

МЕТРОЛОГИЯ И ТЕОРИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Лекция 2. Воспроизведение и хранение информации о размерах единиц физических величин

Эталон единицы величины

Решение одной из основных задач метрологии — обеспечение единства измерений достигается как за счет точного воспроизведения, хранения и передачи размеров установленных единиц физических величин, так и за счет применяемых средств измерения.

Единицы физических величин в настоящее время воспроизводят с помощью специальных технических средств, называемых эталонами.

Эталон единицы величины — это средство измерений, предназначенное для воспроизведения, хранения и передачи единицы величины.



Международный эталон

Международный эталон принимается по международному соглашению в качестве международной основы для согласования с ним размеров единиц, воспроизводимых и хранимых национальными эталонами.

Международный эталон килограмма хранится в Международном бюро мер и весов (расположено в Севре близ Парижа) и представляет собой цилиндр диаметром и высотой 39,17 мм из платино-иридиевого сплава (90 % платины, 10 % иридия).



Эталон килограмма

Килограмм - единственная из основных единиц системы СИ, которая используется с приставкой. Также является последней единицей СИ, которые были определены на основе объекта, изготовленного человеком, а не на основе физических свойств, что могут быть воспроизведены в разных лабораториях. Четыре из семи базовых единиц в системе СИ определены с учётом килограмма, поэтому постоянство его величины очень важно.

Международный эталон килограмма был выпущен Генеральной конференцией по мерам и весам в 1889 году на основе Метрической конвенции (1875) и под надзор Международного бюро мер и весов (МБМВ), которое хранит его от лица ГКМВ. После того как было обнаружено, что международный эталон килограмма с течением времени даёт отличия в массе, Международный комитет мер и весов (МКМВ) в 2005 году рекомендовал переопределить килограмм с помощью фундаментальных физических свойств. В 2011 году XXIV ГКМВ пришла к соглашению, что килограмм должен быть переопределён на основе постоянной Планка, но отложила окончательное решение до следующей конференции в 2014 году. XXV ГКМВ, состоявшаяся в 2014 году, приняла решение продолжить работу по подготовке новой ревизии СИ, включающей переопределение килограмма, и предварительно наметила закончить эту работу к 2018 году с тем, чтобы заменить существующую СИ обновлённым вариантом на XXVI ГКМВ.

Секунда

Основные исторические определения секунды:

- 1832 год: немецкий математик Карл Фридрих Гаусс предложил использовать секунду в качестве базовой единицы времени в своей системе единиц, использующей наряду с секундой миллиметр и миллиграмм.
- 1874 год: Британская Научная Ассоциация (*англ. British Science Association*) разработала систему единиц измерения СГС (сантиметр-грамм-секунда).
- 1940-е годы: секунда определена как $1/86400$ средних солнечных суток.
- 1956 год: определение секунды было скорректировано и привязано к понятию «года» (период обращения Земли вокруг Солнца), взятого для определённой эпохи, поскольку к тому времени стало известно, что вращение Земли вокруг своей оси не может быть использовано в качестве достаточно надёжного основания, в виду того, что это вращение замедляется, а также подвержено нерегулярным скачкам. Таким образом, секунда получила следующее определение:

« $1/31\,556\,925,9747$ доля тропического года для 0 января 1900 в 12 часов эфемеридного времени»

- 1967 год: XIII ГКМВ определила секунду атомного времени как:

«Секунда есть время, равное $9\,192\,631\,770$ периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.»

- 1997 год: на совещании Международного комитета мер и весов определение секунды было уточнено с добавлением следующего определения:

«Это определение относится к атому цезия, не возмущённому внешними полями при температуре 0 К»

Метр

Метр — длина пути, проходимая светом в вакууме за интервал времени $1/299792458$ доли секунды.

Основа	Дата	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
$\frac{1}{10\,000\,000}$ часть четверти Парижского меридиана, определённая по результатам измерений, проведённых Деламбром и Мешеном	1795	0,5—0,1 мм	10^{-4}
Первый эталон Metre des Archives из платины	1799	0,05—0,01 мм	10^{-5}
Платино-иридиевый профиль при температуре таяния льда (1-я ГКМВ)	1889	0,2—0,1 мкм	10^{-7}
Платино-иридиевый профиль при температуре таяния льда и атмосферном давлении, поддерживаемый двумя роликами (VII ГКМВ)	1927	-	-
1 650 763,73 длин волн оранжевой линии (6056 Å) спектра, излучаемого изотопом криптона ^{86}Kr в вакууме (XI ГКМВ)	1960	4 нм	$4 \cdot 10^{-9}$
Длина пути, проходимого светом в вакууме за $(1/299\,792\,458)$ секунды (XVII ГКМВ)	1983	0,1 нм	10^{-10}

Ампер

- 1881 год: принятие единицы измерения на 1-м Международном конгрессе электриков и названа в честь французского физика Андре Ампера.
- 1946 год: предложено современное определение ампера Международным комитетом мер и весов.
- 1948 год: определение принято IX ГКМВ.

