре СИ, основанном на наборе выбранных констант вместо того, чтобы каждое определение указывало на определенное условие или состояние, что накладывало фундаментальное ограничение на достижимую точность, может использоваться любое соответствующее уравнение физики, связывающее конкретную константу (константы) с измеряемой величиной. Таким образом, основные единицы определяются в гораздо более общем виде, без ограничений, налагаемых современной наукой или технологиями, поскольку грядущий прогресс

может привести к открытию неизвестных на сегодня физических уравнений, которые позволят реализовать единицы различными способами, на гораздо более высоком уровне точности. При такой системе единиц в принципе не существует предела неопределенности, при которой единица может быть реализована. Исключением остается определение времени, для которого значение частоты перехода сверхтонкого расщепления невозмущенного основного состояния атома цезия-133 на данный момент используется в качестве основного определения.

Разница между «определить с явной единицей» и «определить явное при помощи константы» можно наглядно проиллюстрировать с помощью двух определений Кельвина. Первоначальное определение единицы температуры – градуса Кельвина, основанное на фиксированном числовом значении температуры тройной точки воды, требует в конце измерений сравнить полученную температуру с температурой тройной точки воды. Новое определение, основанное на фиксированном числовом значении постоянной Больцмана, является гораздо более общим в том смысле, что любое термодинамическое уравнение, содержащее постоянную Больцмана, в принципе может быть использовано для определения термодинамической температуры в любой точке температурной шкалы.

Что касается килограмма, единицы, определение которой самым фундаментальным образом изменилось, то его воспроизведение или измерение может быть выполнено из любого уравнения физики, связывающего массу, постоянную Планка, скорость света и время. Различные методы, иллюстрирующие общий характер новых способов определения единиц, содержатся на веб-сайте BIPM [38].

Можно сказать, что фундаментальное переопределение основных единиц началось в 1983 г., когда на XVIII Генеральной конференции по мерам и весам было принято новое определение метра, которое действует по настоящее время. Основной постулат, который позволил это сделать – это постулат постоянства скорости света $c = 299\,792\,458$ м/с. По этому определению единица длины – метр – представляет собой расстояние, проходимое светом за $1/299\,792\,458$ с. Таким образом, эталон единицы длины – метра – стал первым эталоном, опирающимся на фундаментальную константу – скорость света.

⁴ [41], перевод наш – А. Ч.

«Эталон на столе». Именно это переопределение положило начало ухода от материальных эталонов, которые использовались в качестве первичных эталонов основных единиц – метра, килограмма и др. На мой взгляд, это дает возможность сформулировать принципиально новый подход в создании эталонов, который я назову: «эталон на столе». Для этого подхода можно сформулировать такие принципы построения системы единиц:

1. Принцип отказа от использования материальных эталонов, поскольку они подвержены деформациям и старению.

2. Принцип первичности законов природы, когда в основе любой единицы измерения должны лежать исключительно законы природы.

3. Принцип единообразия, когда не требуется различие между основными (выбранными из соображений удобства по соглашению при построении системы единиц) и производными единицами (производные единицы можно определить через основные), поскольку и те, и другие могут быть получены непосредственно из определяющих (фундаментальных) констант.

Понимание концепции «эталон на столе» выражается в нескольких положительных и уникальных свойствах:

1. Любое физическое или юридическое лицо, зная законы физики и имея справочное пособие по определяющим физическим константам, может не только измерить интересующую его величину, но и воссоздав эталон на своем столе, воспроизвести ее.

2. Принцип «эталон на столе» означает не только доступность воспроизведения единицы физической величины, но и такие свойства эталона, как компактность и транспортируемость.

Стремление научного сообщества построить удобный и компактный эталон, который я называю «эталон на столе», выражается в попытках создания новейших эталонов не только основных единиц, но и производных, которые бы опирались на определяющие (фундаментальные) константы. Так, в [39], [42]–[46] он определяется принятием фиксированного числового значения постоянной Планка h равным $6.62607015 \cdot 10^{-34}$ при выражении в единице джоуль-секунда (иначе – килограмм-метр квадратный на секунду, где метр и секунда определяются через c и $\Delta\nu_{Cs}$).

Здесь уместно также привести и современное определение единицы времени (секунда) [47].

Она определяется путем принятия фиксированного числового значения частоты перехода сверхтонкого расщепления невозмущенного основного состояния атома цезия-133 $\Delta\nu_{Cs}$ равным $9\,192\,631\,770$ при выражении в единице «герц», что соответствует секунде в минус первой степени.

Учитывая приведенные определения времени и килограмма, рассмотрим возможность воспроизведения килограмма. Так, исходя из релятивистской теории Эйнштейна, можно записать выражение взаимосвязи массы и энергии:

$$E = mc^2, \quad (1)$$

где m – масса частицы, например фотона; c – скорость света в вакууме.

С другой стороны, исходя из квантовой теории света, можно записать другое уравнение энергии, при переходе из одного энергетического состояния атома (молекулы) в другое:

$$E = h\nu, \quad (2)$$

где h – постоянная Планка; ν – частота излучения при переходе из одного энергетического состояния в другое.

Выразим массу из (1) и (2):

$$m = \frac{h\nu}{c^2}. \quad (3)$$

Таким образом, для воспроизведения килограмма можно использовать релятивистскую массу фотона. Заметим, что это вполне соответствует принятому в СИ определению единицы массы, если в качестве частоты в (3) использовать частоту перехода сверхтонкого расщепления невозмущенного основного состояния атома цезия-133. Тогда выражение (3) принимает вид

$$m = \frac{h\Delta\nu_{Cs}}{c^2}.$$

Полученное выражение полностью соответствует принятому в СИ определению единицы массы, т. е. релятивистская масса фотона выражена через фиксированное значение постоянной Планка, метр – через скорость света, и секунда – через частоту перехода сверхтонкого расщепления невозмущенного основного состояния атома цезия-133. Учитывая, что релятивистская масса одного фотона, излученного одним атомом цезия-133 в результате энергетического перехода сверхтонкого расщепления невозмущенного основного состояния атома, составляет $\frac{h\Delta\nu_{Cs}}{c^2} \approx 6.8 \cdot 10^{-41}$ кг, можно опреде-

лить количество атомов цезия-133, необходимых для воспроизведения 1 кг:

$$N = 1/6.8 \cdot 10^{-41} \text{ кг} \approx 1.47 \cdot 10^{40} \text{ атомов.}$$

Используя выражения для количества вещества:

$$\nu = \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A},$$

где M – молярная масса, кг/моль; N_A – число Авогадро, моль⁻¹, нетрудно определить массу тела, состоящего из необходимого для воспроизведения 1 кг релятивистской массы количества атомов цезия-133:

$$m = \frac{MN}{N_A} \approx \frac{133 \cdot 10^{-3} \cdot 1.47 \cdot 10^{40}}{6.02 \cdot 10^{23}} \approx 3.25 \cdot 10^{15} \text{ кг.}$$

Учитывая, что плотность цезия-133 $\rho = 1870 \text{ кг/м}^3$, можно посчитать объем тела:

$$V = \frac{m}{\rho} \approx \frac{3.25 \cdot 10^{15}}{1870} \approx 1.74 \cdot 10^{12} \text{ м}^3,$$

что эквивалентно сфере, состоящей из атомов цезия-133, диаметром 15 км.

Вышесказанное позволяет увидеть, что на сегодняшний день, реализация единицы массы «напрямую» практически невозможна, а основная проблема такого воспроизведения заключается в том, что атомы цезия-133 служат только как хранилище фотонов, которые являются «слишком легкими частицами». В связи с этим научное сообщество предлагает для воспроизведения единицы массы – килограмма – использовать другие, более тяжелые частицы – например, электрон и атом.

