

DOI: 10.33955/2307-2180(6)2020.44-47

УДК 53.081.1

# ПЕРЕСМОТР ОПРЕДЕЛЕНИЙ ОСНОВНЫХ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

## Revision of the Definitions of Basic Units of Physical Quantities

**А. С. Гнатенко**, старший преподаватель кафедры физических основ электронной техники, заместитель декана по научной работе факультета,  
**Ю. П. Мачехин**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой фотоники и лазерной инженерии,  
Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина,  
e-mail: yurii.machekhin@nure.ua

**A. S. Gnatenko**, senior lecturer of the department of physical foundations of electronic engineering, at the faculty,  
**Yu. P. Machekhin**, senior lecturer of the department of physical foundations of electronic engineering, deputy dean for scientific work of the faculty, Kharkov National University of Radioelectronics, Ukraine,  
e-mail: yurii.machekhin@nure.ua

Анализируется последнее решение Генеральной Конференции по мерам и весам, связанное с переопределением основных единиц СИ. Предлагается обсудить условия реализации предложенных определений единиц физических величин. Поскольку эти определения основываются на квантовых явлениях, то переопределения основных физических величин используют не материальные артефакты, а определения, которые основываются на квантовых процессах. Очень важным является тот факт, что после отказа от физических артефактов на их смену приходят аналитические выражения, в основе которых лежат квантовые переменные и константы. На практике для определения ампера понадобится только один инструмент — одноэлектронный насос. Такие инструменты создали несколько лет назад. Они позволяют перемещать определенное количество электронов в течение каждого насосного цикла, что является крайне ценным качеством для фундаментальной науки и метрологии.

Аналізується останнє рішення Генеральної Конференції з мір та ваг, пов'язане з перевизначенням основних одиниць СИ. Пропонується обговорити умови реалізації запропонованих визначень одиниць фізичних величин. Оскільки ці визначення ґрунтуються на квантових явищах, то перевизначення основних фізичних величин використовують не матеріальні арте-

факти, а визначення, які ґрунтуються на квантових процесах. Дуже важливим є той факт, що після відмови від фізичних артефактів на їх зміну приходять аналітичні вирази, в основі яких лежать квантові змінні і константи. На практиці для визначення ампера знадобиться тільки один інструмент — одноелектронний насос. Такі інструменти створили кілька років тому. Вони дозволяють переміщати певну кількість електронів протягом кожного насосного циклу, що є вкрай цінною якістю для фундаментальної науки та метрології.

The article analyzes the latest decision of the General Conference on Weights and Measures related to the redefinition of the basic SI units. This article proposes to discuss the conditions for the implementation of the proposed definitions of units of physical quantities. Since these definitions are based on quantum phenomena, the redefinitions of basic physical quantities use not material artifacts, but definitions based on quantum processes. It is very important that after the rejection of physical artifacts, they are replaced by analytical expressions, which are based on quantum variables and constants. In practice, only one instrument is needed to determine the ampere — a single-electron pump. Such tools were created several years ago. They allow the movement of a certain number of electrons during each pumping cycle, which is extremely valuable for fundamental science and metrology.

**Ключевые слова:** единицы физических величин, СИ, переопределение, артефакты, квантовые явления.  
**Keywords:** units of physical units, SI, redefinition, artifacts, quantum phenomena.

### ВВЕДЕНИЕ

Система СИ базировалась на определении основных единиц физических величин, которые можно было реализовать на основе физических и химических знаний и артефактов. Следующий пересмотр системы СИ был осуществлен в конце 50-х и начале 60-х годов 20 столетия [1].



А. С. Гнатенко



Ю. П. Мачехин

Первый шаг в направлении замены одних артефактов, используемых при определении единиц системы СИ, на другие был осуществлен лет 50 назад в отношении единицы времени, которая была переопределена через частоту перехода между двумя сверхтонкими уровнями цезия. Следующий шаг был сделан лет 40 назад в отношении артефакта, определяющего единицу длины. При пересмотре современной системы СИ скорость света в вакууме была принята в качестве мировой постоянной, в результате чего длина стала определяться через частоту волны излучения, которая стабилизируется по оптическим частотным реперам и скорости света.

