

МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ, ОСНОВАННАЯ НА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТАХ

К. В. Чекирда, ФГУП "ВНИИМ им. Д. И. Менделеева", Санкт-Петербург
K. V. Chekirda@vniim.ru

УДК 351.821

Международная система единиц СИ (SI) содержит семь основных единиц: секунда, метр, килограмм, ампер, кельвин, моль и кандела. В настоящий момент она пересматривается с целью обновления определений четырех из этих единиц. В ноябре 2018 года обновленные определения килограмма, ампера, кельвина и моля будут утверждены Генеральной конференцией по мерам и весам (КГМВ) и международным органом, ответственным за глобальную сопоставимость измерений. Ожидается, что изменения вступят в силу 20 мая 2019 года [1].

Обновленная Международная система единиц будет опираться на фундаментальные физические константы, которые после многочисленных исследований были уточнены и зафиксированы их численные значения для практики применения при дальнейшем использовании. Рабочая группа CODATA по фундаментальным константам зафиксировала численные значения и для воспроизведения основных единиц Международной системы единиц они будут иметь следующие значения:

- частота сверхтонкого перехода атомов цезия 133, находящегося в невозмущенном основном состоянии $\Delta\nu_{Cs}$ равна $9\,192\,631\,770$ Гц;
- скорость света в вакууме c равна $299\,792\,458$ м/с;
- постоянная планка h равна $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ Дж·с;
- элементарный заряд электрона e равен $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ Кл;
- постоянная Больцмана k равна $1,380\,649 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;
- постоянная Авогадро N_A равна $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹;
- сила света монохроматического излучения с частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, K_{cd} , составляет 683 Лм/Вт,

что для некоторых единиц приведет к изменению их определений.

Консультативный комитет по мерам и весам (CIPM) создал целевую группу, которая призвана помочь Национальным метрологическим институтам (НМИ) использовать это важное событие для продвижения работы метрологии.

На странице целевой группы [2] можно скачать материалы, в том числе графические рисунки для иллюстрации СИ, и "брендбук", объясняющий, как их применять. Использование одного и того же логотипа и ключевых Сообщений во всем мире обеспечит согласованность деятельности различных организаций и объединение усилий для повышения роли СИ и метрологии на международном уровне.

Национальные метрологические институты России, в которых хранятся и применяются государственные первичные эталоны основных единиц, проводят большую работу по подготовке к переходу на обновленную СИ. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) организовало и обеспечило финансированием ряд научно-исследовательских и опытно-конструкторских проектов для перспективного развития первичных эталонов основных единиц. Эти работы своевременны и важны, поскольку система единиц лежит в основе международных соглашений о взаимном признании.

Определения единиц секунда, метр, кандела не претерпят существенных изменений и будут сформулированы следующим образом:

- **секунда** представляет собой интервал времени, равный $9\,192\,631\,770$ периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями состояния атома Cs-133, находящегося в покое при 0 К;
- **метр** есть длина пути, проходимая плоской электромагнитной волной в вакууме за интервал времени равный $1/29\,979\,2458$ секунды;
- **кандела** – это такая сила света, при которой численное значение световой эффективности монохроматического излучения с частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, K_{cd} , равно 683 люмена на ватт.

Определения этих единиц, как и методы их реализации развиваются эволюционным путем в соответствии со стратегиями консультативных комитетов по данным видам измерений.

Единица количества вещества – моль, будет определена по-новому через фундаментальную константу – постоянную Авогадро:

- **моль** есть количество вещества системы, содержащей точно $6,022\,1415 \cdot 10^{23}$ структурных элементов. При при-

менении моля структурные элементы должны быть указаны конкретно. Это могут быть атомы, молекулы, ионы, электроны, другие частицы или определенные группы частиц.

Переопределение моля не приведет к изменению справочных данных и алгоритмов воспроизведения и передачи единиц молярной доли газовых компонентов гравиметрическим методом.

Совсем иначе обстоят дела с определениями килограмма, ампера, кельвина. Обновленные определения этих единиц приведут к существенному изменению методов их воспроизведения.

КИЛОГРАММ

Работы по совершенствованию одной из основных единиц дали существенный толчок развитию Международной системы единиц СИ.

Современное (действующее) определение килограмма: единица массы – килограмм есть масса Международного прототипа килограмма, поверхность которого очищена определенным способом. Все национальные эталоны массы должны прослеживаться к нему, следуя иерархии и путем соответствующих сличений. Очевидно, что в таком определении есть недостатки и риски получить недостоверные результаты измерений.