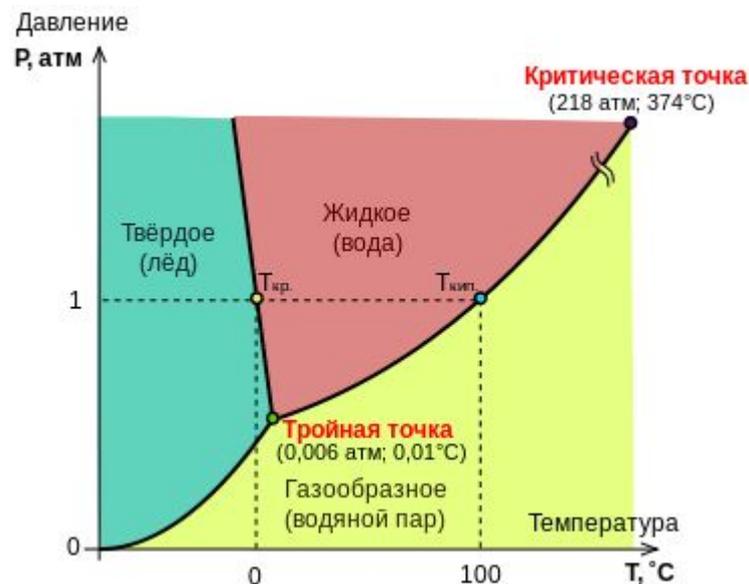
«Ампер — сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 метр один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 метр силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ ньютона»

- 2011 год: XXIV ГКМВ приняла резолюцию, в которой предложено в будущей ревизии Международной системы единиц (СИ) продолжить переопределение основных единиц таким образом, чтобы они были основаны не на созданных человеком артефактах, а на фундаментальных физических постоянных или свойствах атомов. В частности, предполагается, что СИ станет системой единиц, в которой элементарный электрический заряд e равен $1,60217 \cdot 10^{-19}$ Кл точно. Результатом этого явится отмена ныне действующего определения ампера и принятие нового. Величина ампера будет установлена в соответствии с новым точным значением элементарного электрического заряда, выраженным в с·А. В связи с этим в резолюции XXIV ГКМВ по поводу ампера сформулировано следующее положение:

Ампер останется единицей силы электрического тока, но его величина будет устанавливаться фиксацией численного значения элементарного электрического заряда равным в точности $1,60217 \cdot 10^{-19}$, когда он выражен единицей СИ с·А, что эквивалентно Кл.