Так, при реализации килограмма предлагается использовать методы атомной спектроскопии и опираться на уравнение, связывающее постоянную Ридберга с массой электрона и другими константами:

$$hcR_\infty = \frac{1}{2} m_e \alpha^2,$$

где R_∞ – постоянная Ридберга; m_e – масса электрона; α – постоянная тонкой структуры.

Также рассматривается вариант реализации единицы массы при помощи магнитной ловушки Пеннинга, в которой для удержания элементарных частиц и атомов используется сильное однородное вертикальное магнитное поле, ограничивающее радиальные движения частиц, и квадрупольное электрическое поле, ограничивающее вертикальные движения. При этом электрическое поле заставляет заряженные частицы гармонически осциллировать вдоль вертикальной оси ло-

вушки. Одновременно с электрическим магнитное поле заставляет ионы двигаться в горизонтальной плоскости по траектории, называемой эпитрохой. Орбитальное движение заряженных частиц в горизонтальной плоскости состоит из двух нормальных колебаний с частотами, которые называются магнетронной ω^- и модифицированной циклотронной ω^+ . Сумма двух этих частот называется циклотронной частотой, зависит от отношения электрического заряда к массе, а также от магнитного поля и определяется уравнением

$$f_c = \frac{qB}{2\pi m_n},$$

где q – электрический заряд частицы; B – магнитная индукция; m_n – масса заряженной частицы.

Подчеркнем, что циклотронную частоту можно измерить с очень высокой точностью.

В настоящее время практическое воспроизведение килограмма, опирающееся на строение вещества, было реализовано в рамках международного проекта «Авогадро».

Проект «Авогадро». Зная массу атома вещества, из которого состоит тело, его кристаллическую решетку и объем этого тела, можно определить массу тела.

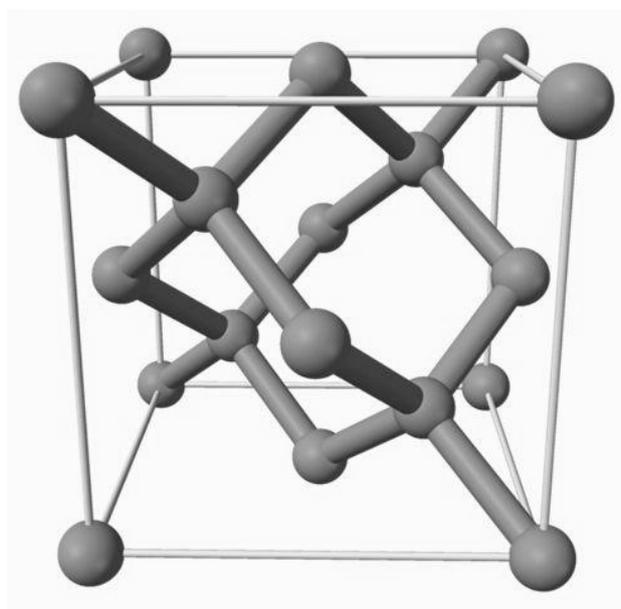
В соответствии с изложенным подходом была реализована единица килограмма в ряде стран. В качестве материала для такой реализации был выбран кристаллический кремний-28 (²⁸Si), из которого была изготовлена кремниевая сфера диаметром порядка 20 см. Сложно ответить точно, почему для этой цели был выбран именно монокристаллический кремний, однако здесь можно отметить следующие его качества:

– это один из самых распространенных химических элементов на Земле;

– он обладает алмазоподобной кристаллической решеткой, которая может быть представлена в виде двух гранцентрированных решеток, сдвинутых друг относительно друга на 1/4 телесной диагонали. Общий вид кристаллической решетки кремния и изготовленной из него сферы приведен на рис. 1.

При такой реализации килограмма переход от массы атома кремния к массе тела, изготовленного из него, осуществляется в соответствии с выражением

$$m = \frac{8VM}{a^3 N_A},$$



а
б
Рис. 1. Общий вид: *а* – кристаллической решетки кремния;
б – изготовленной из монокристаллического кремния сферы
Fig. 1. General view: *a* – silicon crystal lattice; *b* – a sphere made of single-crystal silicon

где a – размер ребра кубической кристаллической решетки.

Здесь отметим, что в данной реализации килограмма принимали участие несколько стран. Также необходимо сказать, что исходный материал для изготовления монокристаллических кремниевых сфер получала и поставляла для проекта Россия.

В настоящее время проект «Авогадро» считается завершенным, однако нельзя сказать, что он полностью удовлетворил мировое научное сообщество, поскольку поставил целый ряд научных и технических задач и вопросов. Здесь обозначим лишь некоторые из них:

- получение сверхчистых изотопов различных веществ – например, изотопа монокристаллического кремния-28, поскольку современная техника не позволяет получить стопроцентную чистоту данного материала и в нем всегда будут примеси;

- изготовление идеальной сферы, поскольку современные методы и средства обработки поверхности материалов не дают возможности изготовить идеальную сферу с идеальной чистотой поверхности;

- измерение диаметра сферы, поскольку любое средство измерения имеет погрешность измерения, даже средства измерения геометрических размеров;

- износ, поскольку любой материальный объект подвержен износу, в том числе и кремниевая сфера, т. е. для кремниевой сферы характерны те же самые опасные факторы, что и для международного прототипа килограмма;

- сорбция, диффузия, вырождение материала и ряд других.

Все эти негативные факторы не позволяют вышеописанному методу реализации единицы массы – килограмма, претендовать на звание наилучшего и единственного, а научным сообществом был предложен и реализован еще один из возможных методов реализации единицы массы, который получил название «электрический килограмм».

«**Электрический килограмм**». Для того чтобы понять, как определяется килограмм данным методом, необходимо вспомнить курс физики, а именно ту его часть, которая описывает электромагнитные взаимодействия: что такое сила Ампера и сила Лоренца. В общем случае предложенный метод заключается в уравнивании силы тяжести силой, действующей на проводник, по которому протекает электрический ток, находящийся в магнитном поле. Иллюстрация определения единицы массы – килограмма, данным методом приведена на рис. 2. Опишем реализацию метода:

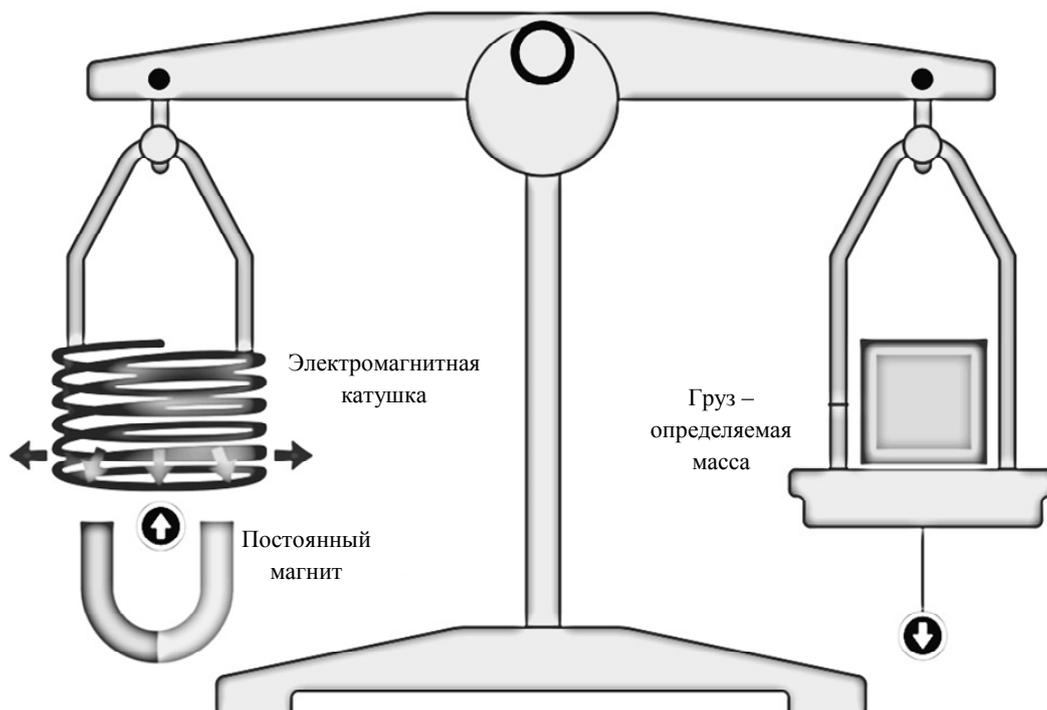


Рис. 2. Принципиальная схема метода реализации единицы массы – килограмма, уравниванием силы тяжести силой Ампера
Fig. 2. Schematic diagram of the method for implementing a unit of mass – a kilogram, by balancing the force of gravity, by the Ampere force

1. На тело массой m в поле силы тяжести действует сила тяжести

$$F_m = mg,$$

где g – ускорение свободного падения.

На электрический проводник, в предлагаемом методе – практически на электрическую катушку, по которой протекает электрический ток, находящуюся в постоянном магнитном поле, действует сила Ампера

$$F_A = BIl \sin \beta,$$

где I – электрический ток, протекающий по катушке; l – длина провода; β – угол между вектором магнитной индукции и направлением течения электрического тока.

2. Тогда в условиях равновесия и при таком взаимном расположении проводника (электрической катушки) и магнита, когда $\beta = 90^\circ$, можно вычислить массу взвешиваемого тела:

$$m = \frac{BIl}{g}. \quad (4)$$

Следовательно, массу можно определить, зная длину проводника в электрической катушке и измеряя электрический ток, когда сила Ампера уравнивает силу тяжести. Здесь следует от-

метить, что при этом необходимо также измерять и ускорение свободного падения в том месте, где происходит взвешивание, поскольку в разных местах на поверхности Земли оно разное. Кроме того, необходимо знать значения магнитной индукции или предварительно измерить ее, что и было предложено и сделано впервые Б. Кибблом. В основу процедуры измерения легла сила Лоренца, под воздействием которой в движущемся в магнитном поле проводнике (электрической катушке) возникает ЭДС индукции

$$\varepsilon = Bvl \sin \beta, \quad (5)$$

где v – скорость движения проводника (электрической катушки); β – угол между вектором магнитной индукции и направлением движения проводника (для удобства в дальнейшем будем считать, что он равен 90°).

Следовательно, измеряя возникающую в процессе движения электрической катушки в магнитном поле ЭДС и скорость движения катушки, можно рассчитать магнитную индукцию магнитного поля при условии известной длины проводника.

Таким образом массу можно определить, а процедура ее определения будет состоять из двух этапов:

1. Измерение магнитной индукции, когда электрическая катушка, которая используется для уравнивания силы тяжести, движется в магнитном поле. При этом измеряются скорость ее движения и возникающая в катушке ЭДС.

2. Непосредственно взвешивание, когда по электрической катушке пропускают электрический ток с таким значением, что возникающая сила Ампера уравнивает силу тяжести, возникающую под воздействием массы. При этом измеряется сила электрического тока и ускорение свободного падения.

Запишем окончательное уравнение измерения рассматриваемым методом, выразив магнитную индукцию из (5) и подставив в (4):

$$m = \frac{\varepsilon I l}{v l g} = \frac{\varepsilon I}{v g}. \quad (6)$$

Отметим, что в уравнении измерения массы нет магнитной индукции и не прослеживаются этапы измерений, однако о них необходимо помнить.

Следует сказать, что измерения с необходимой для эталона точностью входящих в уравнение (6) величин – ЭДС, силы тока, скорости и ускорения, – достаточно сложные задачи. Так, для измерения скорости применяются лазерные интерферометры различных типов. Ускорение свободного падения измеряется при помощи специальных средств – гравиметров. Что касается измерений ЭДС (напряжения) и силы тока, то существующие в настоящий момент времени средства измерения – вольтметры и амперметры, не способны обеспечить необходимую точность, поэтому ток измеряется с помощью явления, называемого квантовым эффектом Холла, а напряжение – с использованием эффекта Джозефсона.

Кратко опишем эти физические эффекты:

1. Эффект Джозефсона. В 1962 г. Брайн Д. Джозефсон, будучи дипломником Кембриджского университета, предсказал замечательное явление. Опираясь на чисто теоретический анализ сверхпроводимости (резкого исчезновения электрического сопротивления некоторых веществ при температурах, близких к абсолютному нулю), Джозефсон пришел к выводу о том, что сверхпроводящий ток, определяемый коррелированными парами электронов, может протекать через пленку изолятора, разделяющую два сверхпроводника, если ее толщина достаточно мала. Различают стационарный и нестационарный эффек-

ты Джозефсона. Последний можно записать в виде следующего выражения:

$$U(n) = n f \frac{h}{2e},$$

где n – целое число; f – частота электромагнитного поля.

Данное выражение позволяет измерять электрическое напряжение с очень высокой точностью. В настоящее время эффект Джозефсона используется в качестве мирового стандарта для точного измерения напряжения.

2. Эффект Холла. Квантовый эффект Холла был открыт Клаусом фон Клитцингом [48] в 1980 г., за что впоследствии в 1985 г. он получил Нобелевскую премию. Сам эффект состоит в том, что на зависимости поперечного сопротивления (отношения возникающего поперечного напряжения к протекающему току) от магнитного поля (или от концентрации при фиксированном поле) наблюдаются плато, причем значение сопротивления на этих плато равно

$$R(i) = \frac{h}{ie^2},$$

где i – фактор заполнения (целое число); e – заряд электрона.

Квантовый эффект Холла в настоящее время используется в качестве мирового стандарта для точных измерений сопротивления.

Отметим, что при помощи рассмотренных эффектов можно очень точно измерить силу тока. Действительно, используя закон Ома, силу тока можно выразить через напряжение и сопротивление:

$$I = \frac{U}{R},$$

где U – напряжение на участке электрической цепи, измеряется при помощи эффекта Джозефсона; R – сопротивление этого участка, измеряется с использованием эффекта Холла.

Такой подход позволяет использовать эффекты Джозефсона и Холла при измерении ЭДС и силы тока в весах Киббла (ватт-весах) с целью обеспечения наивысшей точности. Кроме того, использование данных эффектов позволяет определить единицу массы в соответствии с вновь принятым ее определением согласно которому она выражается через постоянную Планка. Для того чтобы показать это, учтем рассмотренные эффекты в уравнении измерения при помощи Киббл-весов (6):

$$m = i n^2 f^2 \frac{h}{4v g}.$$

Учитывая все вышесказанное, можно сказать, что современные весы Киббла представляют собой сложный измерительный комплекс, общий вид которого представлен на рис. 3.

