

### ЛЕКЦИЯ 3. ОСНОВНЫЕ ЕДИНИЦЫ СИСТЕМЫ СИ И ИХ ЭТАЛОНЫ

В соответствии с решениями Генеральной конференции по мерам и весам, принятыми в разные годы, действуют следующие определения основных единиц системы СИ.

Единица длины – **метр** – длина пути, проходимого светом в вакууме за  $1/299792458$  доли секунды (решение XVII ГКМВ, 1983 г.).

В 1791 г. Национальное собрание Франции постановило принять за основную единицу длины  $1/10000000$  часть четверти земного меридиана. В 1799 г. на основе геодезических измерений Парижского меридиана и его соответствующей части был изготовлен вещественный образец (прототип) метра в соответствии с его определением. Этот образец, изготовленный в виде платиновой концевой меры и получивший название "архивного метра" прослужил в качестве единственного эталона метра почти 90 лет. К 1889 г. Международное бюро мер и весов, изготовило из платиноиридиевого сплава 34 копии архивного метра, одна из которых (№ 6 — наиболее близкая к архивному метру) была принята 1-й ГКМВ (1889 г.) в качестве международного прототипа метра, а остальные копии переданы странам, подписавшим метрическую конвенцию.

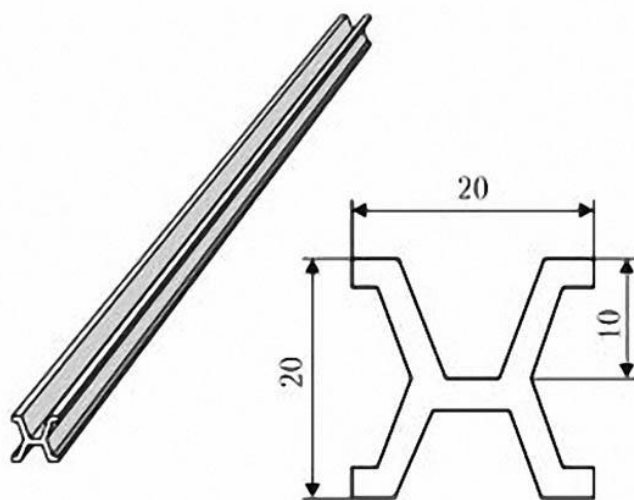


Рис. 3.1. Первый государственный первичный эталон метра.

Две такие копии (№28 и №11) получила Россия, копия №28 явилась первым Государственным эталоном метра в нашей стране, утвержденным в 1918 году и просуществовавшим в этом ранге вплоть до 1968 года, когда в качестве государственного первичного был утвержден новый эталон метра, соответствующий новому "световому" определению единицы длины.

Сейчас государственный первичный эталон единицы длины РФ воспроизводится в специальной установке, где с помощью интерферометров

измеряется отношение длин волн, излучаемых в вакууме двумя гелий - неоновыми лазерами, один из которых имеет длину волны  $\lambda=0,633$  мкм, а другой  $\lambda=3,39$  мкм. Институтом-хранителем эталона является ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева».

Единица массы – **килограмм** – масса, равная массе международного прототипа килограмма (решение ГКМВ, 1889 г.).

Государственный эталон единицы массы является самым древним из всех государственных эталонов, хотя в современном его составе он был утвержден в 1968 г. Вначале его размер задан как масса воды в объеме кубического дециметра в нормальных условиях, за которые принята температура  $+4^{\circ}\text{C}$ , при которой вода имеет наибольшую плотность. В 1889 г. по результатам тщательных измерений массы 1 дм<sup>3</sup> воды во Франции был изготовлен первый прототип килограмма – платиноиридиевая гиря в виде цилиндра высотой 39 мм, равной ее диаметру, впоследствии названная архивным килограммом. В 1878–1883 гг. были изготовлены 43 новые килограммовые гири по образцу архивного килограмма из платиноиридиевого сплава. Одна из этих гирь, масса которой оказалась наиболее близкой к архивному килограмму, в 1899 г. на I-ой ГКМВ была принята в качестве международного прототипа килограмма, который и определяет в настоящее время размер единицы массы для всех стран Метрической конвенции. Россия получила в 1889 году две копии (№12 и №26) международного килограмма.



