
МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 53.082.5

ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЙ. НОВЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАК ПОТРЕБНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА

Жагора Н. А.

Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Республика Беларусь

В статье проанализированы рекомендации Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) Национальным метрологическим институтам по участию в процессе исследований и подготовки новых определений основных и производных единиц СИ. Приведено сравнение их определений в настоящее время, выявлены основные тенденции развития определений и их реализаций в перспективе.

Введение

В основе каждого измерения лежит единица величины. Благодаря Метрической конвенции повсеместно в мире преимущественно применяется Международная система единиц СИ (International System of Units SI).

В Беларуси использование СИ закреплено законодательно, а также введением (январь 2010 г.) технического регламента «Единицы измерений, допущенные к применению на территории Республики Беларусь» (ТР 2007/003/ВУ) [1].

Хотя наименования и обозначения основных и многих производных единиц остаются неизменными, определения их постоянно уточняются, чтобы они могли определяться в терминах природных постоянных – фундаментальных физических констант.

Это постоянная работа метрологических учреждений под руководством Международного комитета мер и весов (МКМВ), Консультативных комитетов (КК) по видам измерений. Общая идеология процесса исследований и подготовки новых определений формулируется Генеральной конференцией по мерам и весам (ГКМВ), в частности в решении ее 23-го заседания принята следующая резолюция: ГКМВ

рекомендует Национальным метрологическим институтам и Международному бюро мер и весов (МБМВ):

- продолжать соответствующие эксперименты, чтобы Международный комитет мог выработать четкую позицию в отношении возможности переопределения килограмма, ампера, кельвина и моля с использованием фиксированных значений фундаментальных постоянных на момент проведения 24-й Генеральной конференции (2011 год);

- вместе с Международным комитетом, его консультативными комитетами и соответствующими рабочими группами работать над практическими путями реализации новых определений на основании фиксированных значений фундаментальных постоянных, готовить реализацию на практике каждого из них, а также анализировать наиболее соответствующие способы разъяснения новых определений пользователям;

- инициировать кампании по предупреждению пользователей о возможности переопределений, а также технического и законодательного внедрения данных переопределений и их практической реализации в целях ее тщательного анализа, а также просит МКМВ представить отчет о данных проблемах на 24-й Генеральной конференции в 2011 году.

Метрологическое обеспечение измерений

При этом рекомендуется определить необходимость соответствующих подготовительных работ, а в случае положительных результатов экспериментов и их соответствия нуждам пользователей рекомендуется представить на 24-й Генеральной конференции формальное предложение по внесению изменений в определения килограмма, ампера, кельвина и моля [2].

Постановка задачи переопределения основных единиц SI

Консультативный комитет по единицам (CCU) на совете директоров Национальных метрологических институтов (НМИ) рекомендовал (рисунок 1):

- сохранить 7 базовых единиц: секунда s , метр m , килограмм kg , ампер A , кельвин K , моль mol , кандела cd ;
- переопределить: кг (kg) (s, m, h); ампер (A) (s, e), кельвин (K) (s, m, kg, k_B), моль (mol) (фиксированное количество единиц, заданное величиной N_A);
- принять ясные и точные определения констант для единиц;
- принять рекомендованные CODATA значения для h, e, k_B, N_A .

Основные единицы SI сегодня базируются на физических константах или артефактах и выглядят следующим образом:

- секунда (s, c) – основана на фиксированной величине частоты ν_{hfs} сверхтонкого перехода атома цезия (атомные часы);

- метр (m, λ) – основан на фиксированной величине скорости света в вакууме c_0 в связке с секундой (лазерная интерферометрия);

- килограмм (kg, m_0) – определен как масса международного прототипа килограмма (артефакт);

- ампер (A) – основан на фиксированном значении магнитной постоянной μ_0 в сочетании с килограммом, метром и секундой;

- кельвин (K) – базируется на величине 273,16 K, приписанной тройной точке воды;

- моль (mol, N_A) – основан на фиксированной величине молярной массы углерода ^{12}C равной 0,012 кг/моль, при том, что молярная масса связана с массой числом Авогадро N_A .

