

УДК 531.421.081.1SI:535.233.24

Н. Л. Камкова,  
Н. А. Жагора

## КИЛОГРАММ И ПОСТОЯННАЯ ПЛАНКА – НОВОЕ В МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЕ ЕДИНИЦ

В статье говорится о переопределении единицы измерения массы – килограмма в международной системе единиц (SI), прежнем и будущем воспроизведении её, состоянии эталона массы в Республике Беларусь.

The article deals with the redefinition of the unit of mass - kilogram in the International System of Units (SI), its former and future reproduction, and the state of the standard of mass unit in the Republic of Belarus.

Масса – сложная для понимания величина. Макроскопически она относится к материи, хотя материя не является четко определенным понятием в физике. Масса (гравитационная масса) пропорциональна весу тела, который представляет собой силу тяжести, от взаимодействия с гравитационным полем второй массы, например, Земли. Масса (инертная масса) отражает сопротивление тела изменению его скорости, и сила, требуемая для изменения его скорости, пропорциональна его массе. В соответствии с принципом эквивалентности Эйнштейна, инертная масса и гравитационная масса идентичны. Это подтверждено экспериментами на уровне  $10^{-12}$ . Более того, масса эквивалентна энергии в соответствии со знаменитой формулой Эйнштейна  $E = m_0 c^2$ , что отражается в так называемом дефекте массы, соответствующем энергии связи составной системы. В этой формуле  $m_0$  – масса тела в состоянии покоя. В соответствии со специальной теорией относительности, инертная масса зависит от его скорости,  $v$ :

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1)$$

Макроскопические массы возникают как сумма масс составляющих элементарных частиц, уменьшенная на дефект массы.

Несмотря на все эти сложности с массой как физической величиной, определение ее единицы – килограмма – в предыдущей SI было прямым и простым. Любую массу соотносили с массой международного прототипа килограмма (ИКР).

Масса прототипа исторически определялась как масса кубического дециметра чистой воды при температуре ее максимальной плотности около 4 °С.

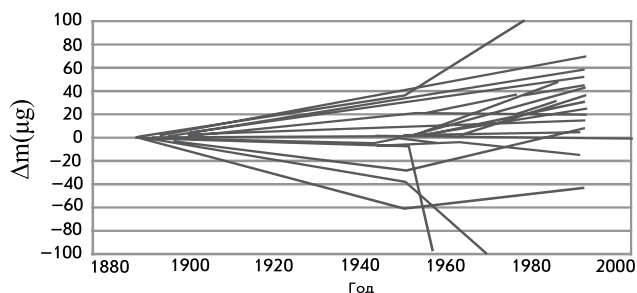
Выбор инертного сплава платины и иридия в качестве материала прототипа гарантировал ста-

бильный эталон при соответствующем обращении и очистке. Во время первой Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) в 1889 году 30 платино-иридиевых копий прототипа были распределены Международному бюро мер и весов (МБМВ) и 17 странам, подписавшим Метрическую конвенцию, которые использовали их в качестве национальных эталонов массы. Последующие сравнения национальных прототипов с ИКР, выполненные в 1950 и 1990 годах, выявили проблему с определением единицы массы килограмма. Вероятно происходило изменение массы международного прототипа или его копий, в среднем приблизительно 30 мкг за 100 лет (см. рис. 1).

Для снижения нестабильности и недостаточной точности предыдущего определения килограмма предложено определять массу на основе постоянной Планка в сочетании с определением секунды и скорости света  $c$ . Постоянная Планка  $h$  является одной из фундаментальных констант природы, как и скорость света в вакууме  $c$ .

Следует рассмотреть историю и аргументы, которые привели к решению выбора постоянной Планка в качестве определяющей константы для килограмма.

Озабоченность по поводу стабильности ИКР и/или его официальных копий вызвала дискуссию в метрологическом сообществе о новых определениях килограмма и других базовых единиц SI. Несмотря на кажущуюся простоту определения единицы килограмма как массы ИКР, на практике оно никогда не было таким простым. Одной из основных проблем была применяемая процедура очистки. Проведено тщательное и хорошо задокументированное исследование влияния очистки на массу соответствующего эталона. После очистки ИКР потерял около 57 мкг и еще 6 мкг, после очистки струей пара из дистиллированной воды. Кроме того, ИКР и другие эталоны пока-



**Рис. 1.** Разность масс национальных прототипов килограммов (темно серый) и рабочих эталонов ВРМ (серый), а также международного прототипа килограмма — горизонтальная линия при  $\Delta m = 0$

зали быстрое увеличение их массы примерно на 5 мкг в течение первых 120 дней после очистки. В связи с данным фактом был поднят вопрос о том, как следует интерпретировать определение 1889 года. В 1989 году СИРМ решил, что определение 1889 года относится к массе ИКР сразу после очистки по процедуре МБМВ.

Результаты третьей проверки килограмма (рис. 1) продемонстрировали тенденцию увеличения разности между массами ИКР и его копий в среднем примерно до 30 мкг. Основываясь на результатах этих проверок нельзя было сделать вывод о том, которая из масс изменилась, хотя казалось вероятным, что масса ИКР уменьшилась. Однако увеличение разности масс между ИКР и его копиями не было обнаружено четвертой проверкой в 2014 году, проведенной при калибровке эталонов массы, используемых для весов Киббла и эксперимента «Авогадро». Наоборот, между третьей и четвертой проверками массы оставались стабильными. Все это обусловило необходимость разработки методов контроля стабильности килограмма и перехода к абсолютному эталону массы.

