

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЕДИНИЦ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ SI В ЭТАЛОНАХ

В статье рассмотрены основные единицы физических величин, включенные в международную систему SI, их эволюция и воспроизведение в современных эталонах

Создание эталонной базы по-прежнему остается актуальной проблемой в метрологической деятельности любой страны. Выбрать эталон физической величины не так-то просто. Ведь если для эталона килограмма можно взять энное количество вещества и сделать его образцом, то для выбора определения времени или тока невозможно сделать образец, который можно подержать в руках или потрогать. Исторически сложилось так, что законные научно обоснованные связи были установлены вначале в области геометрии и кинематики, затем динамики, термодинамики и электромагнетизма. В результате основным единицам системы SI были даны соответствующие определения, которые в процессе эволюции науки претерпевали существенные изменения.

Метр был в числе первых единиц, для которых были введены эталоны. Первоначально за эталон метра была принята одна десятимиллионная часть четверти длины Парижского меридиана. В 1799 г. на основе ее измерения изготовили эталон метра в виде платиновой концевой меры - линейки шириной 25 мм, толщиной 4 мм с расстоянием между концами 1 м. Требования к повышению точности эталона длины, а также целесообразность установления естественного и неразрушимого эталона привели к принятию (1960 г.) в качестве эталона метра длины, равной $1\ 650\ 763,73$ длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86 (криптоновый метр).

Физическая сущность такого подхода состоит в том, что атомы излучают и поглощают электромагнитную энергию на строго фиксированных частотах, связанных с длиной волны соотношением:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

где ν - число колебаний в секунду (частота излучения), λ - длина волны, c - скорость света. Электроны в атомах, переходя с одной орбиты на другую, излучают (или поглощают) энергию, равную

$$E = h \cdot \nu = T_1 - T_2 \quad (2)$$

где h - постоянная Планка, T_1 и T_2 - энергии разрешенных орбиталей в данном атоме. Одним из следствий теории квантования энергии в атоме является соотношение неопределенности Гайзенберга, утверждающее, что время нахождения электрона в возбужденном состоянии (Δt_i) и его энергия в этом состоянии (ΔE_i) не могут быть одновременно измерены абсолютно точно.

Другими словами, линия, излучаемая или поглощаемая атомами, не является монохроматичной и имеет разброс (неопределенность) в энергии, жестко связанный со средним временем нахождения электрона в возбужденном состоянии, называемым временем жизни атома в этом состоянии.

Криптоновый эталон мог воспроизводиться в отдельных метрологических лабораториях, точность его по сравнению с платиноиридиевым прототипом была на порядок выше. Дальнейшие исследования позволили создать более точный эталон метра, основанный на длине волны в вакууме монохроматического излучения, генерируемого стабилизированным лазером. За эталон метра в 1983 г. было принято расстояние, проходимое светом в вакууме за $1/299\,792\,458$ долей секунды. Данное определение метра было законодательно закреплено в декабре 1985 г. после утверждения единых эталонов времени, частоты и длины.

Исторические аспекты проблемы измерения времени с давних пор связывались с движением Земли вокруг своей оси и с движением Земли вокруг Солнца. Однако продолжительные наблюдения показали, что вращение Земли подвержено нерегулярным колебаниям, которые не позволяют рассматривать его в качестве достаточно стабильной естественной основы для определения единицы времени.

Многочисленные исследования позволили создать эталон единицы времени, основанный на способности атомов излучать и поглощать энергию во время перехода между двумя энергетическими состояниями в области радиочастот. С появлением высокоточных кварцевых генераторов и развитием радиосвязи появилась возможность реализации нового эталона секунды и единой шкалы мирового времени. В 1967 г. XIII Генеральная конференция по мерам и весам приняла новое определение секунды как интервала времени, в течение которого совершается $9\,192\,631\,770$ колебаний, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133 при отсутствии возмущения внешними полями.

Данное определение реализуется с помощью цезиевых реперов частоты. Репер, или квантовый стандарт частоты, представляет собой устройство для точного воспроизведения частоты электромагнитных колебаний в сверхвысокочастотных и оптических спектрах, основанное на измерении частоты квантовых переходов атомов, ионов или молекул.

При объединении эталонов метра, Герца и секунды кроме установок с интерферометром и с цезиевыми часами был создан специальный измерительный комплекс, позволяющий сопоставить без потери точности оптические и радиочастотные измерения. Этот комплекс получил название

«радиочастотный мост». Реализация эталона метра, эталона Герца совместно с радиочастотным мостом позволила создать метрологический эталонный комплекс, воспроизводящий единицы метра и секунды, а также единицу производной величины - частоты Герц, которая является наиболее точно воспроизводимой единицей из всех физических величин.