- Новая формулировка опирается на фундаментальные законы природы и имеет следующий вид: единица массы – килограмм – такая масса, при которой посто-

янная Планка h точно равна фиксированному численному значению $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ Дж·с ($\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$).

Это определение способствует развитию методов воспроизведения единицы не привязанных к одному артефакту, хранящемуся в Международном бюро по мерам и весам. Сегодня, являясь артефактом, Международный прототип килограмма (МПК) подвержен изменениям и со временем может быть поврежден или даже утрачен. К тому же более чем за 120 лет применения МПК и его физических копий стали очевидными его недостатки. Анализ истории сличений более сорока копий, изготовленных из того же платино-иридиевого сплава, показал изменение их массы в пределах ± 50 мкг за 100 лет. График, иллюстрирующий такое расхождение приведен на рис. 1.

- В 1975 году доктор Брайан Киббл из Национальной физической лаборатории (NPL) Великобритании предложил идею так называемых ватт-весов. С помощью этого устройства можно связать между собой единицы электрической и механической мощности. Развивается новое направление исследований, которое позволяет выразить макроскопические величины через закономерности микромира в результате применения аппаратуры, реализующей квантовые эффекты Холла и Джозефсона. В конечном счете, удалось выразить единицу массы через фундаментальную физическую константу – постоянную Планка h .

Большинство современных ватт-весов работают в двух различных фазах измерения – взвешивания и перемещения, поэтому точность измерения может быть ограничена изме-

