

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Рязанский институт (филиал)

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования

«Московский политехнический университет»

Кафедра «Информатика и информационные технологии»

Г. И. Мельник, Е. В. Тинина

## МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ (СИ). ИЗМЕНЕНИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЙ ОСНОВНЫХ

ЕДИНИЦ

Учебное пособие

Рязань  
2019



УДК 530  
ББК 22.3  
М48

Мельник, Г. И.

М48 Международная система единиц (СИ). Изменения определений основных единиц. Учебное пособие / Г. И. Мельник, Е. В. Тинина. – Рязань: Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета, 2019. – 23 с.

Учебное пособие предназначено для студентов очной и заочной форм обучения всех направлений и специальностей, изучающих дисциплину «Физика» и может быть использовано для работы со старшекурсниками политехнических классов.

В данном пособии приведены данные об изменениях основных единиц Международной системы единиц, которые были приняты на XXVI Генеральной конференции мер и весов 16 ноября 2018 года, вступающие в силу 20 мая 2019 года.

Печатается по решению методического совета Рязанского института (филиала) Московского политехнического университета.

УДК 530  
ББК 22.3

© Мельник Г.И., Тинина Е.В., 2019  
© Рязанский институт (филиал)  
Московского политехнического  
университета, 2019

## Содержание

Введение.....	4
1 Килограмм.....	6
2 Кельвин.....	9
3 Моль.....	11
4 Ампер.....	13
5 Метр.....	14
6 Секунда.....	16
7 Кандела.....	18
Заключение .....	19
Список использованной литературы.....	20
Приложение А .....	21
Приложение Б .....	22



## Введение

Формирование Международной системы единиц измерений началось с 1799 года, когда появились стандарты веса и длины, изготовленные из платины. В 1889 году они были названы международными эталонами. До возникновения современной системы СИ несколько десятилетий базовыми единицами считали сантиметр, грамм, секунда (система CGS), потом в качестве базовых величин были выбраны метр, килограмм и секунда (МКС). В 1939 году предложили к ним добавить ампер, и в 1946 году была утверждена система единиц МКСА. На конференции в 1954 году базовыми единицами в дополнение к метру, килограмму и секунде стали ампер, кельвин и кандела. В 1960 году появилось название International System of Units (SI). В результате споров и дискуссий между физиками и химиками 14-я конференция проголосовала за базовую единицу количества вещества, и в 1971 году моль вошёл в систему СИ, став седьмой базовой единицей. В настоящее время СИ принята в качестве законной системы единиц измерения большинством стран мира и почти всегда используется в области науки (даже в тех странах, которые не приняли СИ). Система СИ не обладает статичностью, она развивается в соответствии с требованиями, которые в настоящее время предъявляются к измерениям в науке и технике.

Раньше для определения 7 базовых величин существовали первичные эталоны, например, платинородиевый слиток в роли точной меры одного килограмма или один метр, который был равен  $1 \cdot 10^7$  части четверти длины парижского меридиана. С помощью таких образцов производилась калибровка измерительных приборов. Но так как эталон может со временем подвергаться изменениям характеристик вещества под влиянием внешних факторов, впоследствии произошёл переход к фундаментальным константам, неизменным для всего мироздания.

"Изобретение" эталонов и договорённости между многими странами мира об их применении имели огромное значение и влияние на развитие международной торговли, сыграли важную роль в науке и в производстве. Но постепенно у учёных накопились претензии к выбранному в качестве эталонов физическим объектам. Нужна большая точность и стабильность эталонов как единиц измерения.

16 ноября 2018 года в Париже состоялась XXVI Генеральная конференция по мерам и весам, на которой килограмм, ампер, кельвин и моль получили новые, более точные физические определения. Теперь они выражены

не через объекты реального мира, а через абстрактные математические константы. Секунда, метр и кандела ранее выражены через константы, поэтому их определения будут только уточняться. Эти изменения улучшат СИ, не изменив величины единиц, что обеспечит совместимость с существующими измерениями. Новые определения СИ вступают в силу 20 мая 2019 года.

На рисунке 1 представлена связь между основными физическими величинами и фундаментальными константами, через которые они выражены в новой структуре Международной системе единиц измерений.