**Рис. 3.2. Государственный первичный эталон единицы массы**

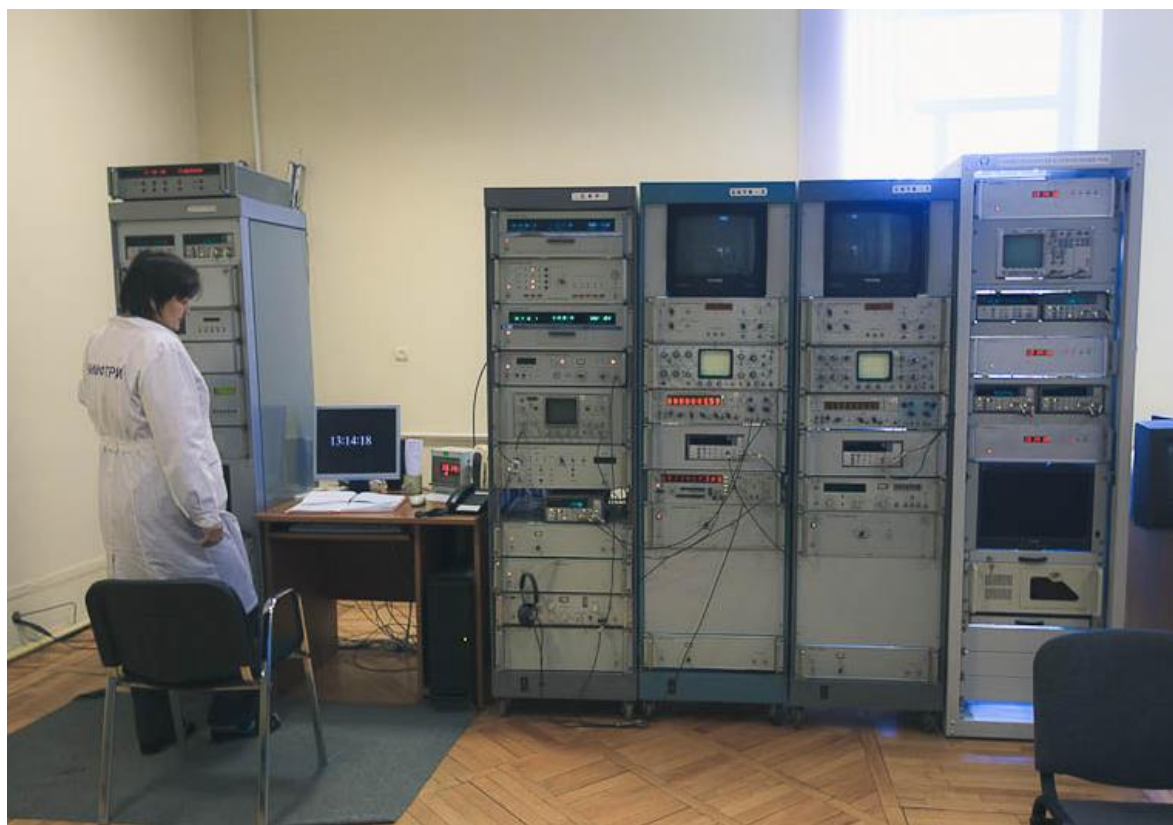
Все национальные прототипы каждые 25 – 35 лет должны сличаться в МБМВ с международным прототипом килограмма (или с его эталонами - свидетелями). Для содержания эталонов (№12 и №26) используются сложные приемы бережливого хранения и ювелирная техника работы на эталоне.

Но даже при самом тщательном и осторожном применении прототипа неизбежно его взаимодействие с внешними объектами, неизбежен износ (изменение массы). Поэтому для его применения и хранения были выбраны особые правила и приемы, прежде всего – максимальное сокращение его пе-

ремещений и использование для передачи размера единицы нескольких эталонов-копий, сличение которых с прототипом №12 производится методом совокупных измерений.

Для минимизации изменений массы прототипа он хранится на кварцевой пластинке под двумя стеклянными колпаками в стальном шкафу особого сейфа, находящегося в термостатированном помещении. Годовое колебание температуры в помещении не превышает  $2^{\circ}\text{C}$ . Важным элементом Государственного первичного эталона килограмма являются эталонные весы, при помощи которых осуществляется передача размера единицы вторичным эталонам — эталонам-копиям массой в 1 кг. Сличения проводятся примерно 1 раз в 10 лет. Эталонные весы являются одним из наиболее точных измерительных устройств. Государственный первичный эталон единицы массы хранится и применяется во ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева».

Единица времени — **секунда** — промежуток 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 внешних возмущающих полей (решение XIII ГКМВ в 1967 г.).



**Рис. 3.3. Часть государственного первичного эталона единицы времени и частоты (ФГУП «ВНИИФТРИ»).**

Государственный первичный эталон единиц времени одновременно является и государственным первичным эталоном единицы частоты. Эталон времени — особенный. По своей структуре — это самый сложный из всех

эталонов. Все остальные эталоны вводятся в действие периодически, для сличения с ними вторичных и рабочих эталонов. Эталон времени, хранящий шкалу времени, нельзя остановить, как нельзя остановить время. Он работает всегда. Есть такой афоризм: время – очень простое понятие, пока вы не попытаетесь объяснить его кому-нибудь. С полным основанием эти слова можно отнести и к эталону времени. Меньше всего он напоминает часы, а оборудование и научные подразделения, которые обеспечивают эксплуатацию эталона, занимают большое здание.

