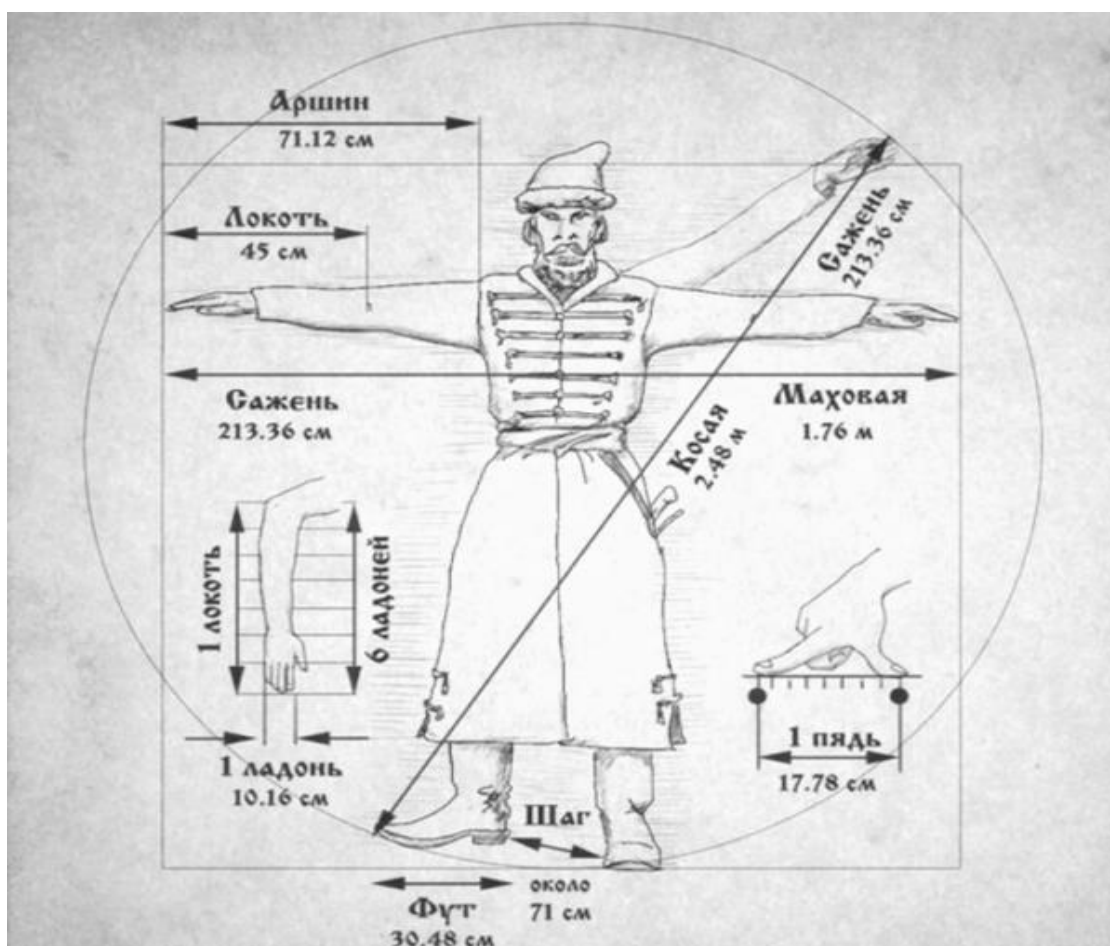


ИНТЕРНАЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ (прошлое, настоящее, будущее)

Лёля Пинхасик

Вся жизнь человека неразрывно связана с получением информации о состоянии окружающего мира. Человек живёт во времени и в пространстве и уже в глубокой древности появилась необходимость измерять время и длину – характеристики пространства. Процедура получения количественной оценки некоторых качеств или свойств окружающего мира представляет собой измерение. Без количественной оценки типа “больше – меньше” или расстояния “ближе – дальше” невозможна ориентация в пространстве. Измерить – значит сравнить измеряемую величину с другой величиной того же рода, принятой за единицу измерения. В результате развития человеческого общества происходило развитие приёмов измерений. В истории развития единиц величин можно выделить несколько периодов:

1. Единицы длины отождествлялись с частями тела: локоть -- длина руки от кисти до локтя, фут – длина ступни, дюйм – длина сустава большого пальца и др. Римляне, маршируя по Европе, принесли свои меры – футы, мили, дюймы, сделав их обычными европейскими единицами. Базой для измерения веса служили камни, различные зёрна (рис, пшеница, овёс). Так Генрих VIII (16 век) определил “фунт” как 7000 зёрен пшеницы. Недостаток таких единиц — нестабильность, необъективность.