Система СИ [2] была введена в 60-х годах 20 века на основе достижений физики и химии, полученных к этому времени. Основными достоинствами СИ являются: универсальность — охват всех областей науки и техники; унификация единиц для всех областей хозяйственных комплексов всех стран мира и видов измерений: механических, тепловых, магнитных, электрических, световых, акустических и т. д.

В 2011 году на Генеральной конференции по мерам и весам было принято решение уйти от материальных объектов и привязать единицы физических величин к физическим фундаментальным константам [3].

### ПОСЛЕДНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ, ВНЕСЕННЫЕ В СИСТЕМУ SI

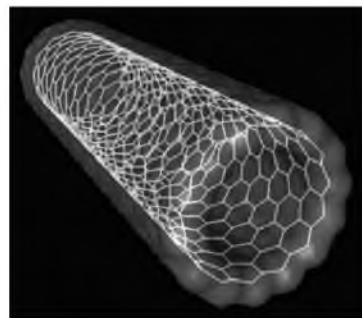
Международная система единиц была принята на XI Генеральной конференции по мерам и весам в октябре 1960 г. В последующем в нее вносились изменения и дополнения. В настоящее время SI состоит из семи основных единиц, двух дополнительных и ряда производных, число которых неограниченно. Соответственно для SI были разработаны семь основных эталонов.

Пересмотр системы SI, осуществленный в 2011 году, позволил ввести следующие определения четырех единиц физических величин.

#### 1. Ампер — единица электрического тока

**Новое определение:** электрический ток, соответствующий потоку  $1/1,6021766208 \times 10^{-19}$  элементарных электрических зарядов в секунду. Для выражения единицы требуется заряд электрона.

В соответствии с новым определением ампера, чтобы создать эталон тока надо использовать электрический заряд отдельного электрона, для достижения высокой точности текущего измерения. Устройство, названное одноэлектронным транзистором, может



манипулировать электрическими зарядами, вплоть до одного электрона и, следовательно, он применим для создания квантованного тока (тока, который состоит только из одного или нескольких электронов).

В принципе, чем меньше устройство, тем лучше оно работает. Однако, размер устройств, изготовленных как из полупроводниковых гетероструктур, так и из металлических частиц, ограничен текущими возможностями технологий литографии.

Большинство конструкций одноэлектронных насосов использует очень маленькую область, слабо соединенную с электронным бассейном, обычно именуемым в металлических системах как остров. Остров является достаточно маленьким, так что дополнение или удаление отдельного электрона приводит к заметному энергетическому различию. Исследователи предложили изменить эту особенность.

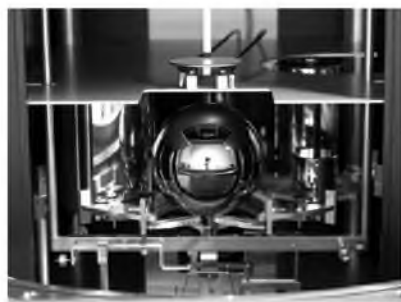
На практике для определения ампера понадобится только один инструмент — одноэлектронный насос. Такие инструменты создали несколько лет назад. Они позволяют перемещать определенное количество электронов в течение каждого насосного цикла, что является крайне ценным качеством для фундаментальной науки и метрологии.

Изменить определение ампера предложили на том же заседании Генеральной конференции по мерам и весам в октябре 2011 года. Идея заключалась в том, что новое определение должно быть основано не на созданном человеком артефакте через мысленный эксперимент, а на фундаментальных физических постоянных или свойствах атомов. **Итак, новое определение выражается только через одну постоянную — заряд электрона.**

#### 2. Моль — единица количества вещества

**Новое определение:** количество вещества системы, которая содержит  $6,022140857 \times 10^{23}$  специфицированных структурных единиц. Для выражения единицы требуется постоянная Авогадро (число Авогадро).

