

# МЕТОДИКА ПРЕПОДАВАНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ДИСЦИПЛИН



УДК 006.91

**Н. А. Жагора**

Белорусский государственный институт метрологии

## О ПЕРЕОПРЕДЕЛЕНИИ ОСНОВНЫХ ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЙ В МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЕ ЕДИНИЦ (SI) И СПОСОБАХ ИХ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

В 2019 г. по решению Генеральной конференции по мерам и весам система SI получит новые определения базовых физических единиц, которые обеспечат их более высокую воспроизводимость. Все эти единицы построены на использовании фундаментальных взаимодействий, не подвержены изменениям во времени и остаются стабильными с высокой точностью при воспроизведении в заданных условиях.

**Ключевые слова:** метрология, система единиц, эталон, измерение, воспроизведение.

**N. A. Zhagora**

Belarusian State Institute of Metrology

## ON THE REFINEMENT OF MAIN UNITS OF MEASUREMENT IN THE INTERNATIONAL SYSTEM OF UNITS (SI) AND METHODS OF THEIR REPRODUCTION

In 2019, by decision of the General Conference on measures and weights, the SI system will receive new definitions of basic physical units that will ensure their higher reproducibility. All these units are based on the use of fundamental interactions. Their values are not the subject to changes over time, and they remain stable with high accuracy when they are reproduced under given conditions.

**Key words:** metrology, system of units, standard, measurement, reproduction.

**Введение.** Применяемая в Республике Беларусь Международная система единиц была разработана с 1948 по 1960 гг., и в 1960 г. органами Метрической конвенции была принята и названа *Systeme International d'unités*, сокращенно SI. Она основывается на предложенной французами метрической системе, и главной идеей системы является формирование всех единиц измерений из нескольких основных в соответствии с законами физики посредством умножения, деления, возведения в степень. Семью основными единицами стали секунда (с), метр (м), килограмм (кг), ампер (А), кельвин (К), кандела (кд) и моль (моль), наименования и обозначения которых остаются неизменными, а определения изменяются с учетом развития науки и техники.

С течением времени основные единицы определялись различными способами, и сегодня в качестве базы для определений используются артефакты (килограмм), идеализированные методики измерения (ампер), свойства материалов (кельвин, моль), установленные технические условия (кандела) или физические постоянные (секунда, метр).

В связи с новыми научными открытиями и успехами технологий, особенно в сфере квантовой физики и полупроводниковой промышленности, для определения базовых величин более целесообразным признается использование физических постоянных (констант) и

соотношений между ними. Так, секунда, метр, а также кандела уже определены через физические постоянные, необходимы новые определения килограмма, ампера, кельвина и моля.

**Основная часть.** Идея соотнести единицы измерений с физическими постоянными принадлежит Максиму Планку, который в 1900 г. открыл закон излучения, в основе которого присутствуют две физические постоянные: Планка  $h$  и Больцмана  $k_B$ . Планк основывал свою систему единиц на следующих четырех постоянных:  $c$  (скорость света),  $G$  (ускорение свободного падения),  $h$  и  $k_B$ . Из них ученый вывел единицу длины  $(Gh/c^5)^{1/2} = 10^{-35}$  м, единицу времени  $(Gh/c^3)^{1/2} = 10^{-43}$  с и единицу массы  $(hc/G)^{1/2} = 10^{-5}$  г. Однако длина Планка и время Планка слишком малы для их использования на практике и поэтому предложенная система развития не получила.

Обстоятельство, что единицы можно соотносить непосредственно с фундаментальными физическими постоянными, можно обнаружить, рассматривая недавно выявленные эффект Холла и эффект Джозефсона, которые являются электронными квантовыми эффектами, а элементарный заряд  $e$  и постоянная Планка  $h$  играют в них существенную роль.

