

Переопределение моля и результаты измерений постоянной Авогадро методом кристаллических кремниевых шаров

В. Д. ИВАЩУК¹, Л. К. ИСАЕВ¹, С. А. КОНОНОВ¹, В. Н. МЕЛЬНИКОВ¹,
В. В. ХРУЩЕВ^{1, 2}

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы,
Москва, Россия,

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Москва, Россия, e-mail: ivashchuk@mail.ru

Обсуждаются последние результаты измерений постоянной Авогадро методом кристаллических кремниевых шаров в связи с планируемым переходом на новое определение основной единицы СИ — моля.

Ключевые слова: переопределение основных единиц СИ, постоянная Авогадро, метод кристаллических кремниевых шаров, количество вещества, моль.

The recent data of Avogadro constant measurement by crystal silicon spheres method in connection with the planned transition on new definition of the basic SI unit — the mole is discussed.

Key words: redefinition of the SI base units, Avogadro constant, crystal silicon spheres method, amount of substance, mole.

Понятие количества вещества, которое отличается от массы и числа единиц вещества, возникло в работах химиков XVIII в. Термин «моль» для единицы количества вещества был введен В. Оствальдом в 1893 г. Это слово было образовано от первой части немецкого *molekul* (молекула).

В Международную систему единиц (СИ) моль был введен в 1971 г. на XIV ГКМВ как основная единица количества вещества. По определению согласно Резолюции 3: моль — количество вещества системы, которое содержит столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в 0,012 кг ¹²C. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами, другими частицами или группами таких частиц. В 1980 г. Международный комитет по мерам и весам утвердил доклад Консультативной комиссии, в котором уточнялось, что при определении моля атомы ¹²C считаются несвязанными, находящимися в состоянии покоя и основном квантовом состоянии [1].

Как следует из приведенного определения, молярная масса $M(^{12}\text{C}) = 0,012 \text{ кг/моль}$ или 12 г/моль . При определении моля также вводится фундаментальная физическая константа (ФФК), а именно постоянная Авогадро N_A , равная числу атомов в 0,012 кг ¹²C. В настоящее время реформа СИ предполагает переопределение килограмма, ампера, кельвина и моля на основе фиксированных значений ФФК [2—4]. Выбор совокупности ФФК для переопределения четырех основных единиц СИ можно произвести с помощью критериев стабильности, преемственности и т. д. [5, 6], причем в любую совокупность ФФК входит постоянная Авогадро N_A , которая должна быть измерена с точностью на уровне 10^{-8} .

Для точного измерения N_A был реализован Международный координационный проект Авогадро (IAC) с участием следующих институтов: BIPM, INRIM (Италия), IRMM (Бельгия), NIST (США), NMIA (Австралия), NMIJ/AIST (Япония), NPL (Великобритания) и PTB (Германия). Проект начался в 2004 г. и

завершился в апреле 2011 г. Целью проекта было измерить N_A с относительной стандартной неопределенностью $u_r \leq 2 \cdot 10^{-8}$. Однако поставленная цель не была достигнута: $N_A = 6,02214082(18) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ была измерена с $u_r = 3 \cdot 10^{-8}$. Кроме того, в экспериментах NIST (2007) и IAC (2011) были получены значения постоянных Авогадро N_A и Планка h , которые не согласовывались между собой в пределах заявленных неопределенностей [7, 8]. В настоящее время причины этого до конца не выяснены [9], поэтому в экспериментах с кристаллическими кремниевыми шарами и ватт-весами необходимо дополнительно оценивать достоверность полученных результатов, а также повторять и уточнять используемые при этом процедуры измерений.

Определение постоянной Авогадро в рамках проекта kNOW для реализации нового определения килограмма.