Требованием к выбору констант для единиц СИ является точность определения их значения и существование связи, с точки зрения физики, между единицей и константами. Для килограмма требовалось измерение постоянной Планка с относительной неопределенностью не более  $2 \cdot 10^{-8}$  и необходимо, чтобы по крайней мере три независимых эксперимента давали согласованные значения постоянной Планка с неопределенностями не более  $5 \cdot 10^{-8}$ .

Для экспериментальной проверки связи между макроскопической массой и постоянной Планка можно использовать разные методы — «весы напряжения», сверхпроводящая магнитная левитация, эксперимент «Авогадро» или «ватт-весы».

В весах напряжения сила взаимодействия между электродами конденсатора сравнивается с весом калиброванной массы. Несмотря на то, что подоб-

ные эксперименты изначально проводились для определения постоянной Джозефсона, они также могут связать массу с постоянной Планка. Однако, с такой целью они не проводились, так как наилучшая достигнутая неопределенность была на уровне  $10^{-7}$ , что недостаточно. Динамическая версия весов напряжения для измерения инерционной массы и ее связи с постоянной Планка была разработана в Национальном институте метрологии (NIM) Китая.

В экспериментах по сверхпроводящей магнитной левитации используется диамагнитное свойство сверхпроводника: сверхпроводящий материал калиброванной массы левитирует в магнитном поле, создаваемом катушкой с током. Изменение тока приводит к изменению высоты левитации. Изменяя ток с помощью эталонов на эффектах Джозефсона и квантового Холла, обеспечивается связь между массой и постоянной Планка. Несмотря на достигнутую относительную неопределенность  $10^{-6}$ , эти эксперименты не были продолжены.

Прямая связь килограмма с атомной константой, в частности с атомной массой, достигается экспериментом с монокристаллом кремния (эксперимент «Авогадро») или эксперимента по накоплению ионов. Поскольку уровня неопределенности  $10^{-8}$  эксперимент «Авогадро» может достичь с большей вероятностью, Национальный метрологический институт Германии (PTB) сосредоточил свои усилия на нем, как координируемом на международном уровне. Эксперимент «Авогадро», также называемый рентгеновской плотностью кристаллов, т.е. методом измерения плотности кристалла по данным рентгеноструктурного анализа, позволяет напрямую определять число Авогадро  $N_A$  путем подсчета числа атомов в обогащенном изотопами кремния  $^{28}\text{S}$  монокристалле. Связь с килограммом определяется уравнением  $1 \text{ кг} = 10^3 \{N_A\} m_u$ , которое следовало из предыдущего определения моля.  $\{N_A\}$  — число Авогадро;  $m_u = 1/12 m(^{12}\text{C})$  — атомная единица массы.

«Ватт-весы» также позволяют провести измерения, связывающие постоянную Планка и макроскопическую массу посредством виртуального сравнения электрической и механической мощности. В честь изобретателя этого эксперимента Брайана Киббла, его название было заменено на «весы Киббла».

Что касается фундаментальной константы, то постоянная Планка, условно обозначаемая  $h$ , представлялась очевидным выбором. Постоянная Планка имеет единицу действия Дж с, которая равна  $\text{м}^2\text{кг с}^{-1}$ . Поскольку в предыдущей и действующей СИ секунда и метр уже определены на основе фундаментальных констант, а именно сверхтонкого расщепления основного электронного состояния атома  $^{133}\text{Cs}$  ( $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ) и скорости света

в вакууме ( $c$ ), килограмм может быть определен через постоянную Планка, при условии, что ее значение известно с неопределенностью  $10^{-8}$ . В итоге проведены несколько экспериментов, которые помогли обеспечить связь килограмма и постоянной Планка.

Итак, было два варианта, а именно: переопределение килограмма путем выбора в качестве определяющей константы постоянной Планка  $h$  или числа Авогадро  $N_A$ . Прямое определение килограмма через фиксированное число Авогадро основывается на предыдущем определении моля в SI. В любом случае определение постоянной  $N_A$  либо  $h$  с относительной неопределенностью  $10^{-8}$ , также позволило бы определить другую константу с такой же неопределенностью.

Для каждого варианта существуют свои плюсы и минусы. Плюсы для определения килограмма путем фиксации значения  $h$  приведены ниже:

1. Фундаментом нынешнего понимания физики являются теория относительности и квантовая физика. Основными константами в этих теориях являются скорость света в вакууме  $c$  и постоянная Планка  $h$  соответственно.

Скорость света  $c$  уже зафиксирована в предыдущей системе SI и остается в действующей системе SI для определения метра. Таким образом, определение килограмма фиксированным значением  $h$  дополняет определение метра, так что обе фундаментальные константы являются частью системы SI. Далее, все константы, которые появляются в фундаментальных соотношениях  $E = mc^2$ ,  $E = h\nu$  и уравнении де Бройля  $\lambda = h/p = h/mv$  имеют в этом случае точно известные значения.

2. Поскольку в действующей системе SI значение элементарного заряда  $e$  как определяющей константы для ампера, является фиксированным и, следовательно, точно известным; постоянная Джозефсона  $K_J = 2e/h$  и постоянная фон Клитцинга  $R_K = h/e^2$  также имеют точные фиксированные значения в виде  $K_J \cdot 10^{-90}$  и  $R_K \cdot 10^{-90}$ . Следовательно, традиционные ранее единицы (не входящие в систему SI), такие, как вольт  $V_{90}$  и ом  $\Omega_{90}$  также исключаются, так как теперь реализуются посредством первичной эталонной методики счета электронов, обеспечивающей прослеживаемость их напрямую до определяющих констант системы SI.