основные единицы SI

$s \quad m \quad kg \quad A \quad K \quad mol \quad cd$

действующее определение SI

$\nu_{\text{hfs}} \quad c \quad m(K) \quad \mu_0 \quad T_{\text{TPW}} \quad M(^{12}C)$

будущее определение SI

$\nu_{\text{hfs}} \quad c \quad h \quad e \quad k_B \quad N_A$

Рисунок 1 – Концепция Консультативный комитет по единицам (CCU) в отношении системы SI где h – постоянная Планка, e – заряд электрона, k_B – постоянная Больцмана, N_A – число Авогадро, $m(K)$ – принятая в SI масса прототипа килограмма, c – скорость света, T_{TPW} – температура тройной точки воды

Таблица 1

Определения основных единиц SI в настоящее время и в перспективе

Единицы SI	Действующее определение	Будущее определение
Секунда	$\nu_{\text{hfs}} (Cs)$	$\nu_{\text{hfs}} (Cs)$
Метр	секунда и c	секунда и c
Килограмм	международный прототип	секунда, метр и постоянная Планка, h
Ампер	секунда, метр, прототип килограмма, μ_0	секунда и заряд электрона e
Кельвин	тройная точка воды	секунда, метр, килограмм и постоянная Больцмана, k_B
Моль	число атомов в 0,012 кг углерода ^{12}C	фиксированное количество частиц

Примером основанности на фиксированной величине для метра может служить формулировка определения единицы (1983 г.): «метр – это длина пути света в вакууме за время $1/299792458$ секунды», при этом значение скорости света принимается точно 299792458 метров в секунду.

До 1983 года скорость света c была измеряемой (т.е. изменяющейся в зависимости от точности эксперимента) величиной и была функцией, связанной с частотой сверхтонкого перехода атома цезия, длиной волны излучения атома криптона или длиной меридиана.

С 1983 года скорость света определена как произведение длины волны и частоты в эксперименте с источником фиксированной частоты, т.е. скорости света приписано фиксированное значение.

В итоге получается следующая таблица сравнения определений основных единиц SI в настоящее время и в перспективе, возможно ближайшей (таблица 1).



Рисунок 2 – Международный прототип килограмма

При этом в основе определения некоторых единиц SI лежит постоянная тонкой структуры $\alpha = \frac{\mu_0 c e^2}{2h}$, где α – это безразмерная величина, и ее численное значение не зависит от выбранной системы единиц.

Пример следующий – килограмм. На третьей ГКМВ в 1901 году килограмм как единица массы был определен как эквивалентная масса международного прототипа килограмма из сплава 90 % платины и 10 % иридия, изготовленного в 80-е годы XIX века и введенного в работу в 1889 году (рисунок 2).

Наблюдения за его изменением (рисунок 3) в сравнении с его копиями показали, что примерно за 100 лет масса изменилась на 50 микрограмм, т.е. 0,5 микрограмма в год. Этот тренд можно было бы подтвердить сравнением с естественной фундаментальной постоянной, но сравнение на уровне неопределенности 10^{-8} требует почти 20 лет наблюдений, чтобы мы заметили разницу в 0,5 микрограмма в год.

Поэтому сегодня килограмм как единица массы эквивалентна массе прототипа, а в будущем он будет эквивалентен массе, связанной с постоянной Планка, которая равна точно $6,626\ 068\ 76 \times 10^{-34}$ джоулей в секунду.

Какими видятся пути реализации нового определения? Необходим эксперимент для измерения на уровне 10^{-8} соотношения постоянной Планка и массы прототипа, т.е. $\frac{h}{m(K)}$.

В первом случае эксперименты ведутся с ватт-весами в NIST (США) и совместно NPL (Великобритания) и NRC (Канада). Ожидается подключение к этому методу национальных метрологических институтов Швейцарии, Франции и МБМВ.

Над проектом «Авогадро» работают ученые России, Японии, Германии, Великобритании, Евросоюза и МБМВ.

Что означает переопределение единицы массы для практики? В настоящее время значение единицы массы «килограмм» дается без неопределенности. Лучшее заявленное СМС при калибровке стальной гири 1 кг имеет расширенную неопределенность около 30 микрограмм ($30 \cdot 10^{-9}$).