Для вычисления числа Авогадро — и определения моля через него — учёные предложили создать



*Сфера из кремния-28 с чистотой 99,9998.  
Foto: CSIRO Precision Optics  
Sphere of silicon-28 with a purity of 99,9998.  
Photo: CSIRO Precision Optics*

идеальную сферу из чистого кремния-28. У этого вещества идеально точная кристаллическая решётка, так что количество атомов в сфере можно определить, если точно измерить диаметр сферы (с помощью лазерной системы). В отличие от существующего куска платиново-иридиевого сплава, скорость потери атомов кремния-28 точно предсказуема, что позволяет вносить коррективы в эталон.

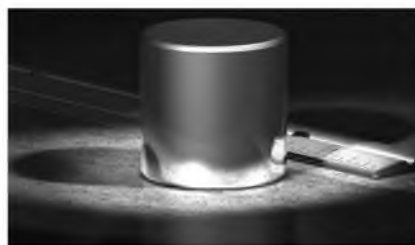
На фото, выполненном в Национальной физической лаборатории Великобритании, представлена Сфера из кремния-28 с чистотой 99,9998%, которая может быть использована для вычисления максимально точного числа Авогадро, которое войдёт в определение единицы измерения количества вещества, известной как моль.

### 3. Килограмм

**Новое определение: эталон килограмма — это масса, при которой постоянная Планка точно равна величине  $6, 62606 \times 10^{-34}$  в минус 34 степени джоулей в секунду.**

При этом Международный прототип (эталон) килограмма хранится в Международном бюро мер и весов (расположено бюро в городе Севре, неподалеку от Парижа) и представляет собой цилиндр диаметром и высотой 39,17 мм из платино — иридиевого сплава (90% платины, 10% иридия). Размер прототипа примерно соответствует размеру мяча для гольфа.

Предложений для реализации эталона было два. Один вариант разработан немецкими учеными совместно с российскими из нижегородского Института химии высокочистых веществ РАН.



*Компьютерное изображение международного прототипа килограмма  
Computer generated image of the international kilogram prototype*

Суть в следующем: в шаре диаметром 98 миллиметров из чистейшего кремния с помощью постоянной Авогадро рассчитывается, сколько должно быть атомов кремния, чтобы вес шара составил один килограмм. Такую сферу сможет легко воспроизвести любой национальный метрологический институт.

Для реализации другого варианта эталона килограмма применены весы Киббла, названные по имени их изобретателя. В таких весах груз на одной чашке весов уравнивают электромагнитные силы, которые действуют на другую чашку. Есть формула, которая связывает эти силы. Именно в электрической части уравнения, где есть данные тока, напряжения и других электромагнитных параметров, «прячется» постоянная Планка.

Благодаря новому определению килограмма каждая страна может воспроизводить эталонную установку самостоятельно в любое время, не прибегая к сверке с главным эталоном. Точность измерения составляет всего 12 частей на миллиард.

Официально платиново-иридиевый цилиндр из Палаты мер и весов «ушел на пенсию» 20 мая 2019 года, во Всемирный день метрологии. Аналогичная судьба постигла ампер, кельвин и моль. Все они получили новые математические определения, связанные с зарядом электрона, постоянной Больцмана и числом Авогадро.

Это сделает систему единиц более стабильной и откроет возможности для развития квантовых технологий, беспилотного транспорта и цифровой экономики. Изменения окончательно вступили в силу 20 мая 2019 года, во Всемирный день метрологии.