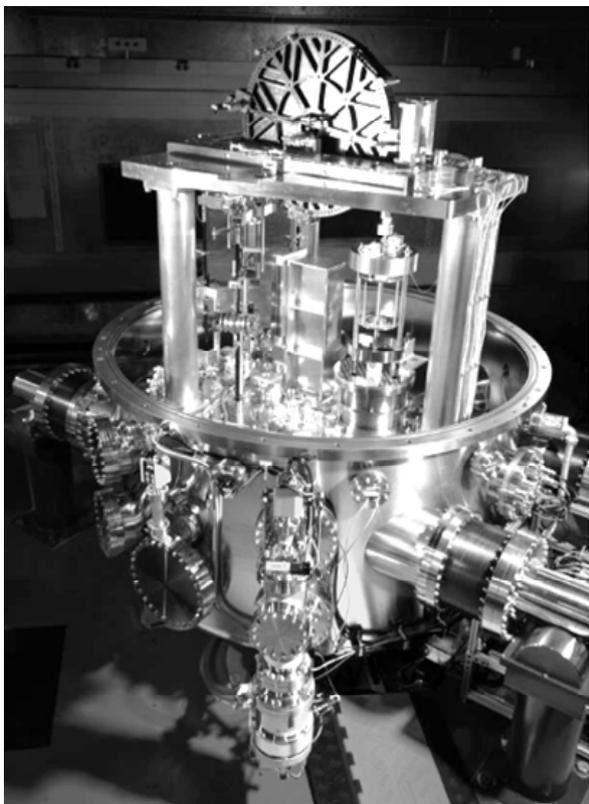


Рис. 3. Общий вид весов Киббла, стоящих на вооружении метрологов США
Fig. 3. General view of the Kibble scales used by US metrologists

Научное сообщество интенсивно осваивает новое определение килограмма и переходит на него, применяя весь арсенал новейших научных знаний, накопленных человечеством. Следует сказать, что это выражается не только в техническом перевооружении, но также и непосредственно в метрологической деятельности в области измерений массы. Следует отметить, что многие метрологически развитые страны (США [49], Франция [50], Великобритания [51], Южная Корея [52] и другие [53]) готовились к произошедшим переопределениям основных единиц СИ и уже имеют национальные эталоны, которые соответствуют принятым определениям. Поэтому, с целью уточнения постоянной Планка и ее фиксации, перед вступлением в силу новых определений были проведены международные исследования, которые завершились к 2017 г. Результаты этих исследований обобщили информацию с 2011 по 2017 гг., их графическая интерпретация приведена на рис. 4.

На рисунке приняты следующие обозначения: ПА (XRCD) – измерения выполнялись в соответствии с проектом «Авогадро»; КБ (KB) – измерения выполнялись при помощи Киббл-весов; CODATA – Комитет по данным для науки и техники; IAC – международный проект, направленный на уточнения числа Авогадро, который до 2017 г. назывался Международной координация Авогадро; NIST – Национальный институт стандартов и технологий, США; NRC – Национальный научно-исследовательский совет Канады, Канада; NMIJ – Национальный метрологический институт Японии, Япония; LNE – Национальная лаборатория метрологии и испытаний, Франция; числа после наименования института-участника указывают год проведения измерений данным участником. Также следует отметить, что на рисунке по горизонтальной оси отложено значение погрешности постоянной Планка в СИ, измеренное или принятое по результатам международного сотрудничества в разное время и для удобства приведенное в виде результата расчетов следующего выражения, определяющего эту погрешность начиная с пятого знака после запятой:

$$\left[h/10^{-34} - 6.6260 \right] \cdot 10^5.$$

Обозначения принадлежности результатов измерений приведены слева или справа от результата.

Рассматривая результаты, необходимо отметить, что:

1. Условиями переопределения единицы массы – килограмма являлись:

– использование двух разных методов для определения постоянной Планка;

– количество измерений – не менее трех с относительной неопределенностью (погрешностью) не более $5 \cdot 10^{-8}$ и не менее одного измерения с относительной неопределенностью (погрешностью) не более $2 \cdot 10^{-8}$.

2. Результаты измерений не полностью согласуются между собой.

Последнее означает, что принятое определение килограмма не позволяет получить единицу массы – килограмм с удовлетворительной точностью. В связи с этим в 2017 г. Комитетом по данным для науки и техники было решено принять промежуточное согласованное значение для килограмма, а неопределенность его измерений была расширена с коэффициентом 1.7. Принятое значение килограмма было рассчитано и принято на основе среднего арифметического трех наборов данных:

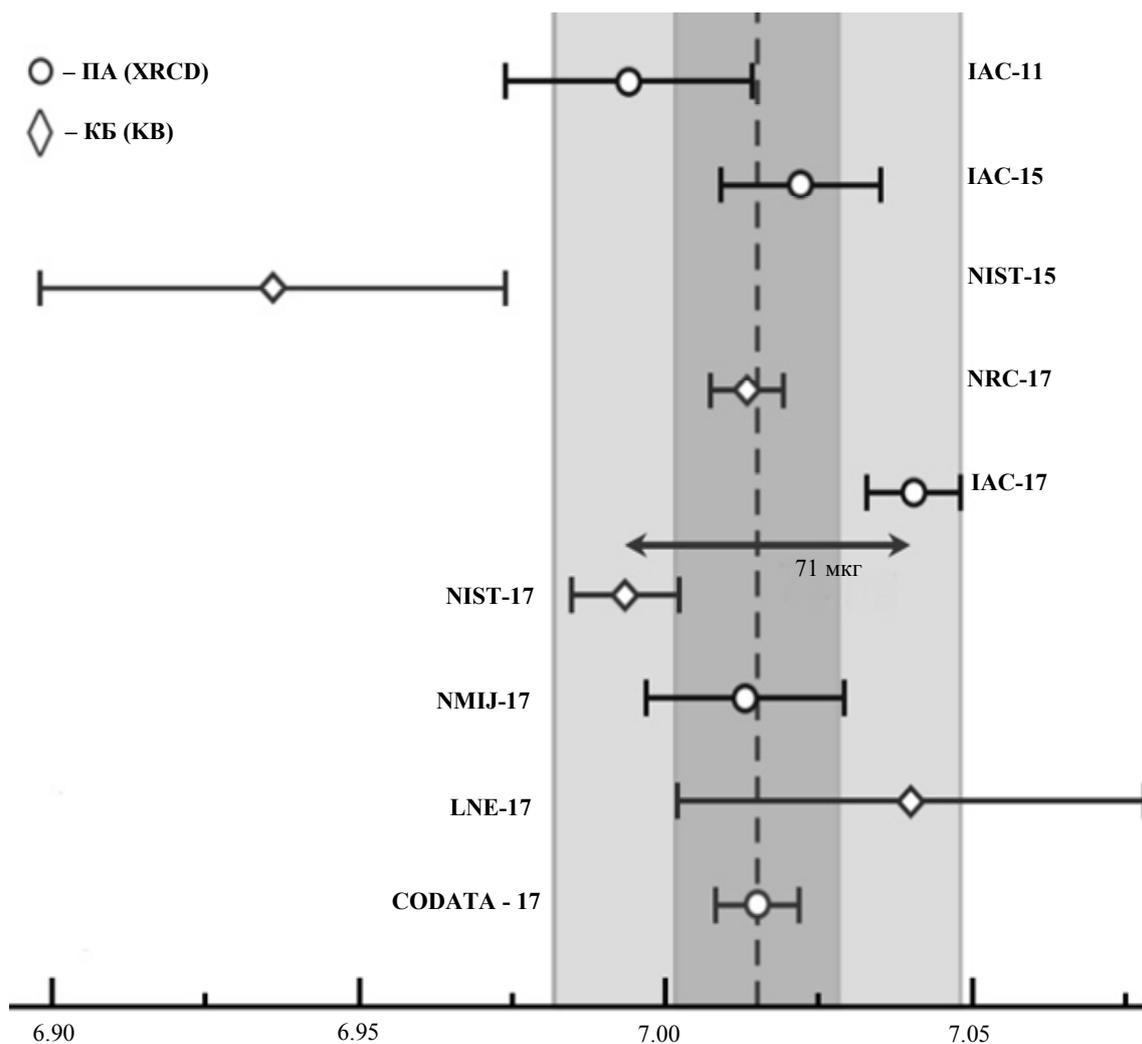


Рис. 4. Результаты измерений постоянной Планка с целью ее фиксации
 Fig. 4. Results of measurements of Planck's constant in order to fix it

– на основе данных, полученных от международного прототипа килограмма (платиновопалиниевая гиря): последний раз международный прототип килограмма использовался при определении постоянной Планка в 2014 г.;

– на основе данных пилотных исследований по реализации единицы массы, которые были получены при подготовке к ключевым сличениям в 2016 г.;

– на основе результатов впервые проведенных ключевых сличений, финальный отчет которых должен был быть получен в 2019–2020 гг.