1 сентября 2012 г. Европейская ассоциация национальных метрологических институтов (EURAMET) начала исследования в рамках объединенного исследовательского проекта SIB03 kNOW (kilogram NOW). Цель проекта — выявить причины расхождения полученных значений N_A и h . Европейская метрологическая исследовательская программа (EMRP) поддерживает этот проект, который рассчитан на 3 года. В проекте участвуют специалисты из Европы и Японии, координатором проекта является Джованни Манна (Giovanni Mana, INRIM, Италия).

Причиной расхождения результатов в указанных экспериментах могут быть неучтенные систематические неопределенности, а также использование недостаточно общих теоретических моделей и формул при выводе рабочих соотношений для определения величин. В проекте kNOW предполагалось с помощью методов наивысшей точности заново определить значения N_A и h , уменьшив u_r до $1,5 \cdot 10^{-8}$ [10]. Однако к началу 2015 г. намеченную точность результатов проекта kNOW не удалось достичь [11].

Основные требования при измерениях параметров кристаллических кремниевых шаров для достижения необходимой точности определения постоянной N_A следующие: u_r при измерениях $M(^{12}\text{C})$, массы шара, числа атомов в кристаллической ячейке и параметра решетки, сферичности поверхности должны составлять соответственно $4,4 \cdot 10^{-9}$, $0,8 \cdot 10^{-8}$, $0,2 \cdot 10^{-8}$, $0,6 \cdot 10^{-8}$.

В таблице приведены главные составляющие суммарного бюджета неопределенностей измерений постоянной N_A с помощью кристаллического шара AVO28-S5 (далее — S5), высокообогащенного ^{28}Si , в рамках проведения IAC [8]. При этом введены следующие обозначения: D_m — измеряемый диаметр сферы при $t_{90} = 20^\circ\text{C}$; $p = 0$ Па; m_{SL} — масса поверхностных слоев шара в вакууме; d_{220} — измеряемый интервал {220}-плоскости решетки при расстоянии по оси 306 мм при $t_{90} = 20^\circ\text{C}$, $p = 0$ Па.

Главные вклады в суммарный бюджет неопределенностей измерений постоянной Авогадро с помощью кристаллического шара AVO28-S5

Величина	Значение	Неопределенность	
		стандартная	относительная, %
D_m , м	0,093722972000	$900 \cdot 10^{-12}$	65,8
m_{SL} , кг	$222,0 \cdot 10^{-9}$	$14,5 \cdot 10^{-9}$	16,7
d_{220} , м	$192,014712670 \cdot 10^{-12}$	$670 \cdot 10^{-21}$	8,7
M , кг/моль	0,027976970260	$220 \cdot 10^{-12}$	4,9

Наибольшие вклады в суммарный бюджет неопределенностей связаны с точностью измерений сферической поверхности шара и ее шероховатости, массы поверхностных слоев шара, параметра кристаллической решетки и молярной массы кремния. Совокупность этих вкладов, среди которых главным является вклад, связанный с неточностью определения диаметра шара, не позволила достичь $u_r = 2 \cdot 10^{-8}$.

В результате проведения IAC было определено значение N_A с $u_r = 3 \cdot 10^{-8}$ [8], в то время как u_r значения h , определенная ранее NIST с помощью ватт-весов, составила $5 \cdot 10^{-8}$ [7]. В настоящее время метод кристаллических кремниевых шаров является одним из наиболее точных и перспективных для реализации единиц массы и количества вещества [6].

Рассмотрим более подробно результаты проекта kNOW, относящиеся к уточнению и проверке результатов проекта IAC по измерению N_A методом кристаллических кремниевых шаров [10, 11].

Результаты измерений молярной массы кремния. При проведении IAC для изготовления кремниевых сфер [8] был получен тетрафторид ^{28}Si с обогащением более 99,99 %, что с учетом ограничений по срокам производства и стоимости может быть осуществлено только в РФ. Требуемый поликристаллический образец ^{28}Si массой около 7 кг был создан сотрудниками ЦЕНТРТЕХ (С.-Петербург) и ИХСЧВ РАН (Н. Новгород) и отправлен в Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ, Берлин). Здесь окончательно был выращен необходимый монокристаллический образец из материала AVO28 массой около 5 кг, из которого впоследствии были произведены два шара, получившие метки AVO28-S5 (S5) и AVO28-S8 (S8).