Основным недостатком выбора  $h$  в качестве определяющей константы для килограмма является отсутствие прямой связи с массой, что затрудняет ее легкое объяснение вне сообщества метрологов. Напротив, выбор числа Авогадро  $N_A$  в качестве определяющей константы для килограмма было бы намного проще, поскольку она напрямую связывает килограмм с массой, например  $m_u$ .

Для окончательного решения Генеральной Конференции Мер и Весов второй аргумент стал решающим в пользу выбора  $h$  в качестве определяющей константы для единицы массы SI.

Эксперимент «Авогадро» или эксперимент по определению плотности кристалла по данным рентгенструктурного анализа, направлен на определение числа Авогадро  $N_A$  путем подсчета количества атомов в одном моле монокристалла кремния высокой чистоты.

Число Авогадро – это количество определенных объектов в одном моле чистого вещества. Оно является коэффициентом масштабирования, который связывает атомные и макроскопические свойства.

Для идеального монокристалла чистого кремния эксперимент Авогадро связывает его массу  $m$  с количеством атомов Si, содержащихся в кристалле  $N_{Si}$  и массой атома Si  $m_{Si}$ :

$$m = N_{Si} m_{Si} = N_{Si} \frac{M_{Si}}{N_{Si}} \quad (2)$$

где  $M_{Si}$  – молярная масса Si. Для идеального монокристалла количество содержащихся атомов определяется его объемом  $V$ , поделенным на объем, занимаемый одним атомом,  $V_{Si}$ ; таким образом,

$$N_{Si} = \frac{V}{V_{Si}} = \frac{8V}{a_0^3} \quad (3)$$

где  $a_0$  – параметр решетки (постоянная решетки) и, таким образом,  $a_0^3$  – объем элементарной ячейки кристалла Si. Множитель 8 учитывает тот факт, что в идеальном монокристалле Si в элементарной ячейке содержится восемь атомов Si. Объединение этих уравнений дает

$$m = \frac{8V M_{Si}}{a_0^3 N_A} \quad (4)$$

Поскольку Si имеет три стабильных изотопа  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$  и  $^{30}\text{Si}$ , молярная масса  $M_{Si}$  определяется как среднее взвешенное суммы молярных масс изотопов  $f_i$ :

$$M_{Si} = \sum_i f_i M_{Si}^i = \sum_i f_i A_r^i M_u \quad (5)$$

где  $A_r^i$  – относительная атомная масса, а  $M_u$  – единица молярной массы. Для природного Si относительное содержание изотопов следующее:  $f_{28} = 0,922$ ,  $f_{29} = 0,047$  и  $f_{30} = 0,031$ . Окончательный вид уравнения с постоянной Планка:

$$m = \frac{8V 2R_\infty h}{a_0^3 c \alpha^2} \sum_i \frac{f_i A_r^i}{A_r^e} \quad (6)$$

где  $R_\infty$  – постоянная Ридберга,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\alpha$  – постоянная тонкой структуры и  $A_r^e$  – относительная атомная масса электрона.

Для определения постоянной Планка согласно уравнению перед пересмотром SI необходимо было измерить объем монокристалла, параметр

решетки и изотопный состав. Естественно, масса используемого монокристалла также должна определяться с необходимой точностью. Константы, входящие в уравнение, известны с достаточно малой погрешностью: скорость света в вакууме определена точно. Постоянная Ридберга, постоянная тонкой структуры и относительная атомная масса электрона известны с относительно стандартными неопределенностями  $5,9 \cdot 10^{-12}$ ,  $2,3 \cdot 10^{-10}$  и  $2,9 \cdot 10^{-11}$ , соответственно, и их вкладом в неопределенность можно пренебречь на требуемом уровне  $10^{-8}$ .

Кремний стал предпочтительным материалом благодаря его использованию в микроэлектронике, где могут быть синтезированы высокочистые и почти идеальные кристаллы большого размера. Однако, ввиду требуемой точности порядка  $10^{-8}$ , необходимой для реализации нового килограмма, совершенство и чистота кристалла (т.е. наличие дефектов (вакансий) решетки и концентрация примесей) должны быть исследованы количественно.

С целью наиболее точного определения объема макроскопического монокристалла кремния была выбрана сфера (см. рис. 2). Объем сферы может быть определен серией измерений диаметра по всей поверхности. Диаметры измеряются оптической интерферометрией. Схема специально сконструированного сферического интерферометра Физо представлена на рис. 3. Центральная часть состоит из вакуумной камеры с регулируемой температурой, содержащей шар и оптику Физо. Два плеча интерферометра освещаются светом плоской волны, исходящим от перестраиваемых диодных лазеров через многомодовые оптические волокна.