Действующая система SI при определении секунды и метра идет в ногу со временем, в связи с чем необходимости переопределения этих основных единиц пока нет. Наряду с метром и секундой также и кандела, являющаяся единицей силы света, сохраняет свою основу для определения.

В соответствии с решением Генеральной конференции по мерам и весам система SI в 2018 г. подвергнута изменению, которое вступает в силу с 20 мая 2019 г. Числовые значения семи связанных с единицами постоянных, т. е. «определяющих постоянных», будут установлены в точности, без погрешностей, что приведет к тому, что семь основных единиц (с, м, кг, А, К, кд, моль) будут определяться не непосредственно, а косвенно, через постоянные. Данное обстоятельство можно наглядно объяснить на примере скорости света  $c$  и метра. Поскольку секунда определяется через частоту превращения сверхтонкой структуры цезия-133, скорость света теперь устанавливается постоянной с предельной точностью:  $c = 299\,792\,458$  м/с. В этом случае метром является расстояние, которое свет преодолевает за  $1/299\,792\,458$  с.

В новой системе SI главную роль будут играть следующие семь постоянных:

- частота  $\Delta\nu$  ( $^{133}\text{Cs}$ )<sub>hfs</sub> перехода между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия составляет ровно 9 192 631 770 герц (Гц);
- скорость света в вакууме  $c$  составляет ровно 299 792 458 метров в секунду (м/с);
- постоянная Планка  $h$  составляет ровно  $6,626\,070\,040 \cdot 10^{-34}$  джоулей в секунду (Дж/с);
- элементарный заряд  $e$  составляет ровно  $1,602\,176\,6208 \cdot 10^{-19}$  кулона (Кл);
- постоянная Больцмана  $k_B$  составляет ровно  $1,380\,648\,52 \cdot 10^{-23}$  джоулей на кельвин (Дж/К);
- постоянная Авогадро  $N_A$  составляет ровно  $6,022\,140\,857 \cdot 10^{23}$  на моль (моль<sup>-1</sup>);
- фотометрический эквивалент излучения  $K_{cd}$  монохроматического излучения частоты  $540 \cdot 10^{12}$  Гц составляет ровно 683 люменов на ватт (лм·Вт<sup>-1</sup>).

В качестве основных постоянных были выбраны величины, которые с высокой точностью измерены в прежней системе SI и обладают малой относительной погрешностью измерения, которая составляет около  $10^{-8}$ .

Частота (герц) и секунда точнее всего поддаются измерению, и именно по этой причине определение секунды посредством частоты цезия было оставлено в силе, хотя данная частота и является не фундаментальной физической постоянной, а атомным параметром, который подвергается внешним помехам, например от электрических и магнитных полей. Поскольку данные помехи поддаются контролю, частота цезия может быть воспроизведена с высокой точностью, и относительная погрешность современных цезиевых часов составляет  $10^{-16}$ .

Последующие три постоянных действительно являются физическими константами: скорость света  $c$ , постоянная Планка  $h$  и элементарный заряд  $e$ . После того как скорость

света была измерена с относительной погрешностью  $10^{-9}$ , уже в 1983 г. было зафиксировано значение, которое лежит в основе новой системы SI. Поскольку постоянная фон Клитцинга  $R_K = h/e^2$  и постоянная Джозефсона  $K_J = 2e/h$  известны с относительными погрешностями  $10^{-10}$  и  $10^{-8}$ , погрешности  $h$  и  $e$  соответственно малы, в связи с чем оба значения были приняты в качестве опорных постоянных.