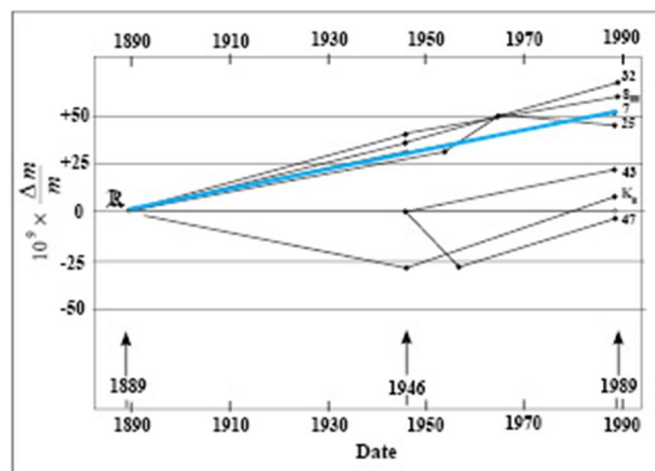


Рисунок 3 – График изменений международного прототипа килограмма в сравнении с его копиями

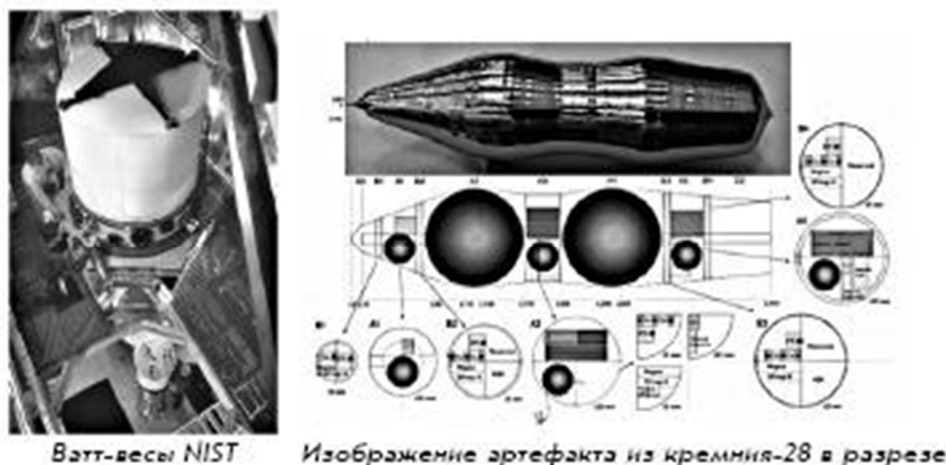


Рисунок 4 – Артефакт из сверхчистого кремния 28 для определения числа Авогадро

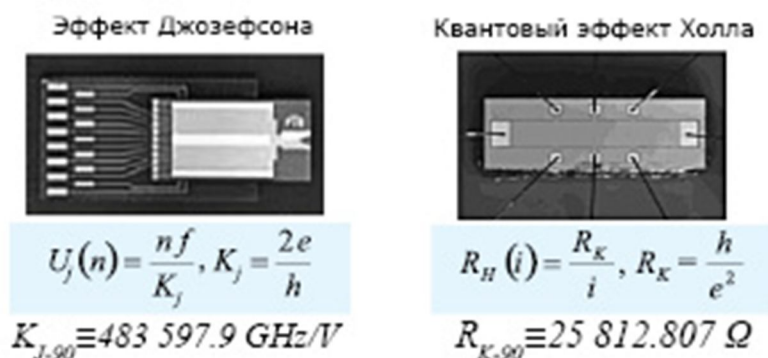


Рисунок 5 – Реализация эффектов Джозефсона и Холла

Такие эксперименты могут быть выполнены с помощью ватт-весов или международного проекта по определению числа Авогадро, используя артефакт из сверхчистого кремния 28 (рисунок 4).

Данные CODATA 2006 года для h имеют расширенную неопределенность $100 \cdot 10^{-9}$. Необходимо решить, как работать с такой неопределенностью, общей для всех макроскопических измерений массы.

Переопределение килограмма в терминах h не означает, что ватт-весы – единственный путь реализации его на практике. Вероятно, это будут кремниевые сферы или другие методы.

В метрологии электричества больше не будет использоваться приближенное, принятое по согласованию в 1990 году значение единицы силы тока ампера.

В основу нового определения будут положены квантовые эффекты Джозефсона для вос-

произведения вольта и Холла – для воспроизведения ома (рисунок 5).