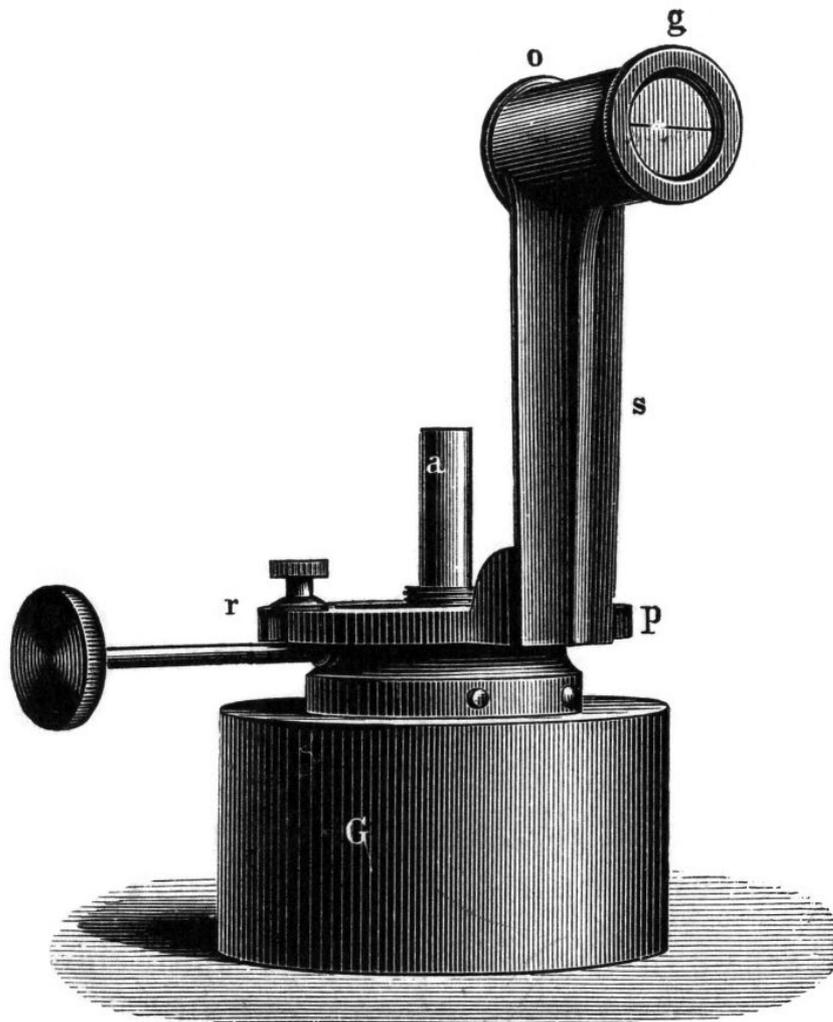
Кельвин

- 1848 год: Уильям Томсон в своей работе «Об абсолютной термометрической шкале» («On an Absolute Thermometric Scale») пишет о необходимости шкалы, нулевая точка которой будет соответствовать предельной степени холода (абсолютному нулю), а ценой деления будет градус Цельсия. 1954 год: Третья резолюция X ГКМВ дала шкале Кельвина современное определение, взяв температуру тройной точки воды в качестве второй опорной точки и приняв, что её значение составляет ровно 273,16 кельвина. Тройная точка воды — строго определённые значения температуры и давления, при которых вода может одновременно и равновесно существовать в виде трёх фаз — в твёрдом, жидком и газообразном состояниях. Тройная точка воды — температура 273,16 К (0,01 °С) и давление 611,657 Па.
- 1967/1968 года: в соответствии с третьей резолюцией XIII ГКМВ единица измерения термодинамической шкалы была переименована в «кельвин», а обозначением стал «К» (ранее единица называлась «градус Кельвина», её обозначением был «°К»). Кроме того величина единицы была определена более явно — как равная $1/273,16$.
- 2005 год: Консультативный комитет по термометрии установил требования к изотопному составу воды при реализации температуры тройной точки воды.



Кандела

- 1893 год: в Германии, а затем в Австрии, Швейцарии и в скандинавских странах в качестве единицы силы света была принята «свеча Хефнера», эталоном при этом служила фитильная лампа специальной конструкции.



Кандела

- 1896 год: Международным электротехническим конгрессом была принята «десятичная свеча», равная 1,12 свечи Хефнера.
- 1909 год: десятичная свеча была заменена «международной свечой», равной 1,11 свечи Хефнера. Международная свеча воспроизводилась не с помощью фитильной лампы, а при помощи специальных ламп накаливания.
- 1948 год: решение о принятии новой единицы — канделы. Кандела базировалась на использовании светового эталона, обладающего свойствами, близкими к свойствам абсолютно чёрного тела (Планковского излучателя). Излучателем света в эталоне служила трубка, изготовленная из плавленной окиси тория и окружённая со всех сторон платиной, находящейся при температуре отвердевания (2046,6 К). Кандела определялась как сила света, излучаемого в направлении нормали с $1/60$ кв. см излучающей поверхности указанного эталона. Введённая таким образом кандела была в 1,005 раз меньше, чем международная свеча
- 1979 год: XVI ГКМВ приняла действующее определение канделы.
- 2011 год: XXIV ГКМВ приняла резолюцию, в которой, в частности, предложено в будущей ревизии Международной системы единиц принять новое определение канделы. Предполагаемое новое определение, квалифицируемое в резолюции, как полностью эквивалентное существующему, сформулировано следующим образом.

«Кандела, обозначение кд, является единицей силы света в данном направлении; её величина определена путём установления численного значения световой эффективности монохроматического излучения с частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц в точности равным 683, если она выражена единицей СИ $\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^3 \cdot \text{кд} \cdot \text{ср}$, или $\text{кд} \cdot \text{ср} \cdot \text{Вт}^{-1}$, которая равна $\text{лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$ ».