Кроме того, было принято решение использовать принятое значение килограмма до тех пор, пока не будут получены удовлетворительные согласованные результаты. При этом сличения будут повторяться каждые два года и по их результатам будет рассчитываться новое согласованное значение единицы массы – килограмма.

Заключение. В качестве заключения подчеркнем и обобщим некоторые вопросы и про-

блемы, которые ставят перед научным сообществом произошедшие переопределения основных единиц СИ.

Прежде всего, необходимо отметить, что, хотя во множестве публикаций и говорится о том, что сегодня Международная система единиц опирается на фундаментальные физические константы и полностью отказалась от материальных эталонов, но это не так. Поскольку единица времени (основная единица) определяется с использованием вполне материального атома цезия-133. Видимо, следует ожидать и переопределения единицы времени.

Человечество, опираясь в своих измерениях на фундаментальные константы, в некотором роде противоречит одному из принципов построения любой системы единиц, который гласит, что основа любой системы единиц – это прежде всего ее удобство.

Отметим и то, что не объяснен физический смысл некоторых констант, которые используются при реализации тех или иных единиц. Так,

например, до сих пор нет однозначного понимания физического смысла так называемой постоянной тонкой структуры. Более того, в научных кругах идут споры, а постоянна ли постоянная тонкой структуры? Последнее, с философской точки зрения, ставит общий вопрос: а постоянно ли постоянное? Или постоянное может существовать только в каких-то ограниченных условиях?

Еще раз подчеркнем и тот факт, что в настоящее время не получено согласованное удовлетворительное по точности значение единицы массы – килограмма, по результатам измерения различными методами и в различных странах в соответствии с принятыми новыми определениями основных единиц СИ.

Тем не менее, переопределение основных единиц произошло, и с практической точки зрения нас, как патриотов своего отечества, скорее интересует вопрос: «А что в России происходит в этом направлении?»

Следует сказать, что работы, направленные на реализацию единиц в соответствии с новыми определениями, в РФ уже ведутся. Так, например, в ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» ведутся работы по разработке весов Киббла. Некоторые аспекты этих исследований освещаются в нашей последней статье [54]. На мой взгляд, построение таких весов, как в России, так и за рубежом идет по уже пройденному, я бы сказал, устаревшему пути, поскольку в существующих и вновь разрабатываемых Киббл-весах рассматривается только одна степень свободы – линейное перемещение

электрической катушки в магнитном поле или такое же линейное перемещение магнита относительно электрической катушки, с целью измерения магнитной индукции. Тогда как, по аналогии с молекулами, существуют еще и вращательная и колебательная степени свободы. Причем следует отметить, что использование данных видов движения также позволяет измерить магнитную индукцию, с помощью например, так называемого парадокса Фарадея. Кроме того, рассмотрение возможностей использования других видов движения при реализации единицы массы при помощи Киббл-весов являются, с моей точки зрения, интересными и перспективными техническими и научными задачами.

К сожалению, пока нет новейших публикаций о том, ведутся ли в России работы, направленные на реализацию единицы массы – килограмма, методами, аналогичными методу, реализованному в проекте «Авогадро» за рубежом. На мой взгляд, такие исследования позволили бы уточнить значение единицы массы – килограмма, а также найти и исключить систематические ошибки, скрытые в уже осуществленных способах реализации этой единицы массы.

В связи с этим автор приглашает к сотрудничеству и надеется, что научное сообщество России способно не только повторять принципы, реализованные в эталонах иностранных государств, но и предложить новые прогрессивные методы воспроизведения единиц системы и строить новейшие эталоны, в которых они будут использованы.

Список литературы

1. Oxford Essential Quotations (4 ed.) / Ed. by S. Ratcliffe. Oxford University Press. Current Online Version: 2016. doi: 10.1093/acref/9780191826719.001.0001. URL: <https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/acref/9780191826719.001.0001/q-oro-ed4-00006236> (дата обращения 10.01.2022).
2. Гершун А. Л. Эталон // Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона: в 86 т. (82 т. и 4 доп.). СПб., 1890–1907 г. т. XLI (1904). С. 136–137.
3. Girod du Saugey J. Manuel métrologique des peuples de l'antiquité, à l'usage des collèges et institutions: Ouvrage spécialement consacré à faciliter l'interprétation des auteurs classiques / par J. Girod du Saugey Paris: A. Jeanthon, 1837.
4. Wagener A. Notice sur un monument métrologique récemment découvert en Phrygie // Mémoires couronnés et mémoires des savants étrangers / publ. par l'Acad. roy. des sciences et belles-lettres de Bruxelles. Vol. 27. 1856 г. URL: <https://www.biodiversitylibrary.org/item/28721#page/193/mode/1up> (дата обращения 10.01.2022).

5. Прозоровский Д. И. Древняя русская метрология: Лекции Д. И. Прозоровского. СПб. археол. ин-т. Санкт-Петербург, 1888. 337 с. (дата обращения 10.01.2022).
6. Прозоровский, Д. И. Древний русский вес // Журн. Министерства народного просвещения. 1855. № 5. С. 115–152.
7. Петрушевский Ф. И. Метрология или Описание мер, весов, монет и времячисления нынешних и древних народов. Санкт-Петербург: тип. Деп. нар. прос., 1831 г. 362 с.
8. Петрушевский Ф. И. Краткая европейская метрология, или описание главных мер, весов и монет, в Европе ныне употребляемых. Санкт-Петербург: тип. Э. Праца, 1842 г. 116 с.
9. Рейнбот П. И. Краткая метрология европейских государств / сост. П. И. Рейнбот, ст. преп. бухгалтерии С.-Петерб. коммер. уч-ща. Санкт-Петербург: В. А. Смирдин, 1865 г. 25 с.
10. Виппер Ю. Ф. Греческая и римская метрология: сост. по Гюлтшу и др. / Ю. Ф. В. Москва: тип. В. М. Фриш, 1873. 30 с.