Эффект Джозефсона – явление протекания сверхпроводящего тока через тонкий слой диэлектрика, разделяющий два сверхпроводника. Такой ток называют джозефсоновским током, а такое соединение сверхпроводников – джозефсоновским контактом. В первоначальной работе Джозефсона предполагалось, что толщина диэлектрического слоя много меньше длины сверхпроводящей когерентности, но последующие исследования показали, что эффект сохраняется в гораздо более широком классе контактов.

Квантовый эффект Холла – явление, открытое Холлом в 1879 году, состоит в том, что в проводнике с током, помещённом в магнитное поле, перпендикулярное направлению тока, возникает электрическое поле в направлении, перпендикулярном направлениям тока и магнитного поля. Возникающее в проводнике

электрическое поле, называемое полем Холла, вызвано действием силы Лоренца $FL = eBv$, заставляющей электроны отклоняться в направлении, перпендикулярном скорости v . В результате это поле EH уравнивает силу Лоренца, и между боковыми гранями образца возникнет разность потенциалов VH , которая поддается измерению.

Эффект состоит в том, что при достаточно низких температурах в сильных магнитных полях на зависимости поперечного сопротивления (отношения возникающего поперечного напряжения к протекающему продольному току) вырожденного двумерного электронного газа (ДЭГ) от величины нормальной составляющей к поверхности ДЭГ индукции магнитного поля (или от концентрации при фиксированном магнитном поле) наблюдаются участки с неизменным поперечным сопротивлением, или «плато».

Единица термодинамической температуры кельвин сегодня определена как $1/273,16$ температуры тройной точки воды (рисунок 6).



Рисунок 6 – Реализация температуры тройной точки воды

В будущем кельвин равен такой термодинамической температуре, при которой постоянная Больцмана равна $1,380\ 65X\ X \cdot 10^{-23}$ джоуля на Кельвин.

Над определением постоянной Больцмана k_B с применением акустической газовой термометрии работает NPL (Великобритания), LNE-INM (Франция), INRIM (Италия), SEM (Испания), NIM (Китай) и другие.

Термометрию газовой постоянной диэлектрическими методами исследуют в РТВ (Германия), доплеровское расширение изучают во Франции, а шумы Джонса – в NIST (США).

Ставится задача определить k_B с неопределенностью 1 ppm ($\sim 0,3$ мК в тройной точке воды), используя разные методы.

Как пример можно назвать исследования метрологов Франции и Великобритании, которые уже достигли в экспериментах неопределенностей около 2 ppm, но намереваются достичь меньше 1 ppm к 2011 году, что позволит подтвердить или уточнить данные CODATA 2006 (1,7 ppm). При этом новейшие результаты достигаются с акустическими резонаторами.

Как будет реализовываться (воспроизводиться) кельвин? Наиболее точные температурные измерения в диапазоне от минус $250\ ^\circ\text{C}$ до $960\ ^\circ\text{C}$ будут, по крайней мере, первоначально, обеспечиваться платиновыми термометрами сопротивления, откалиброванными в соответствии с ITS-90. В дальнейшем продолжится использование шкалы ITS-90 и PLTS-2000, поэтому не предвидится изменений в калибровке. Новое определение Кельвина дает значительные преимущества для температур ниже 20 К и выше 1300 К.

Более подробная информация по перепределению единиц дается на сайте www.bipm.org.

Выводы

Анализ результативности и эффективности воспроизведения основных и производных единиц SI, рекомендации Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) позволил выявить основные тенденции развития определений и их реализаций. Результаты анализа положены в основу разработки плана участия Белорусского государственного института метрологии в процессе исследований и подготовки новых определений основных и производных единиц SI и создания соответствующей эталонной базы.

Список цитируемых источников

1. TP 2007/003/ВУ «Единицы измерений, допущенные к применению на территории Республики Беларусь». – Минск : Госстандарт, 2007.
2. Резолюции 23-й Генеральной конференции мер и весов. – <http://www.bipm.org/jsp/en/ListCGPMResolution>.

Zhagora, N. A.

Measurement units. new definitions as the need of technical progress

Recommendations of the General Conference of Measures and Weights (GCMW) for the NMI's are considered in the paper. Recommendations are connected with the work connected with working out new definitions of main and subsidiary SI units. Comparison of existing definitions is provided as well as main tendencies in their development.

Поступила в редакцию 06.07.2010.