Новые определения семи основных единиц выглядят следующим образом:

– секунда, условное обозначение [с], – единица времени в системе SI. Она определяется путем принятия фиксированного числового значения частоты цезиевого резонанса  $\Delta\nu_{Cs}$ , частоты невозмущенного сверхтонкого перехода основного состояния атома цезия-133, равным 9 192 631 770 в единицах Гц, где герц соответствует  $s^{-1}$ ;

– метр, условное обозначение [м], – единица длины в системе SI. Она определяется путем принятия фиксированного числового значения скорости света в вакууме  $c$  равным 299 792 458 в единицах м/с, где секунда определена через  $\Delta\nu_{Cs}$ ;

– килограмм, условное обозначение [кг], – единица массы в системе SI. Она определяется путем принятия фиксированного числового значения постоянной Планка  $h$  равным  $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$  в единицах Дж·с, что соответствует  $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$ , где метр и секунда определены через  $c$  и  $\Delta\nu_{Cs}$ ;

– ампер, условное обозначение [А], – единица силы электрического тока в системе SI. Она определяется путем принятия фиксированного числового значения элементарного заряда  $e$  равным  $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$  в единицах Кл, что соответствует А·с, где секунда определена через  $\Delta\nu_{Cs}$ ;

– кельвин, условное обозначение [К], – единица термодинамической температуры в системе SI. Она определяется путем принятия фиксированного числового значения постоянной Больцмана  $k$  равным  $1,380\,649 \cdot 10^{-23}$  в единицах Дж·К<sup>-1</sup>, что соответствует  $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$ , где килограмм, метр и секунда определены через  $h$ ,  $c$  и  $\Delta\nu_{Cs}$  соответственно;

– моль, условное обозначение [моль], – единица количества вещества в системе SI. Один моль содержит ровно  $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$  элементарных структурных единиц. Это число соответствует фиксированному числовому значению постоянной Авогадро  $N_A$  в единицах моль<sup>-1</sup> и называется числом Авогадро. Количество вещества в некоторой системе, обозначаемое символом  $n$ , является мерой числа заданных элементарных структурных единиц. В качестве таких элементарных структурных единиц могут выступать атомы, молекулы, ионы, электроны, а также любые другие частицы или группы частиц;

– кандела, условное обозначение [кд], – единица силы света в заданном направлении в системе SI. Она определяется путем принятия фиксированного числового значения световой эффективности монохроматического излучения с частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц  $K_{cd}$  равным 683 в единицах лм·Вт<sup>-1</sup>, что соответствует кд·ср·Вт<sup>-1</sup>, или кд·ср·кг<sup>-1</sup>·м<sup>-2</sup>·с<sup>3</sup>, где килограмм, метр и секунда определены через  $h$ ,  $c$  и  $\Delta\nu_{Cs}$  соответственно.

Определение единиц является лишь начальным этапом для практических измерений – надо еще технически материализовать, воспроизвести эти единицы в виде эталонов или эталонных методов.

Для основных единиц секунда и метр и для производных единиц ом и вольт существуют высокоточные методы измерения при помощи цезиевых или водородных атомных часов, стабилизированных лазеров, квантового эффекта Холла, эффекта Джозефсона.

Что касается килограмма, моля, ампера и кельвина, то для них методы измерений сравнимой точности разрабатываются.

Воспроизведение килограмма можно выполнить двумя принципиально разными методами, что позволяет осуществить их взаимный контроль. Условно их можно назвать «кремниевый шар» и «токовые или ватт-весы».

Образец современного «эталонного килограмма» в виде кремниевого шара был изготовлен усилиями специалистов по выращиванию особо чистых и однородных кристаллов

природного кремния из России, мастеров Германии и Австралии по тщательному и высокоточному изготовлению из них идеальных шаров, ученых Германии, Японии и Канады по определению состава и количества атомов кремния. В итоге это полированный до почти идеальной шаровидной формы кристалл кремния диаметром 9,4 см и массой в 1 кг из высокообогащенного кремния-28 без инородных атомов. Кремний был выбран по той причине, что полупроводниковая промышленность имеет многолетний опыт выращивания почти безупречных кристаллов кремния.

После того как посредством рентгеновского структурного анализа были измерены параметры кристаллической решетки монокристалла, а следовательно, и расстояние между атомами, а также при помощи измерений диаметров шара в интерферометре достаточно точно был установлен объем шара, было вычислено количество атомов кремния в шаре.