## New SI

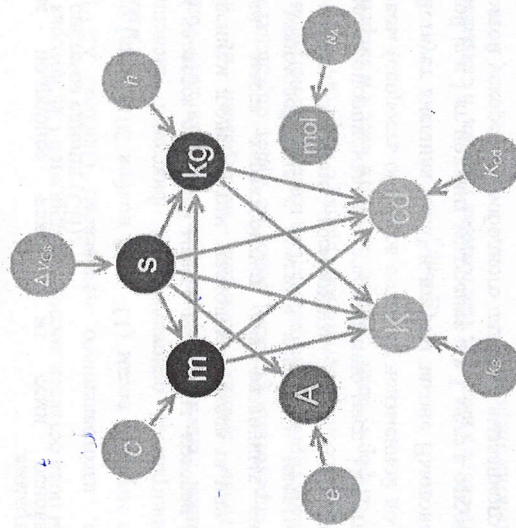


Рисунок 1 – Основные единицы Международной системы единиц (СИ)

Согласно новым определениям килограмм, ампер, кельвин и моль переопределены на основании постоянной Планка, элементарного электрического заряда, постоянной Больцмана и числа Авогадро соответственно:

- постоянная Планка  $h$  в точности равна  $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ;
- элементарный электрический заряд  $e$  в точности равен  $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ А} \cdot \text{с}$ ;
- постоянная Больцмана  $k$  в точности равна  $1,380\,649 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ ;
- число Авогадро  $N_A$  в точности равно  $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ .

Ранее секунда, метр и кандела уже были определены на основании частоты излучения при переходе между двумя сверхтонкими уровнями



основного состояния атома цезия-133, скорости света в вакууме и максимального значения световой эффективности излучения:

- частота излучения при переходе между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133  $\Delta\nu_{Cs}$  в точности равна 9 192 631 770 Гц;
- скорость света в вакууме  $c$  в точности равна 299 792 458 м/с;
- максимальное значение световой эффективности  $k_{cd}$  монохроматического излучения частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц в точности равно 683 лм/Вт.

Рассмотрим подробнее каждую из семи основных единиц Международной системы единиц (СИ).

### 1 Килограмм

Килограмм является единицей массы, величины, которая соотносится с общим представлением людей о том, насколько тяжела та или иная вещь. В терминах физики, масса характеризует два различных свойства тела: гравитационное взаимодействие с другими телами и инертность. Первое свойство выражается законом всемирного тяготения: гравитационное притяжение прямо пропорционально произведению масс. Инертность находит отражение в первом (скорость объектов остаётся неизменной до тех пор, пока на них не воздействует внешняя сила) и втором законе Ньютона:  $a = F/m$ ; то есть объект массой  $m$  в 1 кг получит ускорение  $a$  в 1 метр в секунду за секунду (около одной десятой ускорения свободного падения, вызванного притяжением Земли), когда на этот объект действует сила (или равнодействующая всех сил) в 1 ньютон. По современным представлениям, гравитационная и инертная массы эквивалентны.

Действующее до мая 2019 года определение килограмма принято III Генеральной конференцией по мерам и весам (ГКМВ) в 1901 году и формулируется так:

*Килограмм — единица массы, равная массе международного прототипа килограмма.*

При этом Международный прототип (эталон) килограмма хранится в Международном бюро мер и весов (расположено в городе Севр неподалёку 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. 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.

Ещё одна проблема с единицами измерения фиксированного масштаба — то, что элемент неопределённости (погрешность) увеличивается по мере удаления от этой фиксированной точки (эталона). Например, сейчас при измерении миллиграмма элемент неопределённости в 2500 раз больше, чем при измерении килограмма.

Килограмм пока остаётся последней единицей СИ, которая определена на основе объекта, изготовленного человеком. Однако, XXVI Генеральная конференция по мерам и весам (13 — 16 ноября 2018 года) одобрила новое определение килограмма, основанное на фиксации численного значения постоянной Планка. Решение вступит в силу 20 мая 2019 года. При этом с практической точки зрения величина килограмма не изменится, но существующий «прототип» (эталон) более не будет определять килограмм, а станет очень точной гирькой с потенциально измеримой погрешностью.

Связь между массой и постоянной Планка с теоретической точки зрения определяется двумя формулами. Эквивалентность массы и энергии связывает энергию и массу:

$$E=mc^2,$$

где  $c$  — скорость света в вакууме. Постоянная Планка  $h$  связывает квантовое и традиционное понятия энергии:

$$E = h\nu,$$

где  $\nu$  — частота.

Эти две формулы, найденные в начале XX века, устанавливают теоретическую возможность измерения массы через энергию индивидуальных фотонов, но практические эксперименты, позволяющие связать массу и постоянную Планка, появились лишь в конце XX века.

В 1999 году было предложено определять массу с помощью усовершенствованных токовых весов (рисунок 2), которые представляют собой электромеханический инструмент, где масса вычисляется через электрическую мощность

$$U_{I_2} = mgv,$$



После подстановки выражений для  $U$  и  $R$  в формулу для мощности и объединения всех целочисленных коэффициентов в одну константу  $C$ , масса оказывается линейно связанной с постоянной Планка:

$$m = C f_1 f_2 \frac{h}{g v_1}.$$

Поскольку все остальные величины в этом уравнении могут быть определены независимо от массы, оно может быть принято за определение единицы массы после фиксации значения  $6,62607015 \times 10^{-34}$  для постоянной Планка.