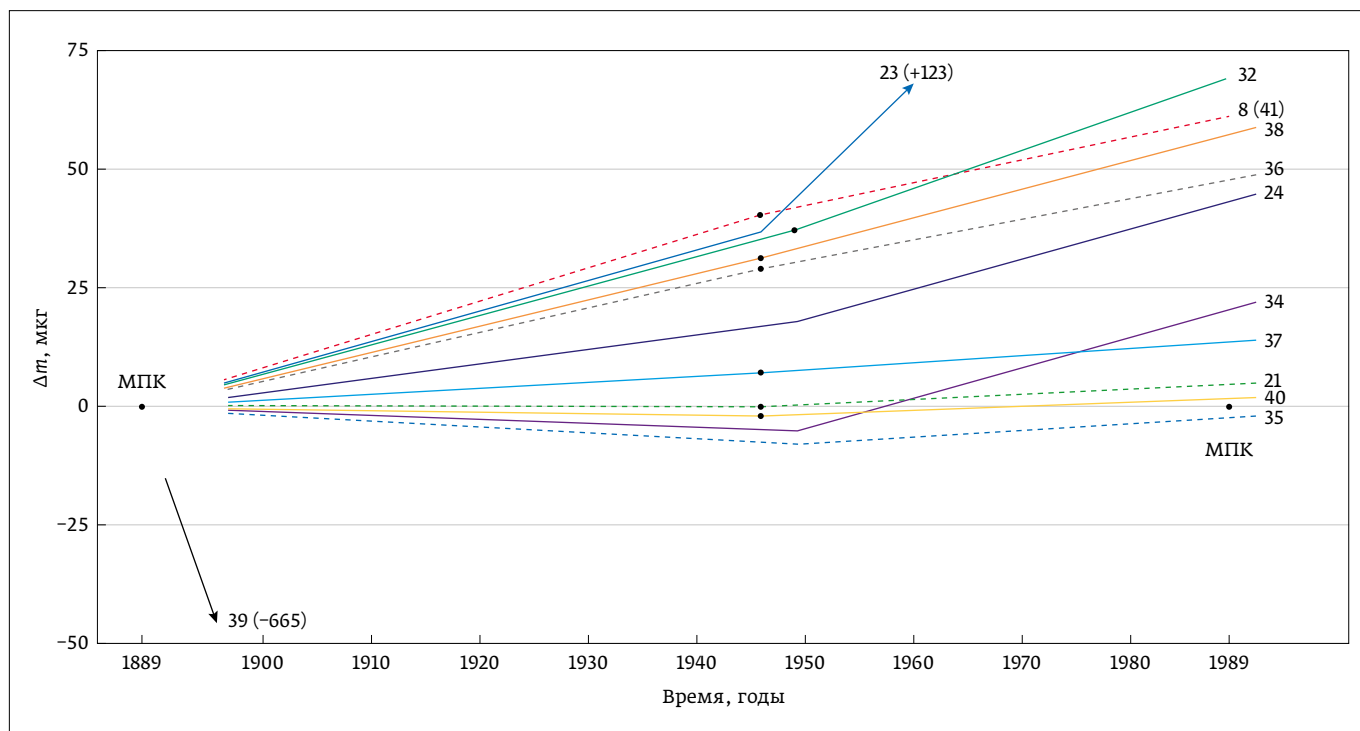


Рис.1. Отклонения национальных копий килограмма от МПК

нениями окружающей среды и разницей в условиях эксперимента между двумя фазами. Две фазы эксперимента "одновременного" измерения могут гарантировать, что геометрические свойства катушки, ее ориентация и параметры магнитного поля одинаковы в обоих измерениях. Таким образом, одновременный метод делает эксперимент менее чувствительным к изменениям магнитного поля и позволяет определять массу через постоянную Планка.

В фазе с взвешиванием катушка и масса поддерживаются в равновесии. Катушка (длина провода L) помещена в магнитное поле с плотностью потока B . Гравитационная сила, действующая на массу m при ускорении силы тяжести g , уравновешивается равной по величине и противоположной по направлению электромагнитной силой, действующей на катушку при пропускании через нее электрического тока I :

$$mg = ILB.$$

В эксперименте с перемещением та же катушка движется в магнитном поле B вертикально с постоянной скоростью v , вследствие чего в ней индуцируется напряжение U :

$$U = BLv.$$

Если свойства катушки и магнитного поля, L и B , остаются неизменными в течение двух экспериментов, то эти величины могут быть исключены из обоих уравнений, что приводит к новому уравнению:

$$UI = mgv.$$

Это объясняет название эксперимента, поскольку ватт является единицей мощности. Важно понимать, что оба типа мощности "виртуальные" в том смысле, что они не появляются ни в одной из отдельных фаз эксперимента. Напряжение измеряется в опыте с перемещением, а ток – в эксперименте взвешивания.

Чтобы установить связь между макроскопической массой m и постоянной Планка h , электрические величины – напряжение и ток – измеряются с помощью двух квантовых явлений – эффекта Джозефсона и квантового эффекта Холла.

Эффект Джозефсона позволяет определить неизвестное напряжение U как комбинацию безразмерного множителя u' , постоянной Планка, элементарного заряда и точно измеряемой частоты f_j ,

$$U = u' f_j \frac{h}{2e} = u' \frac{f_j}{K_j},$$

где $K_j = 2e/h$ константа Джозефсона.

Квантовый эффект Холла позволяет определить неизвестное значение сопротивления R как комбинацию безразмерного коэффициента r' , постоянной Планка и элементарного заряда e :

$$R = r' \frac{h}{e^2} = r' R_K,$$

где $R_K = h/e^2$ – константа Клитцинга.

Применение двух квантовых эффектов при измерении напряжения и тока в уравнении ватт-весов приводят к выражению:

$$m = \frac{u'_1 u'_2 f_{j,1} f_{j,2}}{r'} \frac{1}{gv} \frac{h}{4},$$

в котором первый сомножитель в правой части содержит величины, относящиеся к измерению напряжения и тока с использованием макроскопических квантовых эффектов, второй – измеряемые механические величины: ускорение свободного падения g и скорость перемещения v ; а последний сомножитель – постоянная Планка h . Это уравнение устанавливает связь между макроскопической массой m и постоянной Планка h .

На научно-техническом совете Росстандарта в июне 2018 года специалистами ФГУП "ВНИИМ им. Д. И. Менделеева" был подготовлен доклад, содержащий обоснование необходимости создания ватт-весов в РФ. Членами научно-технического совета это предложение было поддержано единогласно. Создание ватт-весов – своеобразный вызов, фактически "метрологический коллапс", требующий усилий всех метрологических институтов России.

Очевидно, что прослеживаемость не к Международному прототипу килограмма, а к национальным реализациям через фундаментальные физические константы будет возможна после принятия нового определения и завершения ряда международных работ по выработке рекомендаций по его практической реализации. Одним из таких международных мероприятий будут ключевые сличения национальных эталонов копий с артефактом (сфера, цилиндр), значение массы которого получено посредством ватт-весов и / или через постоянную Авогадро. В результате этой работы будут определены поправки для эталонов копий относительно нового метода воспроизведения.