Молярную массу M монокристаллического образца из ^{28}Si в PTB впервые измеряли новым способом, представляющим комбинацию модифицированной изотопной масс-спектрометрии при высоком разрежении (IDMS) с использованием многоколлекторного плазменного масс-спектрометра высокого разрешения с индукционной связью (MS-ICP-MS) [11]. Необходимо отметить, что в проекте «Авогадро» молярную массу используемого кремния измеряли во многих институтах разными методами, например в Institute for Reference Materials and Measurements (IRMM, Бельгия), Институте физики микроструктур РАН (ИФМ, Россия), Institute for Mineral Resources (IMR, Китай). Однако только PTB представил полный бюджет неопределенностей, к тому же эти результаты были совместимы с результатами указанных институтов.

При вычислении M высокообогащенного ^{28}Si образца учитывали поправки на наличие в образцах примесей, в частности, двух других изотопов кремния — ^{29}Si , ^{30}Si . Неопределенности, связанные с определением M используемого образца, дали вклад на уровне 5 % от общей неопределенности конечного результата. Полученные в PTB значения M для двух шаров S5, S8 составили 27,97697026(15) и 27,97697029(16) г/моль, соответственно [8].

В результате эксперимента kNOW были получены следующие значения [11]: $M(\text{Si}) = 27,976\,970\,22(17)$ г/моль с $u_r = 6,1 \cdot 10^{-9}$. Определенное значение отличается как минимум на $4 \cdot 10^{-8}$ г/моль от M кремния-28, используемого в проекте IAC.

Результаты измерений параметра кристаллической решетки образца XRCD-методом. Параметр d_{220} кристаллической решетки кремния определяется с помощью комбинированной рентгеновской и оптической интерферометрии. Между длиной a ребра ячейки кубической кристаллической

решетки кремния и параметром d_{220} существует связь: $d_{220} \sqrt{8} = a$.

Неопределенности значений d_{220} вносят заметный вклад в суммарную неопределенность конечного результата (около 9 %) [8]. Эти значения, приведенные к стандартным условиям (20°C , 0 Па), были получены в INRIM (Италия) при проведении интерферометрических измерений пластины из материала AVO28. Совершенство кристаллической решетки проверяли в INRIM вдоль линии длиной 5 см. Дополнительные измерения параметра кристаллической решетки материала, проведенные в NIST (США), дали результаты, практически совпадающие с результатами INRIM [12]. Так как измерения в NIST и INRIM проводили с кусочками материала, взятого из разных частей исходного монокристаллического образца, совпадение результатов измерений еще раз подтверждает однородность монокристалла.

Среднее результатов восьми серий измерений, каждая из которых состояла из 50 измерений вдоль кристаллической пластины, следующее: $d_{220} = 192,014712670(670) \cdot 10^{-12}$ м с $u_r = 3,5 \cdot 10^{-9}$ [11]. Полученное значение совпадает со значением параметра d_{220} , используемым в проекте IAC [8].

Результаты измерений объема и массы шара. Выращенный в IKZ монокристаллический образец массой 5 кг — это болванка, утолщенная в двух местах и предназначенная для создания двух шаров, а также для изготовления дополнительных образцов, необходимых для измерений параметров используемого материала. В Австралийском центре точной оптики (ACPO) после разреза болванки и грубой обработки шаров их полировали и контролировали точность и

шероховатость сферической поверхности. Этот ответственный этап работ требует не только высокоточных инструментов и приборов, но также и участия уникальных специалистов, усилиями которых можно добиться необходимых показателей качества сферической поверхности. Несмотря на принятые меры предосторожности, неопределенности результатов этого этапа работ оказались доминирующими в общем результате, их относительный вклад оказался более 60 % [8]. Действительные диаметры шаров S5, S8, включая поверхностный слой, в стандартных условиях оказались равны 9,37229779(19) и 9,37222556(17) см, соответственно, причем отклонения от среднего значения диаметра в отдельных местах достигали около 60 нм по глубине и 35 нм по высоте.