Новое определение: 1 килограмм равен постоянной Планка, поделенной на  $6,626070040 \times 10^{-34} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ .

## 2 Кельвин

**Кельвин** — единица термодинамической температуры в Международной системе единиц (СИ), одна из семи основных единиц СИ. Предложена в 1848 году. Единица названа в честь английского физика Уильяма Томсона, которому было пожаловано звание лорд Кельвин Ларгский из Айршира. В свою очередь, это звание пошло от реки Кельвин, протекающей через территорию университета Глазго.

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. Эта абсолютная шкала на сегодняшний день известна как термодинамическая шкала Кельвина. Значение температуры абсолютного нуля в градусах Цельсия «минус 273» было получено как обратное от 0,00366 — коэффициента расширения газа на градус Цельсия, что точно соответствует текущему принятому значению.

Третья резолюция X Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) в 1954 году 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. До 1968 года кельвин официально именовался *градусом Кельвина*.

Таким образом, единица температуры оказывается в зависимости от качества производства тройной точки воды. Исследования последних лет показали, что на стабильность температуры тройной точки воды влияет состав стекла ампулы, степень очистки воды и изотопный состав воды. Исследования, включающие сличения ампул с различным изотопным составом воды показали,

где  $U_1 I_2$  — произведение электрического тока  $I_2$  во время балансирования массы и напряжения  $U_1$  в процессе калибровки,  $g v_1$  — произведение ускорения свободного падения и скорости катушки во время калибровки весов. Если  $g v_1$  независимо замерено с высокой точностью (практические особенности эксперимента также требуют высокоточного замера частоты), предыдущее уравнение по сути определяет килограмм в зависимости от величины ватта (или наоборот). Индексы  $U_1$  и  $I_2$  введены с тем, чтобы показать, что это виртуальная мощность (замеры напряжения и тока делаются в разное время), избегая эффектов от потерь (которые могли бы быть вызваны, например, наведёнными токами Фуко).

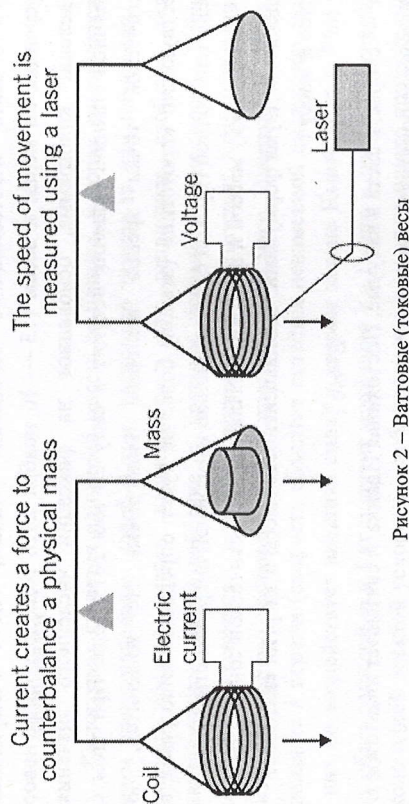


Рисунок 2 – Ваттовые (токовые) весы

Связь между ваттом и постоянной Планка использует эффект Джозефсона и квантовый эффект Холла.

Поскольку  $I_2 = \frac{U_2}{R}$ , где  $R$  — электрическое сопротивление,

$$U_1 I_2 = \frac{U_1 U_2}{R};$$

эффект Джозефсона:

$$U(n) = n f \left( \frac{h}{2e} \right);$$

квантовый эффект Холла:

$$R(i) = \frac{1}{i} \left( \frac{h}{e^2} \right),$$

где  $n$  и  $i$  — целые числа,  $f$  — частота из эффекта Джозефсона,  $e$  — заряд электрона.



что расхождения в значениях температур могут достигать нескольких десятых мК. В июне 2005 г. Консультативный комитет выпустил Техническое приложение к МТШ-90, которое получило статус обязательного приложения к тексту шкалы. В приложении дается определение тройной точки воды, включающее требование к изотопному составу воды. Тройная точка воды – температура равновесия газообразной, жидкой и твердой фаз воды, при условии, что жидкая фаза воды имеет следующий изотопный состав:

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  $^{16}\text{O}$ .

Температуре тройной точки воды по определению приписано значение 273,16 К в соответствии с МТШ-90.

На практике невозможно добиться молекулярного состава воды, который соответствует Техническому приложению к тексту Международной температурной шкалы МТШ-90. Поэтому проблемы современного определения очевидны. Исходя из стремления устранить этот недостаток, предложено при ревизии Международной системы единиц переопределить кельвин, связав его величину со значением постоянной Больцмана. При этом предполагается, что значение постоянной Больцмана будет зафиксировано, то есть будет считаться определенным *точно*.