В состав эталона времени входит целый комплекс аппаратуры, каждое звено которого представляет сложное техническое устройство. Находится он во ФГУП «ВНИИФТРИ», где занимает пять термостатных комнат и четыре аппаратных зала. Аппаратура размещена на специальных фундаментах, связанных от корпуса здания, и экранирована от внешних магнитных полей. Температура в термостатных комнатах в течение года изменяется не более чем на  $4^{\circ}\text{C}$ , в течение суток – не более  $0,2^{\circ}\text{C}$ . Влажность колеблется в пределах  $70\pm 10\%$ .

Единица силы электрического тока – **ампер** – сила неизменяющегося тока, которая при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, создал бы между этими проводниками силу, равную  $2\cdot 10^{-7}\text{ Н}$  на каждый метр длины (одобрено IX ГКМВ в 1948 г.).

С 1992 году в качестве государственного первичного эталона силы постоянного электрического тока в диапазоне от  $10^{-16}$  до 30 А утверждён эталон, состоящий из двух комплексов. В первом применяется способ воспроизведения размера единицы силы тока (1 мА и 1 А) с использованием косвенных измерений силы тока  $I = U/R$ , причём размер единицы электрического напряжения – вольт – воспроизводится с помощью квантового эффекта Джозефсона, размер единицы электрического сопротивления – Ом – с помощью квантового эффекта Холла.

Второй комплекс воспроизводит силу постоянного тока в диапазоне от  $10^{-16}$  до  $10^{-9}$ . Его основу составляет многозначная мера силы тока, включающая меру линейно изменяющегося электрического напряжения с набором герметизированных конденсаторов, прибора для измерения напряжения, прибора для измерения времени и сравнивающего устройства.

Государственный первичный эталон силы электрического тока хранится во ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева».

Единица термодинамической температуры – **кельвин** (до 1967 г. имел наименование «градус Кельвина») –  $1/273,16$  часть термодинамической температуры тройной точки воды. Допускается выражение термодинамической температуры в градусах Цельсия (резолюция XIII ГКМВ, 1967 г.).

Особенность термодинамической температуры состоит также в том, что она является неаддитивной физической величиной. Поэтому, если для

эталонов длины, массы, и других аддитивных величин можно опираться на воспроизведение размеров установленных единиц (метр, килограмм и др.), то для температуры воспроизведение одной эталонной точки не позволит точно установить другие эталонные точки. Таким образом, измерение температуры требует осуществить точное воспроизведение многих температурных точек, совокупность которых образует температурную шкалу.

Наиболее точно термодинамическая температурная шкала реализуется при помощи газового термометра. Однако газовый термометр является достаточно сложным устройством, а измерения на нем имеют серьезные трудности, длительны и кропотливы. Поэтому еще в 1927 г. VII ГКМВ приняла первый вариант международной практической шкалы (МПТШ–27). В дальнейшем (в 1948, 1960 и 1968 гг.) шкалу пересматривали в связи с новыми достижениями в температурных измерениях. В настоящее время действует Международная температурная шкала образца 1990 г. (МТШ–90).

Температурная шкала МТШ–90 поддерживается двумя государственными первичными эталонами единицы температуры. Государственный эталон единицы температуры в диапазоне  $0 \dots 2500^\circ\text{C}$  представляет комплекс эталонов, включающий эталон кельвина, установку для воспроизведения реперных точек затвердевания цинка, серебра, золота и др., а также интерполяционных приборов – платиновых термометров сопротивления и термоэлектрических термометров. Для измерения тройной точки воды используется газовый термометр. Институтом–хранителем эталона является ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

Второй государственный первичный эталон в диапазоне температур  $0,8 \dots 303 \text{ K}$  имеет ряд измерительных установок. В диапазонах  $0,8 \dots 4,2 \text{ K}$  и  $4,2 \dots 13,81 \text{ K}$  температура воспроизводится с помощью газового термометра, а в диапазоне  $13,81 \dots 303 \text{ K}$  используются платиновые термометры сопротивления. Этот эталон хранится во ФГУП «ВНИИФТРИ».

Единица количества вещества – **моль** – количество вещества системы, содержащее столько же структурных элементов, сколько атомов содержится в нуклиде углерода -12 массой  $0,012 \text{ кг}$  (резолюция XIV ГКМВ, 1971 г.).

В настоящее время эталона количества вещества не существует. Одной из причин того, что такой эталон не создан, является недостаточная четкость определения этой единицы и отсутствие метода ее измерения в соответствии с определением. Также есть мнение, что эту единицу трудно назвать основной, так как в ее определение связано с единицей массы. Вполне возможно, что эта единица будет переведена в разряд специальных единиц массы.