### 4. Кельвин — единица термодинамической температурной шкалы

**Новое определение: 1 кельвин соответствует изменению тепловой энергии на  $1,38064852 \times 10^{-23}$  джоулей. Для выражения единицы требуется постоянная Больцмана.**

Тройная точка воды — строго определённые значения температуры и давления, при которых вода

может одновременно и равновесно существовать в виде трёх фаз — в твердом, жидком и газообразном состояниях.

Международный комитет мер и весов подтвердил, что определение кельвина относится к воде, изотопный состав которой определён следующими соотношениями:

0,00015576 моля  $^2\text{H}$  на один моль  $^1\text{H}$ ,  
0,0003799 моля  $^{17}\text{O}$  на один моль  $^{16}\text{O}$ ,  
0,0020052 моля  $^{18}\text{O}$  на один моль  $^{16}\text{O}$ .

Проблемы современного определения очевидны. При практической реализации величина кельвина зависит от изотопного состава воды, а на практике практически невозможно добиться молекулярного состава воды, который соответствует Техническому приложению к тексту Международной температурной шкалы МТШ 90.

Ещё в 2011 году на заседании Генеральной конференции по мерам и весам было предложено в будущей редакции Международной системы единиц переопределить кельвин, связав его со значением постоянной Больцмана. Таким образом значение кельвина впервые будет точно зафиксировано.

Первые опыты по созданию такого эталона предприняли в 2007 году. Исследователи из берлинского Института выращивания кристаллов под руководством Хелге Риманна (*Helge Riemann*) приобрели в России обогащённый кремний-28 и сумели получить образец изотопа 28 с чистотой 99,994 %. После этого исследователи ещё несколько лет анализировали состав 0,006% «лишних» атомов, определяли точный объём сферы и проводили рентгеноструктурный анализ. Изначально предполагалось, что «идеальные» сферы из кремния-28 могут быть утверждены в качестве нового стандарта для килограмма. Но сейчас более вероятно то, что их используют для вычисления числа Авогадро, и, как следствие, определения моля. Тем более, что за время, прошедшее с 2007 года, физики научились производить гораздо более чистый кремний-28.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Переход к обновленной системе единиц гарантирует будущую стабильность *SI* и открывает возможности ее использования для создания определений новых технологий, таких как квантовые технологии. 20 мая 2019 года новые определения вступили в силу. Переопределение единиц стало главным событием последних десятилетий в области измерений физических величин.

Завершение пересмотра *SI* является исторической вехой: речь идет об окончательном отказе от связи *SI* с артефактами. По сути принимается новая система единиц, которая будет использоваться практически во всех странах мира», — сообщил директор Международного бюро мер и весов, доктор Мартин Милтон.

Переход к обновленной системе единиц гарантирует будущую стабильность *SI* и открывает возможности ее использования для создания определений новых технологий, таких как квантовые технологии.

Проблема с эталоном килограмма состоит в том, что любые материалы могут терять атомы или, наоборот, пополняться атомами из окружающего пространства. В частности, различные официальные копии эталонного килограмма, который хранится в Севре, отличаются по весу от официального эталона. Разница достигает 60 микрограмм. Такие изменения произошли за более чем 100 лет с момента создания копий.

Указанные выше определения четырех единиц физических величин представляют собой новые формулировки единиц, основанные на фундаментальных понятиях квантовой физики. Отказ от артефактов в физическом определении единиц физических величин является новым подходом в метрологии. Почти столетний опыт применения на практике артефактов физических величин, которые входят в определения единиц физических величин, показал, что материальные объекты не могут сохранять свою величину долгое время, поэтому было принято решение перевести эталоны физических величин в квантовую область. Следующий этап — формирование квантовых артефактов для построения эталонов физических величин.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

- List of members of the consultative committee for length as of 11 September 2003
- Система СИ. 11th Meeting of the CCL Note.
- 26-ая Генеральная конференция по мерам и весам (26th General Conference on Weights and Measures). ■

Отримано / received: 28.07.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О.Г. Авруніним (Україна).  
Prof. O.G. Avrunin, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.