Кельвин останется единицей термодинамической температуры; но его величина будет устанавливаться фиксацией численного значения постоянной Больцмана равным в точности  $1,380\,649 \cdot 10^{-23}$ , когда она выражена единицей СИ  $\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ , что эквивалентно Дж·К<sup>-1</sup>.

Следствием этого явится то, что кельвин станет равным изменению температуры, которое приводит к изменению энергии, приходящейся на одну степень свободы  $kT$ .

Определение, которое вводится с 20 мая 2019: «Кельвин, символ  $K$ , это единица термодинамической температуры, которая определена путем установления фиксированного численного значения постоянной Больцмана  $k$  равным  $1,380649 \times 10^{-23}$ , Дж·К<sup>-1</sup> ( $\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ )» Данное определение было утверждено 16 ноября 2018 года на XXVI-й Генеральной конференции по весам и мерам (КГПМ).

### 3 Моль

**Моль** (русское обозначение: *моль*; международное: *mol*; устаревшее название *грамм-молекула* (по отношению к количеству молекул); от лат. *moles* — количество, масса, счётное множество) — единица измерения количества вещества в Международной системе единиц (СИ), одна из семи основных единиц СИ.

Моль принят в качестве основной единицы СИ XIV Генеральной конференцией по мерам и весам (ГКМВ) в 1971 году.

Определение моля настоящее время формулируется так:

*Моль — количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц.*

Из определения моля непосредственно следует, что молярная масса углерода-12 равна 12 г/моль *точно*.

Количество специфицированных структурных элементов в одном моле вещества называется постоянной Авогадро (числом Авогадро), обозначаемой обычно как  $N_A$ . Таким образом, в углероде-12 массой 0,012 кг содержится  $N_A$  атомов. Значение постоянной Авогадро, рекомендованное Комитетом по данным для науки и техники (CODATA) в 2014 году, равно  $6,022140857(74) \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>. Отсюда, 1 атом углерода-12 имеет массу  $0,012/N_A$  кг =  $12/N_A$  г. 1/12 массы атома углерода-12 называют атомной единицей массы (обозначение а. е. м.), и, следовательно,  $1 \text{ а. е. м.} = 0,001/N_A$  кг =  $1/N_A$  г. Таким образом, масса одного моля вещества (молярная масса) равна массе одной частицы вещества, атома или молекулы, выраженной в а. е. м. и умноженной на  $N_A$ . То есть, из определения а. е. м. вытекает, что молярная масса вещества, выраженная в граммах на моль, **численно** равна массе мельчайшей частицы (атома или молекулы) этого вещества, выраженной в атомных единицах массы.

При нормальных условиях объём одного моля идеального газа составляет 22,413 996(39) л. Значит, один моль кислорода занимает объём 22,413 996(39) л (для простых расчётов 22,4 л) и имеет массу 32 г.

XXVI Генеральная конференция по мерам и весам (13—16 ноября 2018 года) одобрила новое определение моля, основанное на фиксации численного



значения постоянной Авогадро. Решение вступит в силу во Всемирный день метрологии 20 мая 2019 года.

Пока определение моля связано с массой. Новое определение моля будет базироваться на фиксированном численном значении постоянной Авогадро, которой будет приписано *точное* значение, основанное на результатах измерений, рекомендованных CODATA. В связи с этим сформулировано, что моль останется единицей количества вещества.

По мнению Международного бюро мер и весов (БМВВ), новое определение моля сделает его независимым от определения килограмма, а также подчеркнёт различие между физическими величинами *количество вещества* и *масса*.

Новое определение: *моль - 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 предлагают создать 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-иридевого сплава, скорость потери атомов кремния-28 точно предсказуема, что позволяет вносить коррективы в эталон.

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 Si-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. В настоящее время физики сумели обогатить кремний-28 до беспрецедентного качества в 99,9998% в рамках международного проекта по расчёту числа Авогадро.

#### 4 Ампер

Ампер — единица измерения силы электрического тока в Международной системе единиц (СИ), одна из семи основных единиц СИ.

Определение, которое использовалось до настоящего времени, было предложено Международным комитетом мер и весов в 1946 году и принято IX Генеральной конференцией по мерам и весам (ГКМВ) в 1948 году: «Ампер есть сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямым 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».

Из определения ампера следует, что магнитная постоянная  $\mu_0$  равна Гн/м или, что то же самое, Н/А<sup>2</sup> точно. Это утверждение становится понятным, если учесть, что сила взаимодействия двух расположенных на расстоянии  $d$  друг от друга бесконечных параллельных проводников, по которым текут токи  $I_1$  и  $I_2$ , приходящаяся на единицу длины, выражается соотношением:

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{d}$$

В этом определении ампер определяется через некий мысленный эксперимент, который предусматривает возникновение силы в двух проводах бесконечной длины. Очевидно, что на практике мы не можем измерить такую силу, потому что по определению не может существовать двух проводников бесконечной длины.