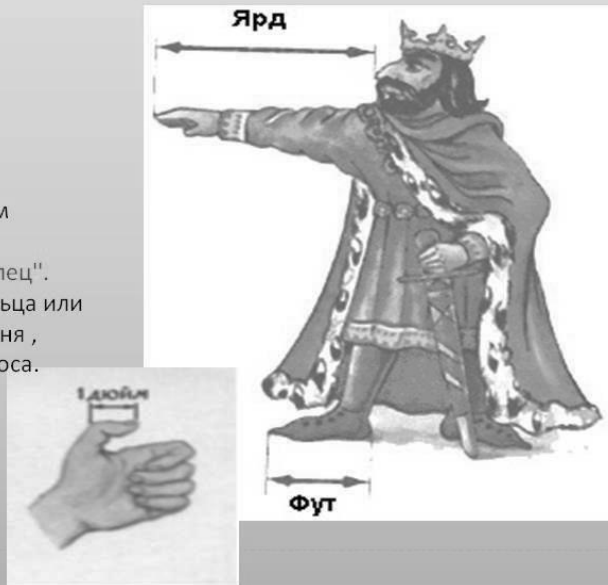
2. В XIV – XVI веках в связи с развитием торговли появились более общие единицы: фут – ширина 64 ячменных зёрен, положенных бок о бок, карат – масса семени одного из видов бобов и др.

Недостаток этих единиц – отсутствие связи между единицами различных величин.

Новые меры (введены с XVIII века).

- 1 фут = 1/7 сажени
= 12 дюймов = 30,479 см

- 1 дюйм = 10 линий = 2,54 см
Название происходит от голландского - "большой палец".
Равен ширине большого пальца или длине трех сухих зерен ячменя, взятых из средней части колоса.



3. Введение единиц, взаимосвязанных друг с другом, т.е. создание системы единиц физических величин. Система единиц является общим физическим языком для единой количественной оценки различных параметров, характеризующих объект или явление. Системы единиц строятся на основе физических теорий, отражающих существующие в природе взаимосвязи физических величин. В каждой системе какие-то единицы принимаются за исходные – основные единицы. Все остальные единицы производные и определяются из формул, связывающих физические параметры. Обычно в качестве основных выбирают единицы, которые могут быть воспроизведены эталонами. Эталон — это средство измерений, предназначенное для хранения, воспроизведения и передачи её размера другим средствам измерений данной величины.

К XVI веку по подсчётам историков в мире применялось не менее 250 тысяч единиц измерения. И только в 1790 г. Национальное собрание революционной Франции приняло декрет о проведении реформы мер и весов. Французская Академия предложила принять метрическую систему и сделать её международной. Девиз французских академиков: система должна быть основана на неизменных прототипах, взятых из природы. Комиссия из членов французской академии приняла план экспериментально определить единицы длины, массы и времени. Именно эти величины отражают реальное состояние окружающего мира – пространство, материю, время.



Академия рекомендовала принять единицу длины (метр), взяв за основу часть длины меридиана, а именно 1/10 000 000 часть четверти расстояния от Северного полюса до экватора вдоль парижского меридиана. За 6 лет академики Деламбер и Мешен измерили расстояние от Дюнкерка до Барселоны, проложив цепь из треугольников через всю Францию и часть Испании. Используя метод триангуляции, угломерные приборы и зрительные трубы, многие из которых были заново изобретены, был измерен угол,

под которым виден измеренный участок дуги меридиана. Зная число градусов (9.5) и длину дуги, вычислили длину меридиана. Так была введена единица длины – **1 метр**. Был изготовлен образец (прототип) метра в виде платиновой линейки шириной около 25 мм и толщиной 4 мм. Этот образец прослужил почти 90 лет и был позже сдан в архив, поэтому его в дальнейшем стали называть архивным метром.

За единицу **массы** была принята определённая масса воды. Физики Лавуазье и Гаюи определили массу 1 кубического дециметра дистиллированной воды, взятой при наибольшей плотности (+4°C). Измерение проводилось в вакууме, на уровне моря, на широте 45°. Полученная величина была названа килограммом. Был также изготовлен прототип килограмма – платиновая гиря в виде цилиндра высотой и диаметром 39 мм.

Единицей **времени** была принята секунда как $1/3600$ часа, равного $1/24$ суток.