Объективы Физо тщательно отрегулированы таким образом, чтобы их фокус был в центре сферы. Сначала измеряется диаметр пустого эталона  $D$ , а затем расстояния между поверхностью сферы и опорными поверхностями  $d_1$  и  $d_2$ . Диаметр сферы  $d$  затем получается путем вычитания  $d_1$  и  $d_2$  из  $D$ . С помощью этой техники можно одновременно измерить около 10 000 диаметров. Сфера может вращаться вокруг горизонтальной и вертикальной осей, чтобы полностью покрыть ее. Достижимая точность существенно зависит от того, насколько хорошо форма сферы соответствует волновому фронту света интерферометра. Таким образом, наиболее важными проблемами являются качественные объективы и создание почти идеальной сферы. Так как поверхность сферы обычно покрыта различными поверхностными слоями, это необхо-

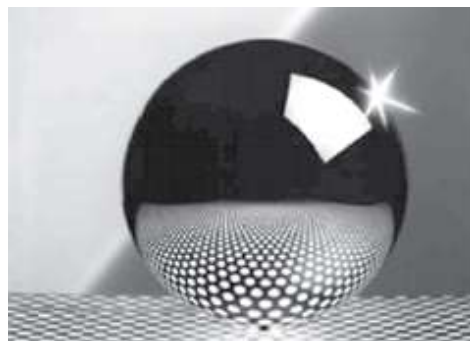


Рис. 2. Фотография монокристаллической кремниевой сферы, использованной с эксперименте Авогадро. Диаметр и масса, соответственно, составляют около 10 см и 1 кг. Источник: РТВ

димо учитывать не только для коррекции массы, но и для оценки результатов интерферометрии из-за разного показателя преломления и получаемых сдвигов фазы.

Состав и толщина поверхностного слоя сфер Si должны определяться как для коррекции массы, так и для определения объема. Для коррекции массы используется только относительная масса соответствующих элементов по отношению к Si, и, таким образом, прослеживаемость по отношению к эталону массы не требуется. Однако, поскольку поверхностный слой может содержать не только различные оксиды кремния ( $\text{SiO}_x$ ), но, возможно, также абсорбированную воду и другие загрязнители, применяются аналитические методы.

Для измерения параметра решетки использован комбинированный оптический и рентгеновский интерферометр, который состоит из трех монолитно изготовленных параллельных пластин из монокристаллического кремния, каждая из которых имеет толщину около 1 мм, и которые разделены одинаковым расстоянием. Поверхность этих пластин перпендикулярна измеряемым слоям решетки.

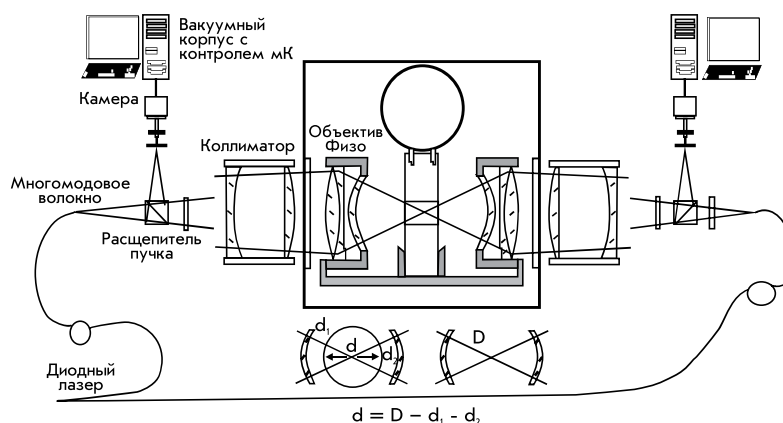


Рис. 3. Схематический чертеж сферического интерферометра Физо, изготовленного в РТВ. Источник: РТВ

Наконец, необходимо определить соотношение атомных масс кремния с его конкретным изотопным составом и электроном. В рамках определения числа Авогадро выяснилось, что неопределенность измерения молярной массы природного кремния, составляющая примерно  $3 \cdot 10^{-7}$ , ограничивает достижимую точность. Поэтому было решено создать монокристалл высокой чистоты с высокообогащенным  $^{28}\text{Si}$ , с минимальным содержанием  $^{29}\text{Si}$  и  $^{30}\text{Si}$ .

Для эксперимента «Авогадро» были изготовлены два высококачественных монокристалла  $^{28}\text{Si}$ . Первый монокристалл  $^{28}\text{Si}$  массой 5 кг с маркировкой «AVO28» был изготовлен в 2004–2007 годах. Производство проходило в несколько этапов, начиная с обогащения газа  $\text{SiF}_4$  путем центрифугирования в Научно-техническом центре (Центротех) в Санкт-Петербурге и в Институте химии технологий высокочистых веществ Российской академии наук (ИХВВ РАН) в Нижнем Новгороде был выращен поликристалл, который был преобразован в монокристалл  $^{28}\text{Si}$  массой 5 кг. Из монокристаллического стержня в CSIRO, Австралия, были изготовлены две точные сферы для последующего определения числа Авогадро.

В 2012 году РТВ начал новый проект под названием kg-2 по производству двух дополнительных кристаллов  $^{28}\text{Si}$  по 5 кг. Изотопное обогащение снова было проведено в России. Последующие этапы производства были такими же, как и для «AVO28», за исключением того, что сферы производились в РТВ. Первые кристаллы этого производства с обогащением 99,9985 % стали доступны в 2015 году, и были изготовлены три сферы для экспериментального определения числа Авогадро в РТВ и Национальном метрологическом институте Японии (NMIJ).

Молярная масса обогащенного кристалла Si определена с относительной неопределенностью  $1,4 \cdot 10^{-9}$ .

Результаты для трех различных сфер, созданных с использованием нового кристалла  $^{28}\text{Si}$ , различались всего лишь на  $7 \cdot 10^{-9} N_A$ . Среднее значение числа Авогадро составляет  $N_A = 6,022140526(70) \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$  с неопределенностью  $1,2 \cdot 10^{-8}$ .