Таким образом, макроскопическую массу кремниевого шара, которая может быть измерена сравнением с эталонным килограммом, можно соотнести с массой атома и с постоянной Планка. Благодаря этому, с одной стороны, появилась возможность уточнить постоянную Авогадро, т. е. количество атомов в одном моле вещества, и реализовать моль. С другой стороны, при помощи кремниевого шара определена (уточнена) постоянная Планка с относительной неопределенностью  $2 \cdot 10^{-8}$ , которой в новой системе единиц будет приписано точное (неизменное) значение.

Второй метод воспроизведения килограмма основан на прецизионных весах. В литературе подобные весы называются по-разному – ватт-весы, токовые весы, весы Киббла, но их объединяет общая идея – сила тяжести массы компенсируется силой, которая действует на токовую катушку в магнитном поле. В катушке сила тока определяется по результатам наиболее передовых измерений сопротивления и напряжения на основе квантовых эффектов Холла и Джозефсона, благодаря чему обеспечивается не только высокая точность, но и «привязка» к физическим константам, в том числе к постоянной Планка.

Поскольку конструкция ватт-весов сложна, а эксперименты с ними представляют значительную трудность, то, по всей видимости, предпочтение будет отдано кремниевому шару, хотя изготовление его тоже является весьма затратным.

В новой SI есть две возможности реализовать ампер. Первая методика основывается на законе Ома  $U = R \cdot I$ , что позволяет установить величину тока посредством измерения сопротивления с помощью квантового эффекта Холла и напряжения с помощью эффекта Джозефсона.

Вторая методика основывается на определении ампера через элементарный заряд и эталонную частоту цезия. Ампер реализуется с помощью электронной схемы, в которой считаются поштучно электроны, проходящие через схему за определенный (измеряемый) промежуток времени. Схема состоит из нескольких расположенных друг за другом «насосов электронов», которые поодиночке «перемещают» электроны с заданным тактом частотой в гигагерцы. Отдельные элементы микросхемы контролируют подачу электронов без промежутков, непрерывно. При помощи четырех соединенных последовательно насосов и трех детекторов прохождения электронов удастся оценивать и измерять возникающие токи, величина которых сегодня достигает несколько наноамперов.

Совместное применение обеих методик позволяет произвести проверку определения единиц вольт, ом и ампер, что уже проделано экспериментально с точностью выше  $10^{-6}$ .

Сегодня определение кельвина «привязано» к тройной точке воды, изотопный состав и чистота которой сильно влияют на точность воспроизведения единицы. Долговременная стабильность такого воспроизведения температуры также не гарантируется. С установлением фиксированного значения постоянной Больцмана будет предложено новое определение кельвина, которое будет опираться на эту постоянную. Кельвин в данном случае будет мерой такого изменения температуры, которое соответствует изменению тепловой энергии точно на  $1,380\ 648\ 52 \cdot 10^{-23}$  Дж.

**Заключение.** Прогресс в технике измерений и появление новых методик измерений создадут возможности в будущем более точного измерения физических величин, что позволит реализовать (воспроизвести) основные единицы с большей точностью без изменения лежащих в основе новой системы SI определений.

#### **Информация об авторе**

**Жагора Николай Адамович** – доктор технических наук, доцент, главный специалист по метрологии и стандартизации. РУП «Белорусский государственный институт метрологии» (220053, г. Минск, ул. Старовиленский тракт, 93). E-mail: zhagora@belgim.by.

#### **Information about the author**

**Zhagora Nickolay Adamovich** – DSc (Engineering), Chief specialist in metrology and standardization. RUE “Belarusian State Institute of Metrology” (93, Starovilenskiy Trakt str., 220053, Minsk, The Republic of Belarus). E-mail: zhagora@belgim.by.

*Поступила 15.12.2018*