ФГУП "ВНИИМ им. Д. И. Менделеева" подготовил оборудование и инфраструктуру для успешного участия в предстоящих сличениях. На рис. 2 представлен комплекс для вакуумного взвешивания. В состав комплекса для вакуумного взвешивания входят:

- Вакуумный компаратор массы CCL 1007;
- Вакуумная транспортная система;
- Артефакты плавучести и абсорбции;
- Климатическая станция в комплекте с датчиками давления, влажности и температуры;
- Контейнеры для хранения артефактов в условиях вакуума или инертного газа;
- Кремневая монокристаллическая сфера;
- 2 форвакуумных насоса;



Рис.2. Составные части комплекса оборудования для вакуумного взвешивания: а) вакуумный компаратор массы CCL 1007 и вакуумная транспортная система; б) кремневая монокристаллическая сфера и национальная копия килограмма № 12

- Шкаф с электродвигателями приводов вакуумного компаратора и управляющим компьютером;
- 2 турбомолекулярных насоса.

АМПЕР

В 2018 году ожидается принятие нового определения единицы силы электрического тока – Ампера. Ампер определяется путем фиксации численного значения выраженного в единицах Кл элементарного заряда, $e=1,602176\ 634 \cdot 10^{-19}$, который равен $A \cdot c$, где секунда определена в терминах $\Delta\nu_{CS}$.

Из документа Консультативного комитета по электричеству и магнетизму ССЕМ / 09–05 [3] следует, что на практике ампер A может быть определен:

- (а) на основе закона Ома, через производные единицы V и Ω $A=V/\Omega$ и на базе эффектов Джозефсона и Холла, соответственно:

$$I=U/R=(k_1 \cdot h \cdot f / (2e)) / (k_2 h / e^2) = kef = ke/t,$$

или

- (б) на основе одноэлектронного туннелирования (SET) или подобных устройств, реализация единицы $A=Kл/c$, происходит через элементарный заряд e и основной единицы СИ – секунды s ;

$$I=ke/t,$$

или

- (с) с использованием соотношения $I=C \cdot dU/dt=dQ/dt=ke/t$, когда ампер определяется через соотношение $A=Ф \cdot В/c$, на основе практической реализации в СИ производных единиц вольт V и фарады F и основной единицы СИ

секунды s , путем приложения изменяющегося напряжения dU/dt к конденсатору емкостью C .

В России единица силы электрического тока – ампер, реализуется на основе закона Ома. Планируются исследования по воспроизведению Ампера с помощью метода туннелирования электронов.

КЕЛЬВИН

Консультативный комитет по термометрии, обобщив результаты всех исследований, относящихся к возможному новому определению кельвина, рекомендовал переопределение этой единицы через фиксированное значение постоянной Больцмана.

В частности, предложено определить единицу температуры T кельвин через единицу энергии системы СИ, джоуль, фиксируя величину постоянной Больцмана k , которая является константой пропорциональности между температурой и тепловой энергией:

$$E=3/2N \cdot k \cdot T$$

Ведущие НМИ, принимавшие участие в подготовке нового определения кельвина, выполнили большой объем работ по определению точного значения этой константы. Результаты выполненных исследований, сформулированные в докладе рабочей группы по переопределению кельвина, принципиально важны для совершенствования эталонов единицы температуры и внедрения их в практику.

В частности, Консультативным комитетом по термометрии сформулированы следующие положения:

1. Новое определение кельвина не влияет непосредственно на статус международной температурной шкалы МТШ-90 (International Temperature Scale of 1990) или

временной низкотемпературной шкалы ВНТШ-2000, однако имеются значительные преимущества для измерения термодинамической температуры (акустический газовый термометр), особенно – ниже 20 К и выше 1300 К (радиационный термометр), где первичные термометры могут обеспечить более низкую неопределенность, чем доступна сегодня по МТШ-90.

2. Наиболее точные измерения температуры в основном диапазоне – приблизительно от 13 до 1235 К – будут по-прежнему прослеживаться к эталону единицы температуры через платиновые термометры сопротивления, откалиброванные по МТШ-90.
3. В будущем, по мере развития методов первичной термометрии, способствующих уменьшению неопределенности, их будут использовать все шире и смогут, в некоторых диапазонах, постепенно заменить Международные температурные шкалы в качестве основы температурных измерений.

Проведены эксперименты, и на основании полученных результатов были сделаны выводы о том, что главное внимание должно быть сосредоточено на создании акустического газового термометра для диапазона температур ниже 20 кельвинов и эталонного радиационного термометра для диапазона выше 1235 К.