Отсюда можно сделать вывод, что достижение номинальных геометрических параметров шаров, связанных с качеством их сферической поверхности, таким как амплитуда отклонения от среднего диаметра шара, является определяющим фактором для получения требуемой точности определения N_A . Данные по этим параметрам могут быть получены при проведении интерферометрической топографии поверхности шаров. Такие интерферометрические измерения как в воздухе, так и в вакууме проводили в BIPM, PTB и NMIJ [13]. Затем в PTB дополнительно измеряли массу высокоточными компараторами и объем шаров, поверхность которых была очищена от металлического загрязнения, возникшего при полировке [11].

Массу основного объема кристалла находили по формуле

$$m_{\text{осн}} = m_{\text{и}} - m_{\text{о}} - m_{\text{д}} - m_{\text{п}},$$

где $m_{\text{и}}$ — измеренная масса кристалла; $m_{\text{о}}$ — масса оксида кремния, находящегося на поверхности шара; $m_{\text{д}}$ — масса точечных дефектов кристалла; $m_{\text{п}}$ — масса поверхностного загрязненного слоя. Все эти поправки измеряли в дополнительных сериях. Стандартная неопределенность всех измерений была ниже 5 мкг. Средние значения масс для шаров S5 и S8 соответственно составили 1,0000877724(41) и 1,0000647307(41) кг.

Шары, очищенные в PTB от поверхностного загрязненного слоя, получили названия S5b и S8b. При этом потеря массы составила около 9 мкг. В результате измерений была получена масса основного объема шара S8b $m_{\text{осн}} = 1,000055828(17)$ кг с $u_r = 1,6 \cdot 10^{-8}$ [11].

Наибольшую трудность представляет измерение объема V шара в серии многочисленных измерений его диаметра с абсолютной погрешностью порядка диаметра атома кремния. Для этого использовали интерферометр со сферической симметрией, на котором были проведены сотни тысяч измерений. Высокоточными термометрами, откалиброванными в двух точках температурной шкалы ITS-90 при 0 и 30 °C, измеряли температуры шаров. В результате измерений были получены диаметры D и основные объемы V шаров [11]:

$$D_{S5} = 93722971,7(11) \text{ нм}, V_{S5} = 431059,0566(158) \text{ мм}^3;$$

$$D_{S8} = 93722251,1(9) \text{ нм}, V_{S8} = 431049,1131(117) \text{ мм}^3;$$

$$D_{S8b} = 93721978,4(13) \text{ нм}, V_{S8b} = 431045,350(18) \text{ мм}^3.$$

Диаметр шара, подвергнутого травлению, уменьшился приблизительно на 273 нм. Вычисление V шаров и их неопределенностей представляет сложную процедуру, использующую разложение по сферическим гармоникам. Результаты этой процедуры и дают основной вклад в общую неопределенность измерения постоянной Авогадро.

Результаты измерений постоянной Авогадро, полученные с помощью методов наивысшей точности. В методе кремниевых шаров подсчет атомов кремния предполагает получение количественной информации о числе и видах примесей в кремнии, а также о влиянии примесей и дефектов кристаллической решетки на массу и объем шара. При этом контроль точности сферической поверхности требует новейших оптических интерферометров и средств поддержания параметров окружающей среды в необходимых пределах.