Прототипы в виде линейки и гири из платины были представлены членам Французского парламента и участникам Международного конгресса, созванного в 1799 году. И лишь в 1872 году была создана Международная комиссия по изготовлению образцов метрической системы для всех народов, в ней участвовали представители тридцати государств. В 1875 году для обеспечения международного единства и совершенствования метрической системы была подписана Метрическая конвенция, а также учреждено Международное бюро мер и весов – постоянное учреждение, находящееся в предместье Парижа.

На основе метрической системы мер в конце XVIII и начале XIX века было предложено несколько систем единиц, в которых, кроме метра и килограмма, за основу принимались некоторые электрические и магнитные единицы. С целью создания единой системы единиц в 1954 году Генеральная конференция по мерам и весам (ГКМВ) ввела в действие Международную систему единиц (СИ), в которой были предложены в качестве основных следующие единицы: метр, килограмм, секунда, ампер (единица измерения силы электрического тока), градус Кельвина (единица измерения температуры), кандела (единица измерения света), а также 22 другие единицы, производные от них. В 1971 году была добавлена ещё одна основная единица – моль. Достоинством системы СИ являются её универсальность (охватывает все отрасли науки и техники) и когерентность, т.е. согласованность производных единиц, которые образуются по уравнениям, не содержащим коэффициентов пропорциональности.

Систему СИ начали совершенствовать вскоре после её принятия. Это связано с развитием науки и техники и постоянным ростом требований к точности измерений. Развитие нанотехнологий ужесточает требования к измерительным системам, погрешности измерений которых должны быть сравнимы с межатомными расстояниями. Именно в нанотехнологии актуален тезис: если нельзя правильно измерить, то невозможно создать. Пересмотр единицы длины – метра – обусловлен рядом причин: длина меридианов не остаётся строго постоянной из-за смещения полюсов, металл, из которого изготовлен эталон метра, с течением времени испытывает микроструктурные изменения, что и влияет на длину эталона. Появилась идея установить естественный эталон длины, связав его с наиболее стабильными природными явлениями. Поскольку длины волн и частоты атомов отличаются исключительным постоянством, атом любого вещества обладает свойствами эталона длины и частоты. С развитием точных методов интерферометрических измерений в 1927 году 7-я Генеральная конференция по мерам и весам постановила: **1 метр** равен



1553164,13 длин волн (красная линия), излучаемых атомом кадмия при определённых условиях. В 1960 году метр был снова переопределён с целью повышения точности. За основу была принята длина волны оранжевого излучения атома кадмия с более узкой линией – точность эталона возросла в 100 раз. Современный эталон метра – расстояние, которое проходит луч лазера за $1/299\,792\,458$ секунды.

Измерение **времени** основано на периодических процессах. Первоначально таким процессом было вращение Земли вокруг своей оси, а единица времени определялась как часть солнечных суток. Длительность солнечных суток непостоянна, меняется в течение года. Причина – систематическое замедление суточного вращения Земли, вызванное океаническими приливами, смещением полюсов, сезонными вариациями угловой скорости Земли. Астрономические методы измерения времени исчерпали себя в смысле точности. Принципиально новые и более точные методы пришли из радиоспектроскопии и квантовой электроники. Был создан принципиально новый источник излучения – лазер, что и позволило в 1967 году перейти на атомный эталон времени. 1 **секунда** – это промежуток времени, в течение которого совершается 9 192 631 770 колебаний излучения, соответствующего переходу между двумя уровнями энергетического состояния атома цезия–133. В соответствии с определением единицы времени воспроизведение её осуществляется цезиевым генератором. Стабильность этих колебаний, т.е. единиц времени и частоты, очень велика, погрешность составляет 10^{-14} .