**Эксперимент с весами Киббла** также обеспечивает прямую связь между макроскопической массой и постоянной Планка. Основная идея этого эксперимента была впервые предложена Кибблом и реализована в Национальной физической лаборатории, NPL, Великобритания и в Национальном институте эталонов и технологий NIST, США.

Эксперимент с весами Киббла выполняется двумя вариантами (рис. 4). Рассмотрим две катушки: одна (катушка 1), по которой проходит ток,  $I_1$ , является неподвижной, а другая (катушка

2), по которой проходит ток,  $I_2$ , подвижна в вертикальном направлении (верхняя левая часть рис. 4). Вертикальная составляющая силы, приложенной к подвижной катушке  $F_z$ , определяется уравнением

$$F_z = I_2 \frac{\partial \Phi_{12}}{\partial z} \quad (7)$$

где  $\partial \Phi_{12} / \partial z$  – вертикальный градиент магнитного потока, создаваемого током, протекающим через катушку 1. Эту силу можно уравновесить (режим силы), подключив катушку 2 к весам, нагруженным соответствующей массой, так что  $mg = -Fz$  ( $g$  – местное ускорение свободного падения). Таким образом,

$$mg = -I_2 \frac{\partial \Phi_{12}}{\partial z} \quad (8)$$

В варианте режима скорости вторая катушка представляет собой разомкнутую цепь, и наведенное напряжение измеряется при ее вертикальном перемещении с постоянной скоростью  $v_z$ . Наведенное напряжение определяется уравнением

$$U_2 = -\frac{\partial \Phi_{12}}{\partial t} = -\frac{\partial \Phi_{12}}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{\partial \Phi_{12}}{\partial z} v_z \quad (9)$$

Объединение уравнений дает  $mgv_z = I_2 U_2$ .

В данном уравнении механическая мощность приравнивается к электрической.

Поскольку данный эксперимент разделен на два этапа, на самом деле он представляет собой виртуальное сравнение электрической и механической мощности.

Напряжение  $U$  измеряется с помощью эталона напряжения Джозефсона, ток  $I$  измеряется как падение напряжения на резисторе  $R$ .

Объединенное уравнение

$$m = \frac{C}{4} f_{j,1} f_{j,2} \frac{h}{gv_z} \quad (10)$$

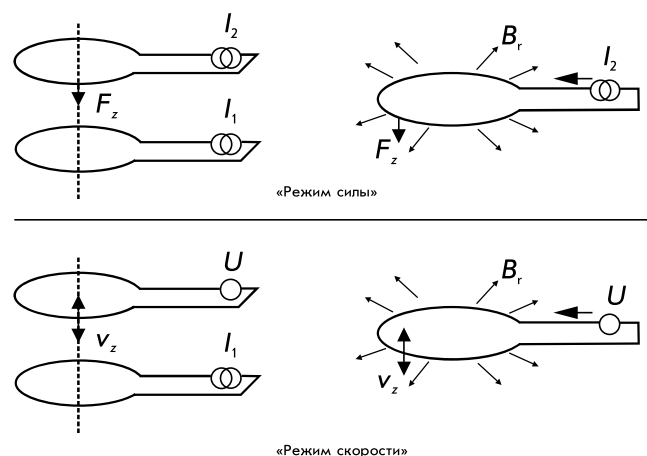


Рис. 4. Принцип эксперимента с весами Киббла

где  $C$  – переменный коэффициент  $f_{j,1}$  и  $f_{j,2}$ ; – частота Джозефсона при измерениях напряжения,  $h$  – постоянная Планка,  $g$  – ускорение свободного падения места эксперимента,  $v_z$  – скорость перемещения катушки, является фундаментальным уравнением весов Киббла, связывающим макроскопическую массу с постоянной Планка, соответствующей уравнению в эксперименте «Авогадро». Поскольку ни одна из величин в правой части уравнения не требует прослеживаемости по отношению к эталону массы, эксперимент с весами Киббла также может служить первичным воспроизведением килограмма. Величины, которые должны быть измерены в эксперименте с весами Киббла – это частоты Джозефсона  $f_{j,1}$  и  $f_{j,2}$ ; ускорение свободного падения  $g$  и скорость  $v_z$ . Для определения постоянной Планка должна быть также измерена масса.

Около 10 лабораторий имеют действующие или строящиеся весы Киббла, включая NIST США, Национальный институт эталонов Канады (NRC), Швейцарский федеральный институт метрологии (METAS), Национальную лабораторию метрологии (LNE) Франции, Лабораторию эталонов Новой Зеландии (MSL), Корейский научно-исследовательский институт эталонов и науки (KRISS), Национальный метрологический институт Турции (UME) и МБМВ. Несмотря на то, что они основаны на одном и том же базовом принципе, описанном ранее, они отличаются своей конструкцией.