11. Кузнецов С. К. Древнерусская метрология: Курс лекций, чит. в 1908/9 учеб. г. в Моск. археол. ин-те С. К. Кузнецовым. Малмыж на Вятке: тип. Н. Н. Черемшанского, 1913. 138 с.
12. «Метрология и поверочное дело»: Бюл. Глав. упр. мер и весов НКВД СССР. Москва: Б. и., 1938 г. Метрология и поверочное дело: Орган Ком. по делам мер и измерительных приборов при СНК СССР. Москва: ГОНТИ, 1939.
13. Измерительная техника: Орган Ком. по делам мер и измерительных приборов при СНК СССР. М.: Машгиз, 1939 г.
14. Бабенко И. П. Метрология (мероведение): Руководство и справ. кн. для контор и лиц, занимающихся торгово-пром. делом / Сост. преп. коммерч. наук И. П. Бабенко; [Предисл.: Петр Котляров]. Санкт-Петербург: П. П. Котляров, 1905. 189 с.
15. Степанов П. Л. Скоромножитель и метрология: Настол. книжка для лиц продовольствующих людей или контролирующих продовольствие / Сост. нач. Саратов. губ. тюрьмы П. А. Степановым. Саратов: тип. Союза печ. дела, 1913. 47 с.
16. Nicholson, Edward. Men and measures: a history of weights and measures, ancient and modern. London: Smith, Elder & Co., 1912.
17. Berriman A. E. Historical metrology: A new analysis of the archaeological and the historical evidence relating to weights and measures. London–New York: J. M. Dent & sons: E. P. Dutton & Co., 1953. 224 с.
18. Ellis B. Concept of measurement / by Brian Ellis. Cambridge: Univ. press, 1966. 220 p.
19. Bruno K. Scales and Weights: A Historical Outline. New Haven: Yale University Press, 1965.
20. Keith E. Man and measurement. London: Priory Press, 1973.
21. Klein H. A. The world of measurements: masterpieces, mysteries and muddles of metrology. New York: Simon and Schuster. 1974.
22. Bishop O. N. Yardsticks of the universe. New York: P. Bedrick Books: Distributed in the USA by Harper & Row. 1984.
23. Dilke O. A. W. Mathematics and measurement. Berkeley: University of California Press; London: British Museum. 1987. URL: <https://archive.org/details/mathematicsmeasu0000dilke> (дата обращения 10.01.2022).
24. Kula W. Measures and men / Transl. by R. Szepter. N.J.: Princeton University Press, 1986. 386 p.
25. Zupko R. E. British weights and measures: A history from antiquity to the seventeenth century. Madison: University of Wisconsin Press. 1977.
26. Zupko R. E. Revolution in measurement: western european weights and measures since the age of science. Philadelphia: American Philosophical Society, 1990.
27. Bassière M., Gaignebet É. Métrologie générale: Théorie de la mesure: Les instruments et leur emploi / Par Marc Bassière, Émile Gaignebet, dr. ès sciences; Prèf. de l'ing. général. P. Nicolau. Paris: Dunod, 1966. 517 с.
28. Stephen D. Units of measurement: An encyclopaedic dictionary of units, both scientific and popular, and the quantities they measure. New York: Hastings House, 1971.
29. Feirer J. L. SI metric handbook. New York: Scribner, 1977.
30. Jerrard H. G., Mcneill D. B. A dictionary of scientific units: including dimensionless numbers and scales, 5th ed. 1986. URL: <https://bylib.org/book/2319119/326973> (дата обращения 10.01.2022).
31. Drazil J. V. Quantities and units of measurement: a dictionary and handbook. London: Mansell Pub.; Bronx, N.Y.: Distributed in the U.S. and Canada by H. W. Wilson, 1983.
32. Crease R. P. World in the balance: The historic quest for an absolute system of measurement. 1st Ed. New York: W. W. Norton & Company. 2011.
33. Annual Report of the National Bureau of Standards U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1971. 6 p.
34. Le Système international d'unités (SI) / The International System of Units (SI): [фр., англ.]. BIPM, 2019. URL: <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/> (дата обращения 10.01.2022).
35. Stock M., Davis R. Estefanía de Mirandés and Martin J T Milton. The revision of the SI – the result of three decades of progress in metrology // Metrologia. 2019. Vol. 56, no. 022001. doi: 10.1088/1681-7575/ab0013. URL: https://www.researchgate.net/publication/330487527_The_revision_of_the_SI_the_result_of_three_decades_of_progress_in_metrology (accessed: 10.01.2022).
36. Davis Richard. An introduction to the revised international system of units (SI) // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2019. Vol. 22, no. 3. P. 4–8. doi: 10.1109/MIM.2019.8716268/ (дата обращения 10.01.2022).
37. О выборе фиксируемых фундаментальных констант для новых определений единиц СИ / К. А. Бронников, В. Д. Ивашук, М. И. Калинин, В. Н. Мельников, В. В. Хрущёв // Измерительная техника. 2016. № 8. С. 11–15.
38. SI-Brochure-9 Report of the 24th meeting (8–9 October 2019) to the International Committee for Weights and Measures. URL: <https://www.bipm.org/documents/20126/41599401/24th%20meeting/744a6879-6722-5b4f-f843-3aacbecb0e46/> (дата обращения 10.01.2022).
39. Чернышенко А. А. Современное состояние и перспективы развития эталонной базы в области измерений низких абсолютных давлений и вакуума // Тр. 26-й Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Вакуумная техника и технологии-2019». СПб. С. 59–63. URL: <https://vactron.ru/media/VTT2019-VACTRON.ru.pdf> (дата обращения: 10.01.2022).
40. Resolution 1 of the 26th CGPM (2018) 1 Conf. générale des poids et mesures 26e réunion (13–16 novembre 2018) // Bureau Intern. des Poids et Mesures [website]. URL: <https://www.bipm.org/en/committees/cg/cgpm/26-2018/resolution> (дата обращения 10.01.2022).
41. Quinn T. From artefacts to atoms: the bipm and the search for ultimate measurement standards OUP USA. Oxford; New York: Oxford University Press, 2012.
42. Development of a new UHV/XHV pressure standard (Cold Atom Vacuum Standard) / J. Scherschligt,

J. A. Fedchak, D. S. Barker, S. Eckel, N. Klimov, C. Makrides, E. Tiesinga // *Metrologia*. 2017. Vol. 54 (6). P. 125–132.

43. Perspectives for a new realization of the pascal by optical methods / K. Josten, J. Hendricks, D. Barker, K. Douglas, S. Eckel, P. Egan, J. Fedchak, J. Flügge, C. Gaiser, D. Olson, J. Ricker, T. Rubin, W. Sabuga, J. Scherschligt, R. Schödel, U. Sterr, J. Stone, G. Strouse // *Metrologia*. 2017. Vol. 54 (6). P. 146–161.

44. Moldover M. R. Can a pressure standard be based on capacitance measurements? // *J. of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 1998. Vol. 103 (2). P. 167–175.

45. Gaiser Ch., Fellmuth B., Sabuga W. Primary gas-pressure standard from electrical measurements and thermophysical abinitio calculations // *Nature Physics*. 2020. No. 16. P. 177–180.

46. Чернышенко А. А. Трансформация системы метрологического обеспечения в области измерений давлений и вакуума // *Тр. 27-й Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. 27–29 окт. 2020 г.* / под ред. Д. К. Кострина и С. А. Марцынюкова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. С. 8–10.

47. Международная система единиц (SI). Изд. 9-е. 2019 г. Над переводом на русский язык работали: Дятлев А. Б., Зингер Е. П., Корзинин Е. Ю., Лулева Е. И., Битюкова Г. В., Исаев Л. К., Калинин М. И. URL: <https://www.vniim.ru/files/SI-2019.pdf> (дата обращения 10.01.2022).

48. Klitzing K. V., Dorda G., Pepper M. New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized hall resistance // *Phys. Rev. Lett.* 1980. No. 45. P. 494–497.

49. The Design and development of a tabletop kibble balance at NIST / L. S. Chao, F. C. Seifert, D. E. Haddad, J. Stirling, B. D. Newell, St. Schlamminger // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019. Vol. 68, no. 6. P. 2176–2182. doi: 10.1109/TIM.2019.2901550.