Отметим, что измерения массы, объема и параметров поверхности проводили непосредственно с использованием шаров S5 и S8, тогда как измерения параметров кристаллической решетки, изотопного состава, следовательно, и молярной массы, а также неоднородностей и дефектов кристаллической решетки — с помощью образцов, взятых из начального образца материала AVO28. Предполагалось, что примеси, различного рода деформации и дефекты кристаллической решетки могут сильно влиять на параметр кристаллической решетки кремния. Однако измерения, проведенные в образце материала AVO28, не выявили превышения вкладов этих факторов по сравнению с аналогичными вкладами в природном кремниевом образце. Этот результат также был проверен и использовался в эксперименте KNOW [11].

При превышении относительного содержания посторонних примесей в кремниевом образце выше 10^{-9} необходимо учесть вклады, связанные с ними. При определении таких достаточно больших значений посторонних химических элементов u_r также должна находиться на уровне 10^{-9} . Таким образом, можно контролировать точность используемого метода определения молярной массы кремния. Для того чтобы суммарная относительная неопределенность N_A была меньше $2 \cdot 10^{-8}$, максимальная u_r молярной массы кремния не должна превышать $4,4 \cdot 10^{-9}$ [14].

Наиболее точным методом определения вкладов посторонних химических элементов в исследуемом образце является нейтронно-активационный анализ. Этот метод широко используется в промышленности для диагностики качества производимых кристаллов полупроводников. При облучении образцов нейтронами возникает небольшая кратковременная радиоактивность, в результате которой можно определить содержание примесей с высокой точностью без разрушения образцов [15].

Точность экспериментальных результатов по измерению N_A находится достаточно близко от запланированной, отвечающей $u_r = 2 \cdot 10^{-8}$. При измерениях молярной массы использовали масс-спектрометрию разреженного раствора изотопов с выделением «виртуального элемента» (VE-IDMS). При этом для калибровки использовался масс-спектрометр MC ICP-MS.

В 2014 г. получены следующие результаты соответственно в NMIJ [16] и NIST [13]:

$$N_A = 6,02214080(20) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}, u_r = 3,32 \cdot 10^{-8};$$

$$N_A = 6,02214076(19) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}, u_r = 3,16 \cdot 10^{-8}.$$

В рамках проекта kNOW к началу 2015 г. получены следующие результаты [11]:

$$N_A = 6,02214095(21) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}, u_r = 3,49 \cdot 10^{-8};$$

$$N_A = 6,02214073(19) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}, u_r = 3,16 \cdot 10^{-8};$$

$$N_A = 6,02214066(28) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}, u_r = 4,65 \cdot 10^{-8}.$$

Результаты NIST-2014, NMJ-2014 и РТВ (проекта kNOW-2015) согласуются в пределах заявленных неопределенностей [11].

Применение новейших высокоточных методов в проекте kNOW не привело к уменьшению u_r по сравнению с оригинальным результатом Международного проекта IAC (второго этапа проекта Авогадро), который составил [8]:

$$N_A = 6,02214082(18) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}, u_r = 3 \cdot 10^{-8}.$$

Как отмечалось выше, измерение объема V является ключевым (по бюджету неопределенностей) и измерение радиуса должно быть выполнено с $u_r \leq 0,6 \cdot 10^{-8}$, если поставлена задача измерить N_A с $u_r = 2 \cdot 10^{-8}$. Для этого необходимо измерять радиус шара, который приблизительно равен 47 мм, со стандартной неопределенностью 0,3 нм, т. е. одного порядка с размером атомного слоя. Это обстоятельство делает обоснованным изучение эффектов поверхностного натяжения и напряжения, в том числе эффектов поверхностной релаксации и реконструкции, а также возможного присутствия аморфного слоя. Такого рода поверхностные эффекты изучены в работе итальянских физиков из университета Кальяри (Cagliari) и INRIM [17]. Эти поверхностные эффекты могли приводить как к деформациям сферической поверхности, так и к изменению параметра решетки. В [17] рассмотрены только деформации поверхности шара. Данное исследование основано на теории вычислений функционала электронной плотности. В результате компьютерных вычислений с помощью пакета Quantum Espresso был получен следующий результат: рассмотренные авторами поверхностные эффекты могут уменьшить объем V шара, в худшем случае, на $2,5 \cdot 10^{-9} V$. Это меньше требуемого значения $1,8 \cdot 10^{-8} V$, но не настолько, чтобы этим эффектом можно было пренебрегать в будущих исследованиях.