В период с 2015 по 2016 годы в соответствии с ведомственной целевой программой "Проведение фундаментальных исследований в области метрологии, разработки государственных (в том числе первичных) эталонов единиц величин" во ФГУП "ВНИИФТРИ" в рамках НИР "Больцман" и во ВГУП "ВНИИМ им. Д. И. Менделеева" в рамках НИР "Кельвин" были созданы экспериментальные образцы государственных первичных эталонов единицы температуры, исследования которых позволили определить и реализовать основные научно-технические решения, обеспечивающие возможность воспроизведения единицы температуры методом первичной термометрии в соответствии с ее новым определением.

В диапазоне ниже тройной точки воды (273,16 К) наилучшие результаты были получены с помощью акустического газового термометра. Во ФГУП "ВНИИФТРИ" изготовлены две установки реализующие воспроизведение единицы температуры методами абсолютной и относительной акустической газовой термометрии. Акустический газовый термометр успешно испытан и будет введен в состав модернизированного Государственного первичного эталона температуры ГЭТ 35-2010.

На изготовленных во ФГУП "ВНИИФТРИ" установках измерена константа Больцмана, а также выполняются исследования расхождения МТШ-90, реализуемой ГЭТ 35-2010 со шкалой температуры, основанной на новом определении кельвина в диапазоне температур от 5 до 273,16 К.

Консультативным комитетом по термометрии предложены два метода измерения термодинамической температуры выше температуры затвердевания серебра (1235 К), которые могут быть использованы для воспроизведения единицы темпера-

туры в соответствии с ее новым определением: прямой метод измерения с использованием абсолютного радиометра; относительная первичная термометрия, основанная на использовании высокотемпературных реперных точек.

В основе прямого метода лежит измерение спектральной мощности излучения абсолютно черного тела, прослеживаемое к единицам из СИ.

Воспроизведение единицы температуры методом относительной первичной термометрии базируется на высокотемпературных реперных точках – температурах фазовых переходов (плавления, затвердевания) эвтектических сплавов металл-углерод.

Реперным точкам, используемым для реализации метода относительной первичной термометрии, должны быть уже присвоены значения термодинамической температуры и неопределенность, возникающая при реализации косвенных методов. Термодинамическая температура фазовых переходов эвтектик определяется прямым методом.

В рамках НИР "Кельвин" создан экспериментальный образец нового первичного эталона единицы температуры, который обеспечил возможность воспроизведения кельвина методом относительной первичной термометрии.

Сегодня выполняются ключевые сличения Консультативного комитета по термометрии, в рамках которых участники должны выполнить измерения температуры ряда эвтектических сплавов. Экспериментальный образец нового эталона был успешно использован для этих измерений.

Следующим шагом на пути совершенствования эталона является реализация прямого метода воспроизведения единицы температуры. Эта работа уже ведется во ФГУП "ВНИИМ им. Д. И. Менделеева" и ФГУП "ВНИИФТРИ" в рамках ОКР "Кельвин 2". Разрабатывается поверочная схема и средства передачи единицы температуры в соответствии с ее новым определением.

Таким образом, после завершения ОКР "Кельвин 2" в 2019 году закончится весь комплекс работ по созданию государственных первичных эталонов единицы температуры, обеспечивающих переход на измерения температуры в соответствии с новым определением ее единицы.

Выводы:

В Российской Федерации проводятся своевременные мероприятия по обеспечению эталонной базы оборудованием для реализации новых методов воспроизведения основных единиц Международной системы, основанные на фундаментальных физических константах. Ключевым вызовом перед метрологическими институтами России является создание ватт-весов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Joint CCM and CCU roadmap for the adoption of the revision of the International System of Units. <https://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/>
2. <https://www.bipm.org/en/si-download-area/>
3. <https://www.bipm.org/cc/CCEM/Allowed/26/CCEM-09-05.pdf>

МОСКОВСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ САЛОН
ИЗОБРЕТЕНИЙ И ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

АРХИМЕД

с **26** по **29**
МАРТА 2019

Москва, Россия,
Конгрессно-выставочный
центр «Сокольники»,
павильон N 2



- Конкурсная программа
- Презентация высокотехнологичных проектов
- Международная выставка товарных знаков
«Товарный знак – Лидер»
- Международная научно-практическая конференция
«Актуальные вопросы изобретательской и
патентно-лицензионной деятельности»
- Международная выставка изобретений,
новых продуктов и услуг

Заявки на участие принимаются до 20 февраля 2019 года
105187, г. Москва, ул. Щербаковская, д.53, к.В,
ООО «АрхимедЭкспо», e-mail: mail@archimedes.ru
Телефон/факс: +7(495) 366-14-65, +7(495) 366-03-44
www.archimedes.ru