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

В частности, предполагалось, что СИ станет системой единиц, в которой элементарный электрический заряд  $e$  равен  $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$  Кл точно. Результатом этого должна была явиться отмена действовавшего определения ампера и принятие нового, величина ампера должна была быть установлена в



соответствии с новым точным значением элементарного электрического заряда, выраженным в с·А.

16 ноября 2018 года на XXVI Генеральной конференции мер и весов была принято новое определение ампера, основанное на использовании численного значения элементарного электрического заряда. Формулировка, вступающая в силу 20 мая 2019 года, гласит:

*Ампер, символ А, есть единица электрического тока в СИ. Она определена путём фиксации численного значения элементарного заряда равным  $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ , когда он выражен единицей Кл, которая равна А·с, где секунда определена через  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .*

На практике для определения ампера понадобятся только один инструмент — одноэлектронный насос. Такие инструменты создали несколько лет назад. Они позволяют перемещать определённое количество электронов в течение каждого насосного цикла, что является крайне ценным качеством для фундаментальной науки и метрологии. 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). С использованием концепции сверхпроводящих электродов и естественной углеродной нанотрубки была продемонстрирована высокая степень токового квантования.

## 5 Метр

Метр (франц. metre, от греч. metron — мера) — расстояние, проходимое светом в вакууме за  $1:299\,792\,458$ -ую долю секунды. 1 метр равен 10 дециметрам (дм), 100 сантиметрам (см), 1000 миллиметрам (мм). 1000 метров равно 1 километру (км). Согласно первому определению, принятому во Франции в 1791 г., метр был равен  $1 \cdot 10^{-7}$  части четверти длины парижского меридиана. Размер метра был определён на основе геодезических и астрономических измерений Ж. Деламбра и П. Мешена. Первый эталон метра был изготовлен французским мастером Лемуаром под руководством Ж. Борда (1799 г.) в виде концевой меры длины — платиновой линейки шириной около 25 мм, толщиной около 4 мм, с расстоянием между концами, равным принятой единице длины. Он получил наименование "метр архива" или "архивный метр" (по месту хранения). Однако, как оказалось, определённый таким образом метр не мог быть вновь точно воспроизведён из-за отсутствия точных данных о

фигуре Земли и значительных погрешностей геодезических измерений. В 1872 году Международная метрическая комиссия приняла решение об отказе от "естественных" эталонов длины и о принятии архивного метра в качестве исходной меры длины. По нему был изготовлен 31 эталон в виде шпиховой меры длины — бруса из сплава Pt (90%) и Ir (10%). Поперечное сечение эталона имеет форму X, придающую ему необходимую прочность на изгиб. Вблизи концов нейтральной плоскости эталона нанесено по 3 штриха. Постановлением I-й Генеральной конференции по мерам и весам этот эталон был принят в качестве международного прототипа метра. Прототип метра и два его контрольные копии хранятся в Севре (Франция) в Международном бюро мер и весов. В Научно-исследовательском институте им. Д. И. Менделеева (НИИМ) в Санкт-Петербурге хранятся две копии (№ 11 и № 28) Международного прототипа метра. При введении метрической системы мер в СССР (1918 г.) государственным эталоном метра была признана копия № 28. Международный прототип метра, погрешность которого  $1 \cdot 10^{-7}$ , и национальный прототипы обеспечивали поддержание единства и точности измерений на необходимом для науки и техники уровне в течение десятков лет. Рост требований к точности линейных измерений и необходимость создания воспроизводимого эталона метра стимулировали исследования по определению метра через длину световой волны. XI-я Генеральная конференция по мерам и весам (1960 г.) приняла новое определение метра, положенное в основу Международной системы единиц (СИ): "Метр — длина, равная  $1650763,73$  длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями  $2p_{10}$  и  $5d_5$  атома криптона  $86$ ". Для обеспечения высокой точности воспроизведения метра в международной спецификации строго оговорены условия воспроизведения первичного эталонного излучения. Монохроматическое излучение, соответствующее оранжевой линии криптона, создаётся специальной лампой, заполненной газообразным  $86\text{Kг}$ . Свечение газа возбуждается генератором высокой частоты  $100\text{--}200$  МГц, во время работы лампы охлаждаются до температуры тройной точки азота ( $63\text{ K}$ ). В этих условиях ширина оранжевой линии  $86\text{Kг}$  не превышает  $0,013\text{--}0,016\text{ см}^{-1}$  (в волновых числах). Лампа устанавливается перед интерферометром, на котором измеряют концевые или шпиховые меры в длинах световых волн. В НИИМ создан эталонный интерферометр, позволяющий измерять меры длины до  $1000\text{ мм}$  со средним квадратическим отклонением  $3 \cdot 10^{-8}$ . Измерение длины прототипа № 28 на эталонном интерферометре показало, что он больше метра по определению 1960г. на  $0,22\text{ мкм}$ . Настоящая длина метра принимается в



соответствии с резолюцией XVII-ой Генеральной конференции по мерам и весам проходившей в октябре 1983 года в Париже (Франция) и определена как *расстояние, проходимое светом в вакууме за 1:299 792 458-ую долю секунды*.