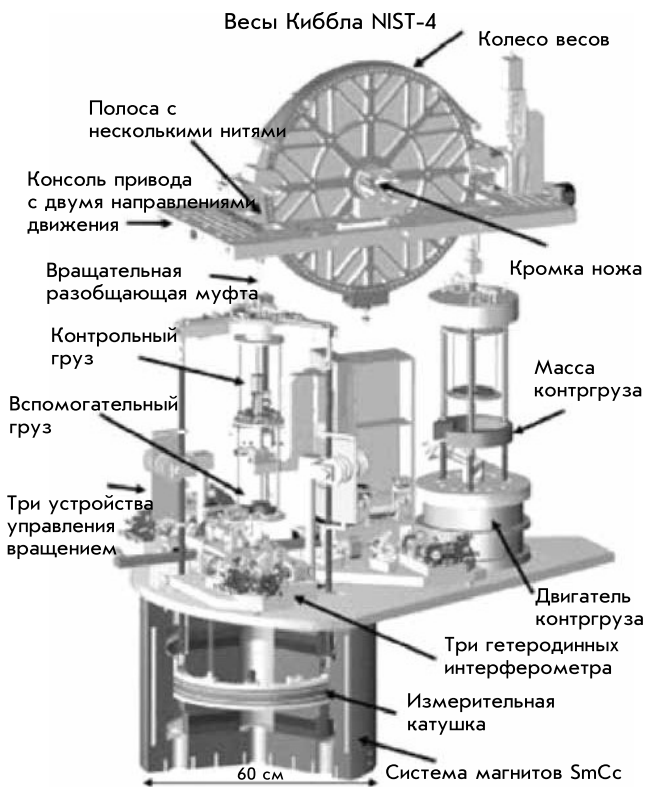


Рис. 5. Схематическое представление весов Киббла NIST

В качестве примера на рисунке 5 показан схематический чертеж весов Киббла Национального института эталонов и технологий США.

Институты метрологии METAS, NPL, NIST, NRC и другие сообщили измеренные значения постоянной Планка с минимальной неопределенностью  $9 \cdot 10^{-9}$ .

Целевая группа CODATA провела специальную обработку и корректировку значений физической константы методом наименьших квадратов (рис. 6).

Значение определяющей константы  $h$  действующей SI составляет:

$$h = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ Дж с.}$$

Это значение было округлено с выбором минимального количества цифр, что обеспечивает согласованность нынешней и действующей SI. Определяющая константа не имеет неопределенности. Относительная неопределенность значения CODATA  $1,0 \cdot 10^{-8}$  переносится на ИКР.

### Воспроизведение, поддержание и распространение килограмма

В предыдущей SI международный прототип килограмма, хранящийся в МБМВ, был единственным источником килограмма. Теперешнее определение килограмма не подразумевает какого-либо конкретного метода и источника его воспроизведения. Любой метод, который позволяет определить численное значение эталонной массы, прослеживаемое к значению определяющей постоянной Планка (включая определение метра и секунды), может быть первичным методом. На данный момент есть два экспериментальных метода, которые доказали способность

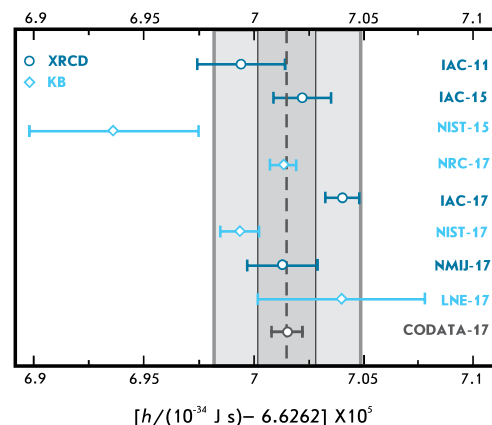


Рис. 6. Значения постоянной Планка, полученные из эксперимента с весами Киббла (KB) и эксперимента Авогадро (плотность кристалла по данным рентгеноструктурного анализа) вместе со значением CODATA 2017. Зеленая полоса соответствует  $\pm 2$  части на  $10^8$ , а внешняя серая полоса соответствует  $\pm 5$  частей на  $10^8$ . Источник: © Международное бюро мер и весов

воспроизвести килограмм с требуемой относительной стандартной неопределенностью в  $10^{-8}$ . Это было подтверждено предварительным исследованием, организованным МБМВ «Сравнение реализаций килограмма», которое проводилось в 2016-2017 годах до переопределения килограмма. В рамках этого предварительного исследования проведено ключевое сравнение реализации килограмма пятью участвующими национальными метрологическими институтами, а именно: LNE (Франция), NIST (США), NMIJ (Япония), NRC (Канада) и PTB (Германия). LNE, NIST и NRC использовали весы Киббла; NMIJ и PTB использовали сферы из обогащенного  $^{28}\text{Si}$ . Результаты продемонстрировали хорошее согласие. Однако результаты по определению постоянной Планка, показанные на рис. 6, которые были опубликованы по завершении предварительного исследования, показали, что некоторые из них не согласуются в пределах заявленных неопределенностей, что вызывает разногласия. Применение меньших неопределенностей привело бы к несогласованности различных воспроизведений килограмма, что было бы неприемлемо для обеспечения гармонизированной глобальной шкалы массы. Для решения данной проблемы предложено, чтобы деятельность национальных метрологических институтов по воспроизведению и передаче единицы массы была на основе временного «согласованного значения» вместо своей местной реализации. Это согласованное значение должно быть получено на основе ключевых сличений в соответствии с положениями Соглашения о взаимном признании СИПМ (СИПМ МРА).

Для самостоятельного воспроизведения единицы массы одним из двух приведенных выше методов необходимо повторить эксперимент «Авогадро» или создать собственные весы Киббла, для чего потребуются затраты в несколько десятков миллионов долларов. Не каждая страна способна на такие вложения.