50. Dos Santos M. S., Piquemal F., Espe P. A determination of the Planck constant using the LNE Kibble balance in air / M. Thomas, D. Ziane, P. Pinot, R. Karcher, A. Imanaliev, F. Pereira // *Metrologia*. 2017. Vol. 54 (4). P. 468–480. doi: 10.1088/1681-7575/aa7882.

51. Berry J., Webster E., Robinson I. NPL Kibble balance bifilar coil design and evaluation. XXII World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO 2018). IOP Conf. // *J. of Physics: Conf.* 2018. Vol. 1065 (4). P. 42–49. doi: 10.1088/1742-6596/1065/4/042049.

52. Realization of the kilogram using the KRISS Kibble balance / Kim Dongmin, Kim Myeong Hyeon, Seo Minky, Woo Byung-Chill, Lee Sungjun, Kim Jong-Ahn, Chae Dong-Hun, Kim Mun-Seog, Choi In-Mook, Lee Kwang-Cheol // *Metrologia*. 2020. Vol. 57 (5). P. 1–10. doi: 10.1088/1681-7575/ab92e0.

53. Ian A. Robinson and Stephan Schlamminger. The watt or Kibble balance: a technique for implementing the new SI definition of the unit of mass // *Metrologia*. 2016. Vol. 53 (5). P. 46–74. doi: 10.1088/0026-1394/53/5/A46/.

54. Чернышенко А. А., Каменских Ю. И. Вакуумная система Ватт-весов: аспекты разработки. Эталоны. Стандартные образцы. 2021. Т. 17, № 4. С. 5–12.

Информация об авторе

Чернышенко Александр Александрович – канд. техн. наук, руководитель лаборатории вакуумных измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». Московский пр., 19, г. Санкт-Петербург, 190005, Россия.

E-mail: vacuum@vniim.ru

References

1. Oxford Essential Quotations (4 ed.) / Edited by Susan Ratcliffe. Oxford University Press. Current Online Version: 2016. doi: 10.1093/acref/9780191826719.001.0001. URL: <https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/acref/9780191826719.001.0001/q-oro-ed4-00006236> (accessed: 10.01.2022).

2. Gershun A. L. *Jetalon // Jenciklopedicheskiy slovar' Brokgauza i Efrona: v 86 t. (82 t. i 4 dop.)*. SPb., 1890–1907. t. XLI (1904). P. 136–137.

3. Girod du Saugey J. *Manuel métrologique des peuples de l'antiquité, à l'usage des collèges et institutions: Ouvrage spécialement consacré à faciliter l'interprétation des auteurs classiques / par J. Girod du Saugey* Paris: A. Jeanthon, 1837.

4. Wagener A. Notice sur un monument métrologique récemment découvert en Phrygie // *Mémoires couronnés et mémoires des savants étrangers* // publ. par l'Acad. roy. des sciences et belles-lettres de Bruxelles. Vol. 27. 1856. URL: <https://www.biodiversitylibrary.org/item/28721#page/193/mode/1up> (accessed: 10.01.2022).

5. Prozorovskij D. I. *Drevnjaja russkaja metrologija: Lekcii D. I. Prozorovskogo*. SPb. arheol. in-t. Sankt-Peterburg, 1888. 337 s. (In Russ.).

6. Prozorovskij, D. I. *Drevnij russkij ves // Zhurnal Ministerstva narodnogo prosveshhenija*. 1855. № 5. S. 115–152. (In Russ.).

7. Petrushevskij F. I. *Metrologija ili Opisanie mer, vesov, monet i vremjaschislenija nyneshnih i drevnih narodov*. Sankt-Peterburg: tip. Dep. nar. pros., 1831. 362 s. (In Russ.).

8. Petrushevskij F. I. *Kratkaja evropejskaja metrologija, ili opisanie glavnyh mer, vesov i monet, v Evrope nyne upotreblyaemyh*. Sankt-Peterburg: tip. Je. Praca, 1842. 116 s. (In Russ.).

9. Rejnbot P. I. *Kratkaja metrologija evropejskih gosudarstv / Sost. P. I. Rejnbot, st. prep. buhgalterii S.-Peterb. kommer. uch-shha*. Sankt-Peterburg: V. A. Smirdin, 1865. 25 s. (In Russ.).

10. Vipper Ju. F. Grecheskaja i rimskaja metrologija: Sost. po Gjultshu i dr. / Ju. F. V. Moskva: tip. V. M. Frish, 1873. 30 s. (In Russ.).
11. Kuznecov S. K. Drevnerusskaja metrologija: Kurs lekciij, chit. v 1908/9 ucheb. g. v Mosk. arheol. in-te S. K. Kuznecovym. Malmyzh na Vjatke: tip. N. N. Chermshanskogo, 1913. 138 s. (In Russ.).
12. Metrologija i poverochnoe delo: Bjul. Glav. upr. mer i vesov NKVD SSSR. Moskva: B. i., 1938. Metrologija i poverochnoe delo: Organ Kom. po delam mer i izmeritel'nyh priborov pri SNK SSSR. Moskva: GONTI, 1939. (In Russ.).
13. Izmeritel'naja tehnika: Organ Kom. po delam mer i izmeritel'nyh priborov pri SNK SSSR. M.: Mashgiz, 1939. (In Russ.).
14. Babenko I. P. Metrologija (merovedenie): Rukovodstvo i sprav. kn. dlja kontor i lic, zanimajushihhsja trgovno-prom. delom / Sost. prep. kommerch. nauk I. P. Babenko; [Predisl.: Petr Kotljarov]. Sankt-Peterburg: P. P. Kotljarov, 1905. 189 s. (In Russ.).
15. Stepanov P. L. Skoromnozhitel i metrologija: Nastol. knizhka dlja lic prodovol'stvujushih ljudej ili kontrolirujushih prodovol'stvie / Sost. nach. Sarat. gub. tjur'my P. A. Stepanovym. Saratov: tip. Sojuza pech. dela, 1913. 47 s. (In Russ.).
16. Nicholson, Edward. Men and measures: a history of weights and measures, ancient and modern. London: Smith, Elder & Co., 1912.
17. Berriman A. E. Historical metrology: A new analysis of the archaeological and the historical evidence relating to weights and measures. London; New York: J. M. Dent & sons: E. P. Dutton & Co., 1953. 224 s.
18. Ellis B. Concept of measurement / By Brian Ellis. Cambridge: Univ. press, 1966. 220 p.
19. Kisch B. Scales and weights: A historical outline. New Haven: Yale University Press, 1965.
20. Ellis K. Man and measurement. London: Priory Press, 1973.
21. Klein H. A. The world of measurements: masterpieces, mysteries and muddles of metrology. New York: Simon and Schuster. 1974.
22. Bishop O. N. Yardsticks of the universe. New York: P. Bedrick Books: Distributed in the USA by Harper & Row. 1984.
23. Dilke O. A. W. Mathematics and measurement. Berkeley: University of California Press; London: British Museum. 1987. URL: <https://archive.org/details/mathematicsmeasu0000dilk> (accessed: 10.01.2022).
24. Kula W. Measures and men / Transl. by R. Szepter. N. J.: Princeton University Press, 1986. 386 p.
25. Zupko R. E. British weights and measures: A history from antiquity to the seventeenth century. Madison: University of Wisconsin Press. 1977.
26. Zupko R. E. Revolution in measurement: western european weights and measures since the age of science. Philadelphia: American Philosophical Society, 1990.
27. Bassière M., Gaignebet É. Métrologie générale: Théorie de la mesure: Les instruments et leur emploi / Par Marc Bassière, Émile Gaignebet, dr. ès sciences; Prêf. de l'ing. général. P. Nicolau. Paris: Dunod, 1966. 517 s.
28. Stephen D. Units of measurement: An encyclopaedic dictionary of units, both scientific and popular, and the quantities they measure. New York: Hastings House, 1971.
29. Feirer J. L. SI metric handbook. New York: Scribner, 1977.
30. Jerrard H. G., Mcneill D. B. A dictionary of scientific units: including dimensionless numbers and scales, 5th ed. 1986. URL: <https://by1lib.org/book/2319119/326973> (accessed: 10.01.2022).
31. Drazil J. V. Quantities and units of measurement: a dictionary and handbook. London: Mansell Pub.; Bronx, N.Y.: Distributed in the U.S. and Canada by H. W. Wilson, 1983.
32. Crease R. P. World in the balance: The historic quest for an absolute system of measurement. 1st Edition. New York: W. W. Norton & Company. 2011.
33. Annual report of the National Bureau of Standards U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1971. 6 p.
34. Le Système international d'unités (SI) / The International System of Units (SI): [fr., angl.]. BIPM, 2019. URL: <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/> (accessed: 10.01.2022).
35. Stock M., Davis R., Estefanía de Mirandés, Martin J. T. Milton. The revision of the SI – the result of three decades of progress in metrology // Metrologia. 2019. Vol. 56, no. 022001. doi:10.1088/1681-7575/ab0013. URL: https://www.researchgate.net/publication/330487527_The_revision_of_the_SI_-_the_result_of_three_decades_of_progress_in_metrology (accessed: 10.01.2022).
36. Davis R. An introduction to the revised international system of units (SI) // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2019. Vol. 22, no. 3. P. 4–8. doi: 10.1109/MIM.2019.8716268/ (accessed: 10.01.2022).
37. Bronnikov K. A., Ivashhuk V. D., Kalinin M. I., Mel'nikov V. N., Hrushhiov V. V. O vybore fiksiruemyh fundamental'nyh konstant dlja novyh opredelenij edinic SI // Izmeritel'naja tehnika. 2016. № 8. S. 11–15. (In Russ.).
38. SI-Brochure-9 Report of the 24th meeting (8–9 October 2019) to the International Committee for Weights and Measures. URL: <https://www.bipm.org/documents/20126/41599401/24th%20meeting/744a6879-6722-5b4f-f843-3aacbecb0e46/> (accessed: 10.01.2022).
39. Chernyshenko A. A. Sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitiya jetalonnnoj bazy v oblasti izmerenij nizkih absoljutnyh davlenij i vakuuma // Trudy 26-j vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Vakuumnaja tehnika i tehnologii-2019». SPb. S. 59–63. URL: <https://vactron.ru/media/VTT2019-VACTRON.ru.pdf> (accessed: 10.01.2022). (In Russ.).
40. Resolution 1 of the 26th CGPM (2018) 1 Conférence générale des poids et mesures 26^e réunion (13–16 novembre 2018) // Bureau International des Poids et Mesures [website]. URL: <https://www.bipm.org/en/comitees/cg/cgpm/26-2018/resolution> (accessed: 10.01.2022).
41. Quinn T. From Artefacts to Atoms: The BIPM and the Search for Ultimate Measurement Standards OUP USA. Oxford; New York: Oxford University Press, 2012.
42. Scherschligt J., Fedchak J. A., Barker D. S., Eckel S., Klimov N., Makrides C., Tiesinga E. Development of a