## 6 Секунда

Время является одним из центральных понятий нашего мировоззрения, одним из важнейших факторов в жизни и деятельности людей. Как единица времени, секунда (в том значении, что час делится на 60 два раза, первый раз получаются минуты, во второй раз (*second*) — секунды) вошла в английский язык в конце XVII века, примерно за сто лет перед тем, как она была с достаточной точностью измерена. В 1832 году немецкий математик Карл Фридрих Гаусс предложил использовать секунду в качестве базовой единицы времени в своей системе единиц, использующей наряду с секундой миллиметр и миллиграмм. Британская Научная Ассоциация разработала систему единиц измерения СГС (сантиметр-грамм-секунда) в 1874 году. Эта система в течение дальнейших семидесяти лет была постепенно заменена системой МКС (метр-килограмм-секунда). Обе этих системы использовали одну и ту же секунду в качестве базовой единицы. Система МКС получила международное применение в 1940-х годах, и определяла секунду как  $1/86400$  средних солнечных суток.

В 1956 году 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:

*«1/31 536 925,9747 доля тропического года для 0 января 1900 в 12 часов эфемеридного времени».*

Это определение было принято XI ГКМВ в 1960 году, на этой же конференции была утверждена Международная система единиц (СИ) в целом. «Тропический год» в определении 1960 года не был измерен, а был рассчитан по формуле, описывающей средний тропический год, который увеличивается линейно с течением времени. Это определение привело в соответствие наблюдаемое расположение небесных тел с теорией Ньютона об их движении. Таким образом, в 1960 году определение, данное в системе СИ, отменило всякую явную связь между секундой в научном понимании и

продолжительностью дня, как его понимает большинство людей. С изобретением атомных часов в начале 1960-х, было решено использовать международное атомное время как основу для определения секунды взамен обращения Земли вокруг Солнца. Основной принцип квантовой механики — это неразличимость частиц. Таким образом, пока мы не учитываем внешних воздействий, строение всех атомов данного изотопа полностью идентично. Поэтому они представляют собой идеальные механизмы, которые воспроизводятся по желанию исследователя с точностью, ограниченной лишь степенью влияния внешних воздействий. Поэтому развитие часов — хранителей времени, привело к тому, что точность шкалы времени, реализуемой атомными часами, превысила точность астрономического определения, которое к тому же страдало от невозможности точной воспроизводимости эталона секунды. Поэтому было решено перейти к реализации секунды на основе атомных часов, взяв за основу какой-то переход в атомах, слабо подверженных внешнему воздействию. После обсуждения было решено взять атомы цезия, обладающие дополнительно тем достоинством, что цезий имеет только один стабильный изотоп. В 1967 году 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.*

В течение 1970-х годов было обнаружено, что гравитационное замедление времени влияет на секунды, отсчитываемые атомными часами, в зависимости от их возвышения над поверхностью Земли. Универсальная секунда была получена путём корректировки значений каждых атомных часов приведением их к среднему уровню моря, удлиняя таким образом секунду примерно на  $1 \cdot 10^{-10}$ . Эта корректировка была проведена в 1977 году и узаконена в 1980 году. Позднее, в 1997 году, на совещании Международного комитета мер и весов определение секунды было уточнено с учетом внешней температуры и экстраполировано к значению секунды при абсолютном нуле.

Обновлённый вариант, принятый на XXVI ГКМВ:

*Секунда, обозначение с, является единицей времени; её величина устанавливается фиксацией численного значения частоты сверхтонкого расщепления основного состояния атома цезия-133 при температуре 0 К равным в точности 9 192 631 770, когда она выражена единицей СИ с<sup>-1</sup>, что эквивалентно Гц.*



## 7 Кандела

Сила света источника видимого излучения определяется световым потоком, воспринимаемым глазом человека, с учетом различной его чувствительности к различным участкам частотного спектра. В различное время единица силы света определялась по-разному. В Германии с 1869 г. использовалась парафиновая свеча диаметром 20 мм и высотой пламени 50 мм. В 1893 г. Международным конгрессом электриков за единицу силы света была принята амил-ацетатная лампа с высотой пламени 40 мм при его ширине 8 мм. Поскольку на французском языке свеча – *chandelle*, то наименование “кандела” стало применяться к единице силы света.