Национальный метрологический институт, самостоятельно не воспроизводящий единицу, может получить прослеживаемость от воспроизводящего килограмм национального метрологического института путем калибровки своего эталона массы, поскольку это является обычной практикой во всех областях метрологии. Массовое распространение единицы также может быть обеспечено Международным бюро мер и весов с его ранее откалиброванным «набором исходных эталонов единицы

массы» (ERMS) и рабочими эталонами. Сравнение предыдущей и нынешней цепочки прослеживаемости килограмма показано на рис. 7. Основным изменением является замена ИРП, который, по определению, имел нулевую погрешность, первичной реализацией килограмма (в настоящее время путем экспериментов с весами Киббла или экспериментов «Авогадро» с возможностью подключения других экспериментов), что даст неопределенность не превышающей 10 мкг. Кроме того, поскольку эксперимент с весами Киббла и эксперимент «Авогадро» проводятся в вакууме, необходимо включать поправку на перенос из вакуума в воздух. Все это приводит к повышенной неопределенности для конечного пользователя, что, однако, по-прежнему удовлетворяет потребности передовых калибровочных лабораторий.

Сборник всех соответствующих публикаций, касающихся настоящего определения килограмма, можно найти в брошюре «The Focus Issue of Metrologia: Realization, Maintenance, and Dissemination of the Kilogram (Ключевые вопросы метрологии: реализация, поддержание и распространение килограмма).

После успешного перехода на новое определение килограмма и новый метод его воспроизведения, способы и средства передачи единицы останутся прежними, т.к. гири высоких классов точности являются простыми по конструкции, относительно недорогими и высокостабильными средствами измерений массы. Изменилось определение, метод воспроизведения килограмма и условия передачи и хранения платино - иридиевых копий.

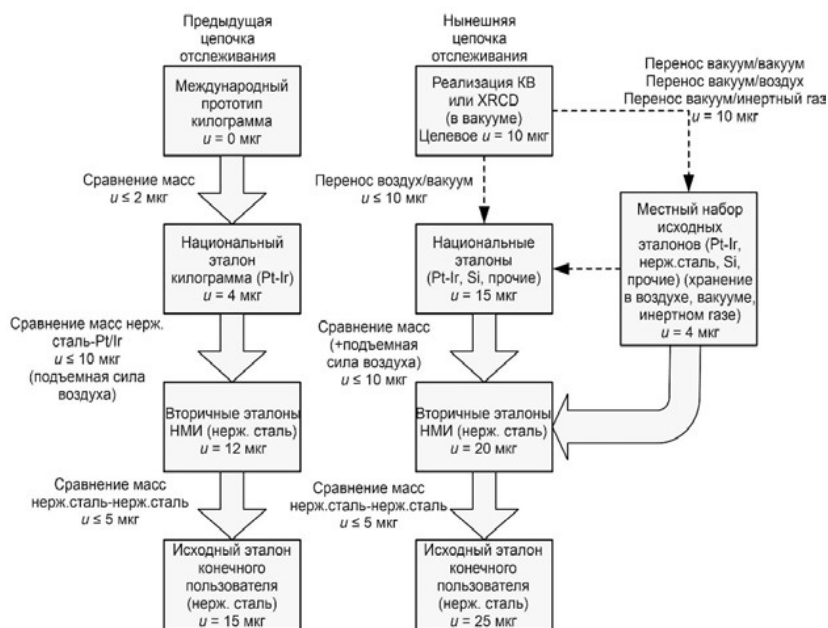


Рис. 7. Предыдущая и нынешняя цепочки для распространения килограмма

Кроме того, переопределение единицы массы позволяет реализовывать единицу массы любого номинального значения гири (не только 1 килограмм) и, таким образом, дает возможность улучшить прослеживаемость для парка приборов и уменьшить неопределенность измерений малых значений массы гирь.

Система передачи единицы массы претерпит существенные изменения: она будет осуществляться через ватт-весы или кремниевые сферы к международному прототипу килограмма K1 и от него к национальным прототипам (первичным эталонам из платино-иридия и кремния), распределяться через вторичные эталоны из нержавеющей стали и другие артефакты.

МБМВ по-прежнему будет оказывать услуги по калибровке эталонов массы, результаты которых со времени переопределения килограмма должны будут прослеживаться к опорному значению, полученному путем сличения первичных реализаций килограмма.

Следует отметить, что переопределение килограмма потребует разработки нового оборудования и технологий лишь от тех НМИ, которые хотели бы самостоятельно реализовывать определение килограмма, данное в системе SI, и от самого МБМВ. Данный процесс не затронет все остальные НМИ, если не считать того, что в будущем они смогут обеспечивать прослеживаемость не только к МБМВ, но и к ряду других НМИ.

### **Национальный эталон массы Республики Беларусь**

В настоящее время в состав Национального эталона единицы массы Республики Беларусь НЭ РБ 15-05 входят: эталонные гири из нержавеющей стали номинальной массы 1 кг КГЭ-1 № 5 и 1 кг E<sub>1</sub> № 15918, наборы эталонных гирь с номинальным значением массы от 1 мг до 500 мг и от 1 г до 500 г класса точности E<sub>1</sub>, а также эталонные компараторы массы C5S (Max = 5 г и d = 0,1 мкг), AX106 (Max = 111 г и d = 1 мкг), AT1005 (Max = 1 109 г и d = 0,01 мг).

Расширенная неопределенность эталонных гирь номинальной массой 1 кг, входящих в состав Национального эталона единицы массы не превышает ±0,05 мг.

Национальный эталон единицы массы Республики Беларусь НЭ РБ 15-05 прослеживается до копии Международного прототипа килограмма (МПК) № 12, входящего в состав Государственного первичного эталона единицы массы РФ ГЭТ 3-2020 Российской Федерации. Копия МПК № 12 один раз в двадцать лет сличается с Международным прототипом килограмма, хранящимся в Международном бюро мер и весов.