Единица термодинамической температуры Кельвин определяется как $1/273,16$ часть температуры тройной точки воды, то есть такого состояния чистой воды, когда лед, жидкая вода и водяной пар находятся в тепловом равновесии. XIII Генеральная ассамблея по мерам и весам в 1967 г. наряду с абсолютной термодинамической шкалой утвердила в качестве производной шкалу Цельсия. В международной практике также широко используется шкала Фаренгейта и реже - шкала Реомюра.

Эталонные комплексы, воспроизводящие и передающие размер основной единицы термодинамической температуры системы SI, представляют собой набор тройных точек воды, газовый термометр, откалиброванный по тройной точке воды, и набор термостатов - реперных точек, воспроизводящих определяющие и вторичные реперные точки Международной практической температурной шкалы МПТШ-90.

Принцип, положенный в основу работы газового термометра, состоит в том, что температура идеального газа, являясь параметром состояния, изменяется в соответствии с универсальным газовым законом:

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} = \frac{m}{\mu} \cdot R \quad (3)$$

Практически это означает, что если взять баллон с газом и поместить его в сосуд с тройной точкой воды, то можно зафиксировать параметры состояния газа (p , V , T). Если в дальнейшем поместить сосуд в термостат с другой температурой, то фиксируя либо давление, либо объем можно по изменению объема или давления измерить любую, отличную от температуры тройной точки воды, температуру.

На практике для точных измерений используются платиновые термометры сопротивления или термопары, которые градуируются по реперным точкам. От платиновых термометров и термопар размер единицы температуры Кельвина передается образцовым или рабочим термометрам менее высокого класса точности. Для высоких температур единица температуры может быть воспроизведена оптическими приборами - пирометрами. Температуры тел выше 1000 К могут быть измерены по собственному тепловому излучению тела в оптическом диапазоне длин волн. При таком воспроизведении единица температуры реализуется в виде абсолютно черного тела. Здесь возникают понятия радиационной, цветовой и яркостной температур.

При обсуждении международной системы единиц SI, было решено оставить одну произвольно выбираемую электрическую единицу, так, чтобы имелась возможность сопоставления электрических величин с величинами, характеризующими пространство и время - длиной, массой и временем. За

основу был принят тот факт, что два проводника с постоянным током действуют друг на друга с силой, изменяющей свой знак при изменении направления токов на обратный (сила Ампера). В итоге было сформулировано определение единицы силы постоянного тока – Ампера. Ампер – это сила не изменяющегося во времени электрического тока, который, протекая в вакууме по двум бесконечным и параллельным проводникам пренебрежимо малого круглого поперечного сечения, находящимися друг от друга на расстоянии 1 м, создают электродинамическую силу, действующую на эти проводники и равную $2 \cdot 10^{-7}$ Ньютона на каждый метр их длины. Согласно принятому определению Ампер был реализован в виде двух установок. На первой измеряли силу, действующую на малую катушку в однородном магнитном поле. На второй измеряли момент силы, действующий на малую катушку с током. Измерения силы, действующей на катушку с током, проводились на установке, получившей название Ампер-весов.

Согласно определению XIII Генеральной конференции по мерам и весам единица силы света кандела определяется как сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц (длина волны 555 нм), энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1/683 Ватта на стерадиан (1/683 Вт/ср). В соответствии с определением канделы эта величина воспроизводится на эталонах, представляющих из себя черный излучатель при температуре плавления платины и нормальном давлении.

Основной единицей в механике является килограмм. При становлении метрической системы мер в качестве единицы массы приняли массу одного кубического дециметра чистой воды при температуре ее наибольшей плотности (4°C). Изготовленный при этом первый прототип килограмма представлял собой платиноиридиевую цилиндрическую гирю высотой и диаметром 39 мм. Данное определение эталона килограмма действует до сих пор. Точность, достигаемая с помощью имеющегося эталона килограмма, очень высока и пока удовлетворяет все запросы практики.

Для описания химических процессов очень важно знать число элементарных частиц, атомов или молекул, принимающих участие в химических реакциях. По этой причине моль называют химической основной единицей системы SI, подчеркивая этим тот факт, что она вводится не для описания каких-то новых явлений, а для обслуживания специфических измерений, связанных с химическим взаимодействием веществ и материалов.

Международная система единиц SI не является установленной для всех на все времена. Методы физических измерений постоянно совершенствуются. Именно по этой причине переопределен целый ряд величин, например, метр, кандела, Ампер. Почти для всех основных единиц системы SI, кроме килограмма, приняты новые определения, основанные на физических явлениях, отличающихся постоянством и неподверженностью влиянию внешних воздействий. Тем не менее, поиски возможности замены искусственного эталона массы обозначена сейчас метрологами как одна их наиболее актуальных научных и практических проблем.