Единица силы света – **кандела** – сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой  $540 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$ , энергетическая сила света которого в этом направлении составляет  $1/683 \text{ Вт/ср}$  (резолюция XVI ГКМВ, 1979 г.).



Государственный первичный эталон единиц силы света и светового потока непрерывного излучения представляет целый комплекса средств измерений: высокотемпературную широкоапертурную модель черного тела, система измерений термодинамических параметров, групповой фотометр, систему измерений спектральных характеристик, интегрирующую сферу и др. Следует отметить, что с помощью этой эталонной установки кандела определяется путем косвенных измерений и, следовательно, является производной физической величиной, формально оставаясь основной. Эталон хранится во ФГУП «ВНИИОФИ».



Установка для воспроизведения единиц силы света и светового потока.



Комплекс гониофотометрический для измерения силы света, пространственного распределения силы света, светового потока

**Рис. 3.4. Государственный первичный эталон единицы силы света и светового потока непрерывного излучения (ФГУП «ВНИИОФИ»).**

Производные единицы системы СИ образуются на основании законов, устанавливающих связь между физическими величинами, или принятых определений физических величин.

Соотношение, определяющее связь между данной производной единицей и основными единицами системы, называют **формулой размерности**. В формуле размерности указаны алгебраические действия, необходимые для выражения производной единицы через основные. Обозначения основных единиц системы, подставляемые в формулы размерности, приведены в Таблице международной системы единиц СИ (см. табл. 2.1 Лекция 2). В формулы размерности основные величины входят в различных степенях и связаны между собой произведением. Символы величин в формулах принято ставить в алфавитном порядке.

Например, численное значение площади получают при перемножении числовых значений двух отрезков длины, поэтому формула размерности имеет вид:

$$[S]=L \cdot L=L^2$$

Квадратные скобки означают, что имеется в виду «размерность» той величины, обозначение которой заключено в этих скобках.

Рассмотрим еще примеры нескольких физических величин, широко применяемых в технике.

**Сила.** Определяющее уравнение силы:

$$F=ma,$$

где  $m$  – масса тела, кг;  $a$  – ускорение, м/с<sup>2</sup>.

Единица силы – ньютон (Н, N) – сила, сообщающая телу массой 1 кг ускорение 1 м/с<sup>2</sup> в направлении силы.

Размерность единицы силы:

$$[F]=[m] \cdot [a]=LMT^{-2}.$$

**Давление.** Определяющее уравнение давления – это отношение силы  $F$  перпендикулярной некой поверхности к площади  $S$  этой поверхности:

$$p=F/S,$$

где  $p$  – давление в паскалях (Па, Pa), если сила  $F$  выражена в ньютонах;  $S$  – площадь, м<sup>2</sup>.

Размерность давления:

$$[p]=L^{-1}MT^{-2}.$$

**Работа, энергия.** Для работы  $A$  силы, перемещающей некоторое тело в направлении действия силы на длину  $l$ , определяющее уравнение имеет следующий вид:

$$A=Fl,$$

Единица работы – джоуль (Дж, J) – работа силы, равной 1 Н, при перемещении ею точки приложения на расстояние 1 м в направлении действия силы.

Размерность работы:

$$[A]=L^2MT^{-2}.$$

**Мощность.** Она представляет собой выполненную работу в единицу времени.

$$P=A/t,$$

Единица мощности – ватт (Вт, W) – мощность, при которой за время 1с выполняется работа 1 Дж.

Размерность мощности:

$$[P]=L^2MT^{-3}.$$

Для более удобного представления больших и малых количественных значений той или иной физической величины в Международной системе единиц СИ принято использовать кратные и дольные единицы.

**Дольные единицы** – единицы, которые составляют определенную часть (долю) от установленной единицы физической величины.

**Кратные единицы** – единицы, которые в целое число раз больше установленной единицы физической величины.

Кратные и дольные единицы обозначаются специальными приставками, а для их образования используются десятичные множители. Наиболее распространенные кратные и дольные единицы приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

**Кратные и дольные единицы системы СИ**

Единицы	Приставка	Множитель	Наименование	
			русское	международное
Кратные	экса	$10^{18}$	Э	E
	пета	$10^{15}$	П	P
	тера	$10^{12}$	Т	T
	гига	$10^9$	Г	G
	мега	$10^6$	М	M
	кило	$10^3$	к	k
	гекто	$10^2$	г	h
Дольные	дека	$10^1$	да	da
	деци	$10^{-1}$	д	d
	санتي	$10^{-2}$	с	s
	милли	$10^{-3}$	м	m
	микро	$10^{-6}$	мк	μ
	нано	$10^{-9}$	н	n
	пико	$10^{-12}$	п	p
	фемто	$10^{-15}$	ф	f
	атто	$10^{-18}$	а	a