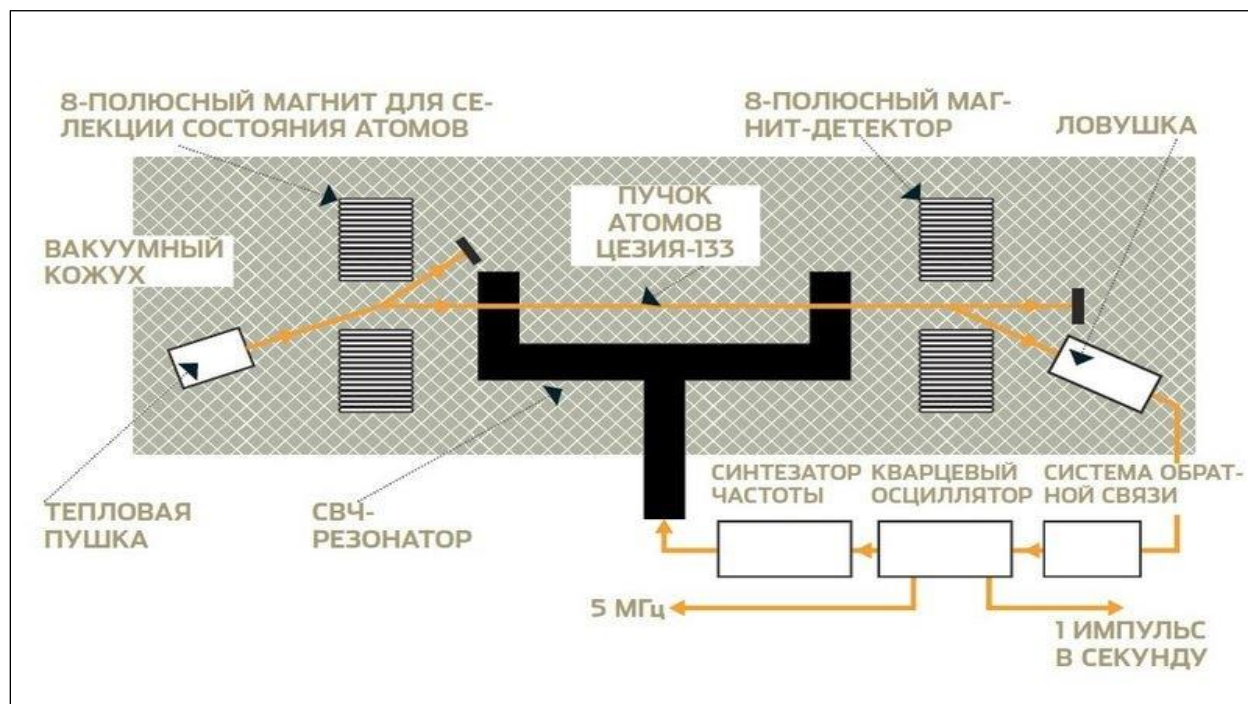


Рис. Принцип действия цезиевого эталона частоты

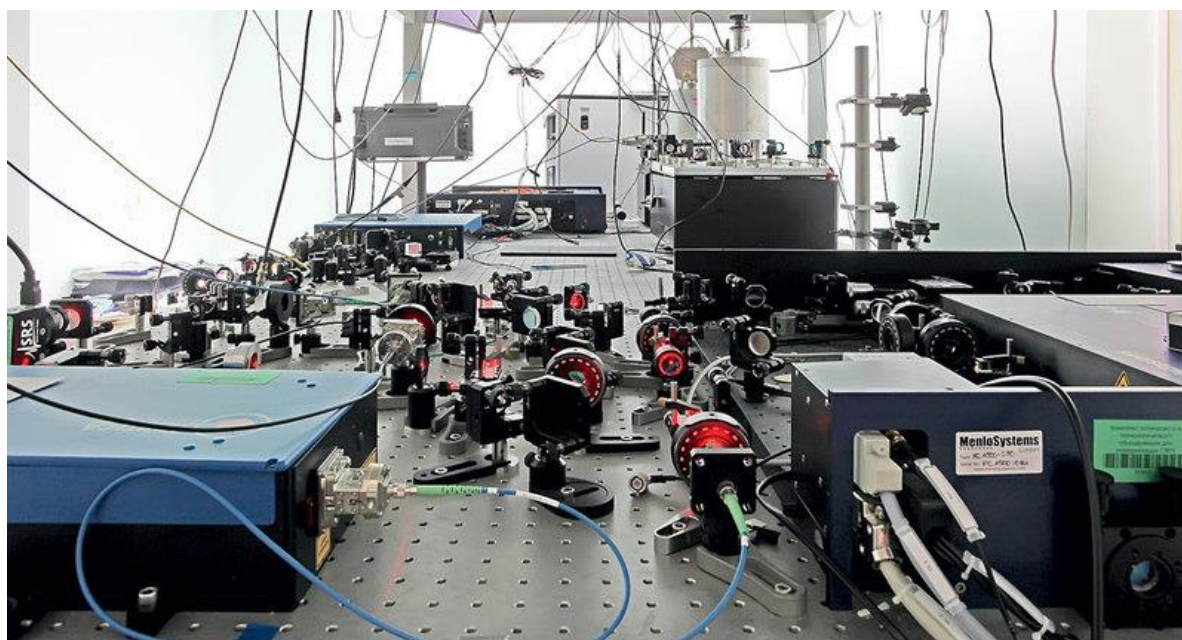


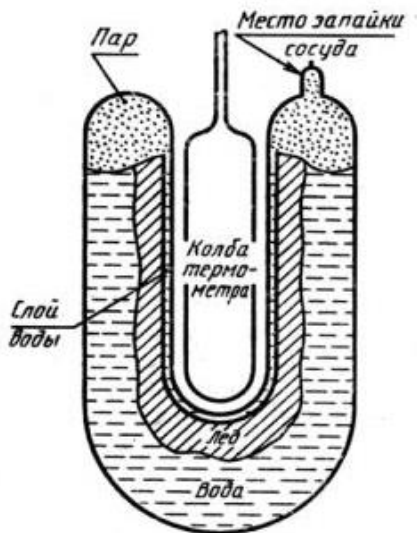
Рис. Уникальная установка—цезиевый репер частоты

Лазеры были также использованы в качестве стандартов длины вместо криптонового эталона. В 1970 году с помощью высокостабильного лазера была измерена скорость света – $299\,792\,458\text{ м/с}$ с погрешностью $4 \cdot 10^{-19}$. Это послужило основанием для нового определения единицы **длины** через скорость **света** и атомную единицу **времени**. В 1983 году на 17-й Генеральной конференции по мерам и весам постановили: **метр** – это расстояние, проходимое светом в вакууме за $1/299\,792\,458$ долю секунды. Это определение делает метр не зависящим ни от какого источника света, но придаёт ему зависимость от размера секунды, а значит и герца – единицы частоты. Эта связь привела к идее создания

единого эталона времени – частоты – длины (ВЧД). Единый эталон представляет собой сложную техническую систему и состоит из двух частей:

- первичный эталон единиц времени и частоты, включающий радио оптический частотный мост и лазеры, излучающие в инфракрасной области спектра на длине волны 3.39 мкм,