new UHV/XHV pressure standard (Cold Atom Vacuum Standard) // *Metrologia*. 2017. Vol. 54 (6). R. 125–132.

43. Jousten K., Hendricks J., Barker D., Douglas K., Eckel S., Egan P., Fedchak J., Flügge J., Gaiser C., Olson D., Ricker J., Rubin T., Sabuga W., Scherschligt J., Schödel R., Sterr U., Stone J., Strouse G. Perspectives for a new realization of the pascal by optical methods // *Metrologia*. 2017. Vol. 54 (6). R. 146–161.

44. Moldover Michael R. Can a Pressure Standard be Based on Capacitance Measurements? // *J. of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 1998. Vol. 103 (2). P. 167–175.

45. Gaiser Ch., Fellmuth B., Sabuga W. Primary gas-pressure standard from electrical measurements and thermophysical abinitio calculations // *Nature Physics*. 2020. No. 16. P. 177–180.

46. Chernyshenko A. A. Transformacija sistemy metrologicheskogo obespechenija v oblasti izmerenij davlenij i vakuuma / Trudy 27-j Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. 27–29 oktjabrja 2020 g. // pod red. D. K. Kostrina i S. A. Marcynjukova. SPb.: Izd-vo SPbGJeTU «LETI», 2020. S. 8–10. (In Russ.).

47. Broshjura «Mezhdunarodnaja sistema edinic (SI). Izdanie 9-e. 2019 g. Nad perevodom na russkij jazyk rabotali: Djatlev A. B., Zinger E. P., Korzinin E. Ju., Luneva E. I., Bitjukova G. V., Isaev L. K., Kalinin M. I. URL: <https://www.vniim.ru/files/SI-2019.pdf>. (In Russ.).

48. Klitzing K. V., Dorda G., Pepper M. New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure

Constant Based on Quantized Hall Resistance // *Phys. Rev. Lett.* 1980. No. 45. P. 494–497.

49. Chao L. S., Seifert F. C., Haddad D. E., Stirling J., DNewell B., Schlamminger St. The Design and Development of a Tabletop Kibble Balance at NIST // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019. Vol. 68, no. 6. P. 2176–2182. doi: 10.1109/TIM.2019.2901550.

50. Thomas M., Ziane D., Pinot P., Karcher R., Imanaliev A., Pereira F. Dos Santos, Merlet S., Piquemal F., Espe P. A determination of the Planck constant using the LNE Kibble balance in air // *Metrologia*. 2017. Vol. 54 (4). P. 468–480. doi:10.1088/1681-7575/aa7882.

51. Berry J., Webcter E., Robinson I. NPL Kibble balance bifilar coil design and evaluation. XXII World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO 2018). IOP Conf. // *J. of Physics: Conf.* 2018. Vol. 1065 (4). P. 42–49. doi: 10.1088/1742-6596/1065/4/042049.

52. Kim Dongmin, Kim Myeong Hyeon, Seo Minky, Woo Byung-Chill, Lee Sungjun, Kim Jong-Ahn, Chae Dong-Hun, Kim Mun-Seog, Choi In-Mook, Lee Kwang-Cheol. Realization of the kilogram using the KRISS Kibble balance // *Metrologia*. 2020. Vol. 57 (5). P. 1–10. doi: 10.1088/1681-7575/ab92e0.

53. Ian A. Robinson and Stephan Schlamminger. The watt or Kibble balance: a technique for implementing the new SI definition of the unit of mass // *Metrologia*. 2016. Vol. 53 (5). P. 46–74. doi: 10.1088/0026-1394/53/5/A46.

54. Chernyshenko A. A., Kamenskih Ju. I. Vakuumnaja sistema Vatt-vesov: aspekty razrabotki. Jetalony. Standartnye obrazcy. 2021. T. 17, № 4. S. 5–12. (In Russ.).

Information about the author

Aleksandr A. Chernyshenko – Cand. Sci. (Eng.), Head of Vacuum Measurement Laboratory of D. I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM) 19 Moskovskiy ave., Saint Petersburg 190005, Russia.
E-mail: vacuum@vniim.ru

Статья поступила в редакцию 10.01.2022; принята к публикации после рецензирования 27.11.2021; опубликована онлайн 11.03.2022.

Submitted 10.01.2022; accepted 27.11.2021; published online 11.03.2022.