Учитывая известное соотношение [18]:

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

где $A_r(e)$ — относительная атомная масса электрона; $M_u = 1$ г/моль — постоянная молярной массы; c — скорость света в вакууме; α — постоянная тонкой структуры; R_∞ — постоянная Ридберга, и данные CODATA-2010 [18]: $\alpha^{-1} = 137,035999074(44)$ с $u_r(\alpha) = 3,2 \cdot 10^{-10}$, $A_r(e) = 5,4857990946(22) \cdot 10^{-4}$ с $u_r = 4 \cdot 10^{-10}$, $R_\infty = 10973731,568539(55) \text{ м}^{-1}$ с $u_r(R_\infty) = 5 \cdot 10^{-12}$, получим

$$N_A h \text{ (CODATA-2010)} = 3,9903127176(28) \cdot 10^{-10} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{моль}^{-1}$$

с $u_r = 0,7 \cdot 10^{-9}$. Это дает возможность вычислить без потери точности постоянные Авогадро или Планка, если известно значение какой-то одной из этих постоянных, т. е. результаты экспериментов с ватт-весами также позволяют определить N_A (см., например, результаты эксперимента NIST-3 [19]). Как было отмечено в [20], метод ватт-весов имеет значительные систематические неопределенности результатов измерений, связанные, в частности, с влиянием внешних факторов, таких как микросейсмы, возмущения электро-

магнитного поля, зависимость гравитационной силы от места измерения и т. д. Поэтому обеспечить выполнение критериев стабильности и высокой точности при передаче нового килограмма с помощью этого электромеханического устройства весьма сложно. Это подтверждается сравнительно большими систематическими погрешностями, не учтенными, например, в эксперименте NIST в 2007 г. Действительно, u_r результата NIST-3, который был закончен в конце 2014 г., составляет $5,6 \cdot 10^{-8}$ [19], несмотря на современную модификацию экспериментальной установки. Однако результаты работ [21—23] привели к определению N_A с $u_r = 2 \cdot 10^{-8}$.

Переопределение моля в новой СИ. В действующей СИ значение N_A , с помощью которого определен моль, не фиксировано. Для новой СИ предлагаются два основных варианта переопределения моля и килограмма [2—4, 24]. При одном варианте фиксируются значения N_A и h , при другом — N_A и $M(^{12}\text{C})$ [25, 26]. Как известно, M элемента X , состоящего из атомов с относительной атомной массой $A_r(X)$, в действующей СИ задается формулой

$$M(X) = A_r(X) M_u.$$

Здесь $M_u = 1$ г/моль. Если выбрать вариант переопределения моля и килограмма, основанный на фиксации N_A и h , то в этом варианте определение M претерпевает модификацию, а именно:

$$M(X) = (1+\kappa) A_r(X) M_u,$$

где $(1+\kappa)$ — корректирующий коэффициент, позволяющий учесть любое небольшое отклонение M от $A_r(X) M_u$. Это означает введение новой величины $(1+\kappa)M_u$, которая не совпадает с M_u в рамках действующей СИ [27, 28].

Процедура переопределения единиц массы и количества вещества на основе фиксированного значения постоянной Авогадро N_A^* и $M(^{12}\text{C})$ является более простой [5, 6, 25].