- первичный эталон единицы длины, включающий лазеры, излучающие в видимой области спектра (0.633 мкм), интерферометры и установку для измерения отношения длин волн. Этот эталон имеет погрешность измерения 10^{-11} . Сферы использования – навигация, космонавтика, связь и коммуникация, приборостроение, оборона, безопасность и др.

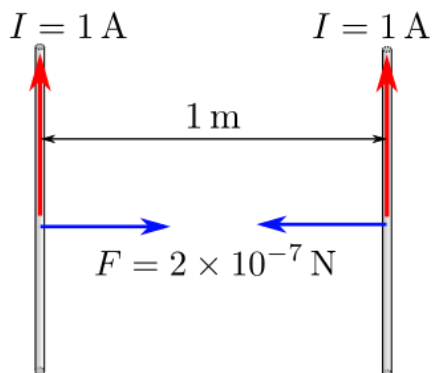
Термодинамическая температура характеризует энергию внутреннего состояния и входит во все фундаментальные физические законы. Специфика температурных измерений требует воспроизведение многих температурных точек, совокупность которых образует температурную шкалу. В качестве опорной точки выбрана температура тройной точки воды определённого изотопного состава, при которой вода может существовать в виде трёх фаз – жидкой, твёрдой и газообразной. Эта **температура** – 273.16°K – наиболее легко воспроизводится. Таким образом 1 кельвин равен $1/273,16$ части тройной точки воды. Начало шкалы (0°K) совпадает с абсолютным нулём, а градус Цельсия равен градусу Кельвина.



В качестве термометра, регистрирующего состояние тройной точки воды, применяется газовый термометр, представляющий замкнутый объём, снабжённый главным манометром и точным ртутным манометром для измерения давления газа.

Температура с помощью газового термометра в первом приближении определяется по формуле $PV=RT$ (для идеального газа), где P и V – давление и объём термометра с газом, R -газовая постоянная.