Республика Беларусь обеспечивает участие

своих государственных эталонов в международных сличениях, проводимых техническими комитетами КООМЕТ (Евро-Азиатское сотрудничество государственных метрологических учреждений), что позволяет выполнять международные обязательства по признанию эквивалентности эталонов и сертификатов калибровки и измерений. Результаты оценки эквивалентности национальных эталонов публикуются в Международной базе данных ключевых сличений Международного бюро мер и весов (Kcdb BIPM) (<http://kcdb.bipm.org/>) в виде информации о результатах ключевых и региональных сличений эталонов, подтверждающих высокую точность измерений.

БелГИМ принимал участие в сличениях по теме КООМЕТ 258/RU/02 «Ключевые сличения в области измерения кратных и дольных единиц килограмма». Результатом сличений является размещение в базе данных МБМВ 6 СМС строк.

В настоящее время БелГИМ принимает участие в дополнительных сличениях в области измерения массы COOMET.M.M-S6, что позволит увеличить количество СМС строк в базе данных МБМВ.

Ежегодно проводятся работы по исследованию национального эталона.

Визуально изменение массы гирь 1 кг КГЭ-1 № 5 и 1 кг E<sub>1</sub> № 15918, входящих в состав Национального эталона единицы массы, можно проанализировать по графикам нестабильности. Гиря КГЭ-1 № 5 откалибрована 13.10.2022 во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» на Государственном первичном эталоне единицы массы РФ ГЭТ 3-2020.

В декабре 2022 в результате исследований Национального эталона единицы массы Республики Беларусь было установлено, что средняя скорость дрейфа эталонной гири составляет –  $1,57 \cdot 10^{-3}$  мг; СКО средней скорости дрейфа 0,0011 мг/мес. Исследование охватывает 16 межкалибровочных интервалов с 1986 года. Нестабильность гири за последний межкалибровочный интервал составила – 0,038 мг.

Из графиков видно, что с течением времени Национальный эталон, хоть и незначительно, но постоянно изменяет свою массу. В связи с этим, необходимо и планируется изготовить и включить в состав Национального эталона единицы массы дополнительную гирю, номинальной массой один килограмм, которая сможет сыграть роль эталона-копии, с последующим сличением ее не только с Государственным первичным эталоном единицы массы Российской Федерации, но и с копией МПК, принадлежащей МБМВ. Исключение дополнительного звена в прослеживаемости, положительно повлияет на точностные характеристики Национального эталона единицы массы.

Приоритетным направлением деятельности БелГИМ является уменьшение неопределенности



Таблица 1

Гиря 1 кг КГЭ-1 № 5

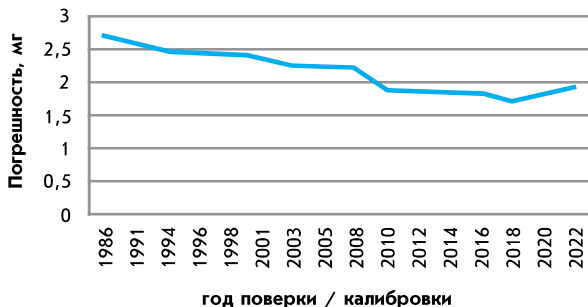
Дата калибровки/поверки	1986	1991	1994	1996	1998	2001	2003	2005	2008	2010	2012	2014	2016	2018	2020	2022	Средняя скорость дрейфа, мг	Нестабильность за последний межкалибровочный интервал, мг
Погрешность гири, мг	2,67	2,55	2,47	2,46	2,41	2,36	2,24	2,24	2,21	1,89	1,86	1,84	1,83	1,73	1,82	1,92	-1,57E-03	-0,038

Таблица 2

Гиря 1 кг E<sub>1</sub> № 15918

Дата калибровки/поверки	2001	2004	2006	2009	2011	2013	2015	2017	2019	2021	Средняя скорость дрейфа, мг	Нестабильность за последний межкалибровочный интервал, мг
Погрешность гири, мг	0,23	0,23	0,29	-0,14	-0,19	-0,36	-0,36	-0,34	-0,30	-0,13	-9,94E-07	-0,025

График нестабильности массы эталонной гири 1 кг КГЭ-1 № 5



БелГИМ планирует начать исследование магнитных свойств гирь класса точности E<sub>2</sub> (магнитная восприимчивость, остаточная намагниченность).

Национальный эталон единицы массы Республики Беларусь находится в процессе постоянного развития, которое отражает потребности промышленности, а также науки и техники Республики Беларусь.

Список использованной литературы

1. Гёбель Эрнст О. Новая Международная система единиц (SI). Квантовая метрология и квантовые эталоны. Перевод с английского / Эрнст О. Гёбель, Уве Зигнер ; науч. ред. пер.: В. Л. Гуревич, Н. А. Жагора. – Минск : БелГИМ, 2021. – 324 с. – (Серия «Метрология за рубежом»). ISBN 978-985-6726-77-7.

График нестабильности массы эталонной гири 1 кг E<sub>1</sub> № 15918



измерений путем приобретения автоматического компаратора массы с Max = 1011 г и d = 0,001 мг, а кроме того, продолжение участия в ключевых сличениях с НМИ других стран для международного признания.

**Наталья Леонидовна КАМКОВА,**  
начальник производственно-исследовательского отдела измерений механических величин БелГИМ;  
**Николай Адамович ЖАГОРА,**  
ведущий инженер по метрологии, НИОЗТМ, НТП БелГИМ, д.т.н.

Дата поступления 15.08.2023