**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  $\text{лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$ .

Выбранная частота соответствует длине волны 555,016 нм в воздухе при стандартных условиях и находится вблизи максимума чувствительности человеческого глаза, располагающегося на длине волны 555 нм. Если излучение имеет другую длину волны, то для достижения той же силы света требуется большая энергетическая сила света. Кандела воспроизводится при помощи эталонного устройства – полного излучателя (рисунок 3).

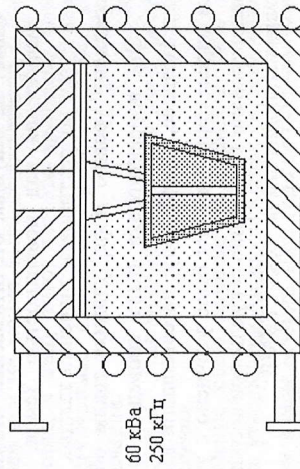


Рисунок 3 - Полный излучатель

Полный излучатель, называемый иногда абсолютно черным телом, представляет собой небольшую трубочку из окиси тория диаметром около 2,5 мм, погруженную в чистую платину. Платина, в свою очередь, находится в

сосуде, спрессованном из порошка плавленной окиси тория, окруженном порошком из окиси тория. Все это помещено во внешний сосуд из плавленного кварца. Внешний сосуд окружен небольшим числом витков медной охлаждаемой водой трубки.

По трубке пропускается ток высокой частоты (около 250 кГц), который нагревает платину до ее плавления. Вместе с платиной нагревается и трубочка из тория. Свет излучается из полости трубочки через отверстие в верхней ее части. Яркость полного излучения при температуре затвердевания платины сравнивается с помощью фотометра с яркостью особых ламп накаливания, используемых в качестве вторичных эталонов. Частота монохроматического излучения полного излучателя находится в зеленой области видимого света и соответствует максимальной чувствительности человеческого глаза.

Воспроизведению канделы приписана погрешность 0,5 % по результатам международных сличений.

## Заключение

Решения XXVI Генеральной конференции по мерам и весам, состоявшейся 13-18 ноября 2018 года, мировое сообщество называет «исторической вехой». Это событие сравнивают с принятием в 1875 году Метрической конвенции, которая на сегодняшний день служит основой измерительных систем на большей части земного шара. Теперь основные величины единиц измерения Международной системы единиц (СИ) окончательно не связаны с артефактами. Фактически с 20 мая 2019 года принимается новая система единиц, которая будет использоваться почти во всех странах мира.

В Приложениях А и В приведены скриншоты из Постановления XXVI Генеральной конференции по мерам и весам, состоявшейся 13-18 ноября 2018 года, с информацией об изменениях в Международной системе СИ. Несколько лет, предшествующие голосованию на этой конференции, были потрачены на перепроверку и на измерения значений фундаментальных постоянных с максимальной точностью. Приведены значения фундаментальных постоянных, через которые определены все базовые единицы (Приложение А) и Базовые единицы измерения Международной системы единиц (СИ) (Приложение Б).



## Список использованной литературы

1. Википедия [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki>
2. Метр (эталон) [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <http://spb.gigik.ru/book/1230.htm/>
3. International Bureau of Weights and Measures (BIPM). Input data for the special CODATA-2017 adjustment. Metrologia (10 August 2017).
4. Пересмотр системы единиц СИ: новые определения ампера, килограмма, кельвина и моля [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/407629/>
5. On the revision of the SI [Электронный ресурс]: BIPM website on the New SI, including a FAQ page/ en/measurement-units/rev-si/ Режим доступа: <https://www.bipm.org/>
6. Пересмотр системы единиц СИ: [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <https://econet.ru/articles/174765/>
7. Мир переходит на новую систему единиц измерения. Почему это важно и участвует ли в этом Россия: [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <https://www.znak.com/2018-11-14/>
8. Пересмотр Международной системы единиц СИ [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <http://mpt.tatarstan.ru/rus/index.htm/news/1327153.html/>
9. Пересмотр Международной системы единиц СИ. Российские ученые-метрологи участвуют в глобальном пересмотре единиц системы измерений в Париже: [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <https://www.ozcsn.ru/news/>
10. Калинин, М.И. О предстоящей реформе международной системы единиц [Электронный ресурс]: М.И. Калинин, ФГУП «ВНИИМС», Москва, 2018 г. - Режим доступа: <http://metro.ru/html/Stat/zakonodatelstvo/reforma>
11. Draft Resolution A. On the revision of the International System of Units (SI): [Электронный ресурс]: CGPM/Convocation-2018.pdf. - Режим доступа: <https://www.bipm.org/utils/en/pdf/>
12. Инженерам на заметку: утвердили новые эталоны ампера и килограмма: [Электронный ресурс]: /cOmandir. 19.11.2018 - Режим доступа: <https://nag.ru/articles/article/102601/>