Величины, определяемые при фиксированном значении N_A ,

т. е. при $N_A = N_A^*$, обозначаются звездочкой. В этом варианте

для преемственности с действующей СИ сохраняется определение $M(^{12}\text{C}) = 12$ г/моль. Таким образом, остаются неизменными M_u и атомная единица массы (а. е. м.). Масса атома ^{12}C является микроскопическим эталоном массы, а килограмм определяется через нее и $\{N_A^*\}$ при условии, что

число атомов ^{12}C $\{N_{\text{kg}}^*\}$ и $\{N_A^*\}$ связаны соотношением:

$\{N_A^*\} = 0,012 \{N_{\text{kg}}^*\}$. Таким образом, килограмм* является

точной массой $\{N_A^*\}/0,012$ свободных атомов ^{12}C в состоянии покоя и основном квантовом состоянии, а моль* содержит $\{N_A^*\}$ структурных элементов данного вещества. Эти определения килограмма и моля согласуются с существующими в настоящее время определениями в рамках СИ и той связью, которая между ними существует.

Для конкретизации значения $\{N_A^*\}$ можно использовать дополнительные условия. Например, желательно, чтобы единицы массы СИ и системы СГС, килограмм и грамм, со-

держали целое число атомов ^{12}C . В этом случае $\{N_A^*\}$ должно делиться на 12 [5, 20] и, к тому же, принадлежать экспериментально определенному 1σ -интервалу [8]:

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

В качестве $\{N_A^*\}$ можно выбрать число, равное $6,02214084 \cdot 10^{23}$ [20], т. е. определение моля будет следующим: *моль — единица количества вещества, содержащая $6,02214084 \cdot 10^{23}$ структурных элементов этого вещества*. Это значение N_A согласуется с результатами последних наиболее точных экспериментов [21, 22].

Вывод. Создание эталонных кристаллических шаров требует больших затрат времени и средств (подготовка и проведение международного эксперимента IAC заняли около 10 лет, затраты составили порядка 10 млн евро). Точность новых результатов, полученных к началу 2015 г. в экспериментах с ватт-весами в NIST [19] и с кремниевыми шарами в PTB (проект KNOW) [11], NMIJ [16] и NIST [13], оказалась ниже, чем точность результата эксперимента IAC 2010 г. Однако результаты двух последних экспериментов, проведенных NMIJ, BIPM, PTB, INRIM, NIST и NRC [21, 22], по измерению постоянных Авогадро и Планка позволили выйти на уровень $u_r = 2 \cdot 10^{-8}$. При этом были использованы результаты внеочередной калибровки шести официальных копий Международного прототипа килограмма и рабочих стандартов МБМВ [23]. Эти результаты, весьма вероятно, приведут к принятию новых определений килограмма и моля на XXVI ГКМВ в 2018 г.