Изменения в определениях по итогам 2018 года

Изменения определений основных единиц Международной системы единиц (СИ), предложенные в 2018 году Международным комитетом мер и весов, были приняты 16 ноября 2018 года, когда за них единогласно проголосовала XXVI Генеральная конференция мер и весов.

Новые определения СИ вступили в силу 20 мая 2019.

Основное заключение:

- *7 основных единиц измерения — секунда, метр, килограмм, ампер, кельвин, моль и кандела — останутся. Из них килограмм, ампер, кельвин и моль будут переформулированы в своих определениях с использованием числовых значений постоянных Планка и Больцмана, элементарного электрического заряда и числа Авогадро. Секунда, метр и кандела уже выражены через константы, поэтому их определения понадобится лишь уточнить.*

Международная система единиц, СИ, — это система единиц, в которой:

- *частота сверхтонкого расщепления основного состояния атома цезия-133 в точности равна 9192631770 Гц;*
- *скорость света в вакууме c в точности равна 299 792 458 м/с;*
- *постоянная Планка h в точности равна $6,626070 15 \cdot 10^{-34}$ кг·м²·с⁻¹;*
- *элементарный электрический заряд e в точности равен $1,602 176 634 \cdot 10^{-19}$ А·с;*
- *постоянная Больцмана k в точности равна $1,380 649 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;*
- *постоянная Авогадро N_A в точности равна $6,022 140 76 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹;*
- *световая эффективность K_{cd} монохроматического излучения частотой 540 · 10¹² Гц в точности равна 683 лм/Вт.*

Эталоны, отличные от международного

- Первичным называется эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы с наивысшей в стране точностью.
- Специальный эталон обеспечивает воспроизведение единицы величины в особых условиях, когда прямую передачу размера единицы от первичного эталона с требуемой точностью технически реализовать невозможно. Он заменяет для этих условий первичный эталон.
- Государственный эталон - это эталон единицы величины, утвержденный в установленном порядке и применяемый в качестве исходного в Российской Федерации. На каждый государственный эталон утверждается ГОСТ и назначается ученый-хранитель эталона. Большинство государственных эталонов единиц физических величин хранятся во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии им. Д.И. Менделеева в Санкт-Петербурге. В области измерений электрических и магнитных величин на сегодня создано более 30 государственных эталонов. Основу их составляют эталоны, которые воспроизводят единицы наиболее точно и определяют размер остальных производных единиц.
- Вторичный эталон - это эталон, получающий размер единицы величины непосредственно от государственного эталона данной единицы величины.
- Эталон-свидетель - вторичный эталон, предназначенный для проверки сохранности Государственного эталона и замены его в случае порчи или утраты. Эталон-свидетель применяют лишь тогда, когда Государственный эталон является невозпроизводимым.

Эталоны, отличные от международного

- Эталон-копия — вторичный эталон, предназначенный для передачи размеров единиц рабочим эталонам. Заметим, что эталон-копия не всегда является физической копией Государственного эталона.
- Эталон сравнения — вторичный эталон, применяемый для сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличаемыми друг с другом (невозможность перевозки). Например, для сличения Государственного эталона вольты с международным эталоном вольты используют «нормальный элемент».
- Рабочий эталон — эталон, применяемый для передачи размера единицы физической величины рабочим средствам измерений. По результатам метрологической аттестации рабочие эталоны могут подразделяться на разряды: первый, второй, третий, четвертый.
- Исходный эталон — эталон юридического лица или индивидуального предпринимателя, который обладает наивысшими метрологическими свойствами для данного юридического лица или индивидуального предпринимателя и от которого передается размер единицы величины другим эталонам и средствам измерений.

Эталон вольты

С 1990 года вольт стандартизирован посредством измерения с использованием нестационарного эффекта Джозефсона (явление протекания сверхпроводящего тока через тонкий слой диэлектрика, разделяющий два сверхпроводника), при котором для привязки к эталону используется константа Джозефсона, зафиксированная 18-й Генеральной конференцией по мерам и весам как:

$$K_{J-90} = \frac{2e}{h} = 0,4835979 \text{ ГГц} / \text{мкВ}$$

где e — элементарный заряд, h — постоянная Планка

Этим методом величина вольты однозначно связывается с эталоном частоты, задаваемым цезиевыми часами: при облучении матрицы, состоящей из нескольких тысяч джозефсоновских переходов, микроволновым излучением на частотах от 10 ГГц до 80 ГГц, возникает вполне определённое электрическое напряжение, с помощью которого калибруются вольтметры. Эксперименты показали, что этот метод нечувствителен к конкретной реализации установки и не требует введения поправочных коэффициентов.