## Приложение А

### Значения фундаментальных постоянных, через которые определены все базовые единицы

#### On the revision of the International System of Units (SI)

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 26th meeting,

decides that, effective from 20 May 2019, the International System of Units, the SI, is the system of units in which:

- the unperturbed ground state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  is 9 192 631 770 Hz,
- the speed of light in vacuum  $c$  is 299 792 458 m/s,
- the Planck constant  $h$  is 6.626 070 15  $\times 10^{-34}$  J s,
- the elementary charge  $e$  is 1.602 176 634  $\times 10^{-19}$  C,
- the Boltzmann constant  $k$  is 1.380 649  $\times 10^{-23}$  J/K,
- the Avogadro constant  $N_A$  is 6.022 140 76  $\times 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>,
- the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency 540  $\times 10^{12}$  Hz.  $K_{\text{cd}}$  is 683 lm/W,

where the hertz, joule, coulomb, lumen, and watt, with unit symbols Hz, J, C, lm, and W, respectively, are related to the units second, metre, kilogram, ampere, kelvin, mole, and candela, with unit symbols s, m, kg, A, K, mol, and cd, respectively, according to  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ,  $\text{J} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$ ,  $\text{C} = \text{A s}$ ,  $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ , and  $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$ .



## Определения семи базовых единиц СИ

### Appendix 3. The base units of the SI

Starting from the new definition of the SI described above in terms of fixed numerical values of the defining constants, definitions of each of the seven base units are deduced by taking, as appropriate, one or more of these defining constants to give the following set of definitions, effective from 20 May 2019:

- The second, symbol s, is the SI unit of time. It is defined by taking the fixed numerical value of the caesium frequency  $\Delta\nu_{Cs}$ , the unperturbed ground-state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom, to be 9 192 631 770 when expressed in the unit Hz, which is equal to  $s^{-1}$ .
- The metre, symbol m, is the SI unit of length. It is defined by taking the fixed numerical value of the speed of light in vacuum  $c$  to be 299 792 458 when expressed in the unit m/s, where the second is defined in terms of  $\Delta\nu_{Cs}$ .
- The kilogram, symbol kg, is the SI unit of mass. It is defined by taking the fixed numerical value of the Planck constant  $h$  to be  $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$  when expressed in the unit J s, which is equal to  $kg\,m^2\,s^{-1}$ , where the metre and the second are defined in terms of  $c$  and  $\Delta\nu_{Cs}$ .
- The ampere, symbol A, is the SI unit of electric current. It is defined by taking the fixed numerical value of the elementary charge  $e$  to be  $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$  when expressed in the unit C, which is equal to A s, where the second is defined in terms of  $\Delta\nu_{Cs}$ .
- The kelvin, symbol K, is the SI unit of thermodynamic temperature. It is defined by taking the fixed numerical value of the Boltzmann constant  $k$  to be  $1.380\,649 \times 10^{-23}$  when expressed in the unit  $J\,K^{-1}$ , which is equal to  $kg\,m^2\,s^{-2}\,K^{-1}$ , where the kilogram, metre and second are defined in terms of  $h$ ,  $c$  and  $\Delta\nu_{Cs}$ .
- The mole, symbol mol, is the SI unit of amount of substance. One mole contains exactly  $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$  elementary entities. This number is the fixed numerical value of the Avogadro constant,  $N_A$ , when expressed in the unit  $mol^{-1}$  and is called the Avogadro number.
- The amount of substance, symbol  $n$ , of a system is a measure of the number of specified elementary entities. An elementary entity may be an atom, a molecule, an ion, an electron, any other particle or specified group of particles.
- The candela, symbol cd, is the SI unit of luminous intensity in a given direction. It is defined by taking the fixed numerical value of the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{cd}$ , to be 683 when expressed in the unit  $lm\,W^{-1}$ , which is equal to  $cd\,sr\,W^{-1}$ , or  $cd\,sr\,kg^{-1}\,m^{-2}\,s^3$ , where the kilogram, metre and second are defined in terms of  $h$ ,  $c$  and  $\Delta\nu_{Cs}$ .

Учебное издание

Мельник Галина Исааковна  
Тинина Елсна Валериевна

## МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ (СИ). ИЗМЕНЕНИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЙ ОСНОВНЫХ ЕДИНИЦ

Учебное пособие

Подписано в печать 29.04.2019. Тираж 10 экз.  
Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета  
390000, г. Рязань, ул. Право-Лыбедская, 26/53