Л и т е р а т у р а

1. **SI Brochure:** The International System of Units (SI) [Электрон. ресурс]. <http://www.bipm.org/en/publications/si-brochure> (дата обращения 27.02.2015 г.).
2. **Mills I. M. e. a.** Redefinition of the kilogram: a decision whose time has come // *Metrologia*. 2005. V. 42. P. 1—80.
3. **Mills I. M. e. a.** Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005) // *Metrologia*. 2006. V. 43. P. 227—246.
4. **Кононогов С. А.** Метрология и фундаментальные физические константы. М.: Стандартинформ, 2008.
5. **Исаев Л. К., Кононогов С. А., Хрущев В. В.** О переопределении четырех основных единиц СИ // *Измерительная техника*. 2013. № 2. С. 3—8.
6. **Бронников К. А., Ивашук В. Д., Калинин М. И., Кононогов С. А., Мельников В. Н., Хрущев В. В.** О новых определениях основных единиц СИ. Почему предпочтителен атомный килограмм // *Измерительная техника*. 2015. № 2. С. 11—18.
7. **Steiner R.** History and progress on accurate measurements of the Planck constant // *Rep. Prog. Phys.* 2013. V. 76. P. 016101(1—46).
8. **Andreas B. e. a.** (IAC) Counting the atoms in a ^{28}Si crystal for a new kilogram definition // *Metrologia*. 2011. V. 48. P. S1—S13.
9. **Ивашук В. Д., Кононогов С. А., Мельников В. Н.** О результатах измерений постоянных Авогадро и Планка с целью реализации новых определений килограмма и моля // *Измерительная техника*. 2014. № 2. С. 14—18.
10. **Publishable JRP Summary Report** for JRP SIB03, October 2012. [Электрон. ресурс]. http://www.inrim.it/luc/know/htm_tx/docum.htm (дата обращения 27.02.2015 г.).
11. **Nicolaus A. e. a.** Revision of the SI: The determination of the Avogadro constant as the base for the kilogram // *Key Engin. Mat.* 2014. V. 613. P. 3—10.
12. **Massa E. e. a.** Measurement of the {220} lattice-plane spacing of a ^{28}Si x-ray interferometer // *Metrologia*. 2011. V. 48. P. S37—S43.
13. **Vocke Jr R. D., Rabb S. A., Turk G. C.** Absolute silicon molar mass measurements, the Avogadro constant and the redefinition of the kilogram // *Metrologia*. 2014. V. 51. P. 361—375.
14. **Pramann A. e. a.** Molar-mass of silicon highly enriched in ^{28}Si determined by IDMS // *Metrologia*. 2011. V. 48. P. S20—S25.
15. **D'Agostino G. e. a.** Instrumental neutron activation analysis of an enriched ^{28}Si single-crystal // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2014. V. 229. P. 277—282.
16. **Narukawa T. e. a.** Molar-mass measurement of a ^{28}Si -enriched silicon crystal for determination of the Avogadro constant // *Metrologia*. 2014. V. 51. P. 161—168.
17. **Melis C., Colombo L., Mana G.** Lattice strain at c-Si surfaces: a density functional theory calculation [Электрон. ресурс]. <http://www.arxiv.org> (дата обращения 24.04.2015 г.).
18. **Mohr P. J., Taylor B. N., Newell D. B.** CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010 // *Rev. Mod. Phys.* 2012. V. 84. N. 4. P. 1527—1605.
19. **Schlamming S. e. a.** A summary of the Planck constant measurements using a watt balance with a superconducting solenoid at NIST // *Metrologia*. 2015. V. 52. P. L5—L8.
20. **Хрущев В. В.** Об оптимальном наборе фундаментальных физических констант с фиксированными значениями для переопределения единиц СИ // *Измерительная техника*. 2011. № 10. С. 3—8.
21. **Sanchez C.A. e. a.** A determination of Planck's constant using the NRC watt balance // *Metrologia*. 2014. V. 51. P. S5—14.
22. **Azuma Y. e. a.** Improved measurement results for the Avogadro constant using a ^{28}Si -enriched crystal // *Metrologia*. 2015. V. 52. P. 360—375.
23. **Stock M. e. a.** Calibration campaign against the international prototype of the kilogram in the anticipation of the redefinition of the kilogram part I: comparison of the international prototype with its official copies // *Metrologia*. 2015. V. 52. P. 310—316.
24. **BIPM 2014.** 24 and 25 CGPM Resolutions [Офиц. сайт]. <http://www.bipm.org/utls/common/pdf/> (дата обращения 27.02.2015 г.).
25. **Кононогов С. А., Хрущев В. В.** О возможности замены прототипа килограмма атомным эталоном единицы массы // *Измерительная техника*. 2006. № 10. С. 3—8.
26. **Becker P. e. a.** Considerations on future redefinitions of the kilogram, the mole and other units // *Metrologia*. 2007. V. 44. P. 1—14.
27. **Taylor B. N.** Molar mass and related quantities in the New SI // *Metrologia*. 2009. V. 46. P. L16—19.
28. **Leonard B. P.** Why the dalton should be redefined exactly in terms of the kilogram // *Metrologia*. 2012. V. 49. P. 487—491.

Дата принятия 27.04.2015 г.