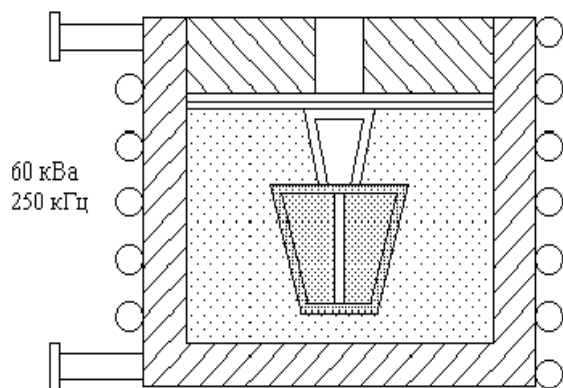
При практической реализации величина кельвина зависит от изотопного состава воды, а требуемого молекулярного состава практически невозможно добиться. В 2011 году Генеральная конференция по мерам и весам предложила переопределить кельвин, связав его с постоянной Больцмана. Новое определение: 1 **кельвин** соответствует изменению тепловой энергии на $1,38064852 \times 10^{-23}$ джоулей. Измерять точную температуру можно с помощью измерения скорости звука в сфере, заполненной газом. Скорость звука пропорциональна скорости перемещения атомов, т.е. внутренней энергии.



Основной единицей в области электричества и магнетизма является **ампер**. Его определение предложено Международным комитетом мер и весов и принято в 1948 году: ампер есть сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 метр друг от друга, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 метр силу взаимодействия, равную 2×10^{-7} ньютона.

В этом определении предусматривается некий мысленный эксперимент, в котором возникает сила взаимодействия в проводах бесконечной длины. Очевидно, что на практике невозможно

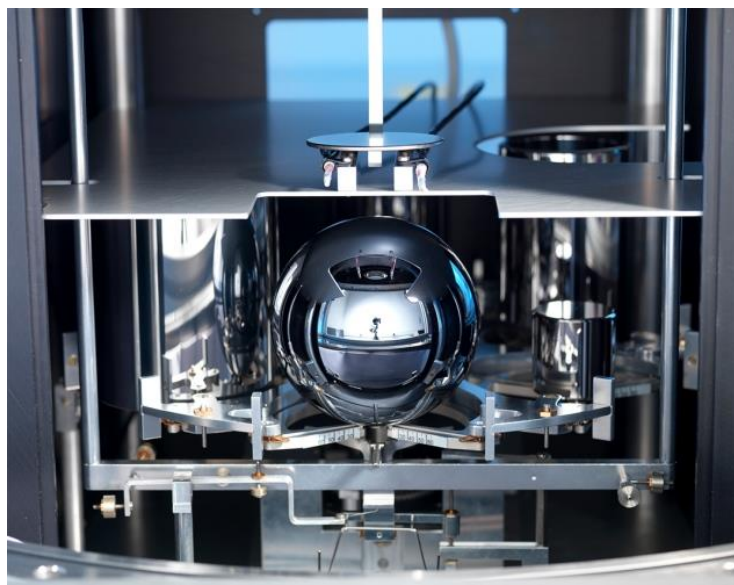
измерить такую силу, потому что по определению не могут существовать проводники бесконечной длины. Идея переопределения ампера была предложена в 2012 году на Генеральной конференции по мерам и весам. Она основана не на созданных человеком артефактах, а на фундаментальных физических постоянных или свойствах атомов. Итак, новое определение выражается только через одну постоянную – заряд электрона: **1 ампер** – это электрический ток, соответствующий потоку $1/1,602176208 \times 10^{-19}$ элементарных электрических зарядов в секунду. На практике ампер можно определить с помощью особого инструмента, названного “одноэлектронный насос”. Он позволяет перемещать определённое количество электронов в течении каждого насосного цикла.



Для измерений в области оптических явлений в качестве основной единицы выбрана единица силы света – **кандела**. Свет – это электромагнитное излучение в диапазоне непосредственного восприятия человеком. Определение принято в 1979 году 16-й Генеральной конференцией по мерам и весам: кандела – сила света в заданном направлении от источника, испускающего монохроматическое излучение частотой 540×10^{12} Гц равным $1/683$ ватт/ср. Выбранная частота соответствует зелёному цвету, т.к. человеческий глаз наиболее

чувствителен в этой области спектра. Кандела воспроизводится при помощи эталонного устройства – полного излучателя. Погрешность составляет 0,5%.

По трубке пропускается ток высокой частоты (около 250 кГц), который нагревает платину до её плавления. Вместе с платиной нагревается и трубочка из тория. Свет излучается из полости трубочки через отверстие в верхней её 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.



В 1971 году на 14-й Генеральной конференции по мерам и весам добавили ещё одну основную единицу – **моль** – единицу количества вещества. Моль есть количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг. При применении моля структурные единицы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или группами частиц. Процесс переопределения основных единиц организован

таким образом, чтобы они были основаны не на созданных человеком артефактах (эталонах), а на фундаментальных физических константах или свойствах атомов. Это коснулось и моля. Его величина устанавливается через постоянную Авогадро, равную

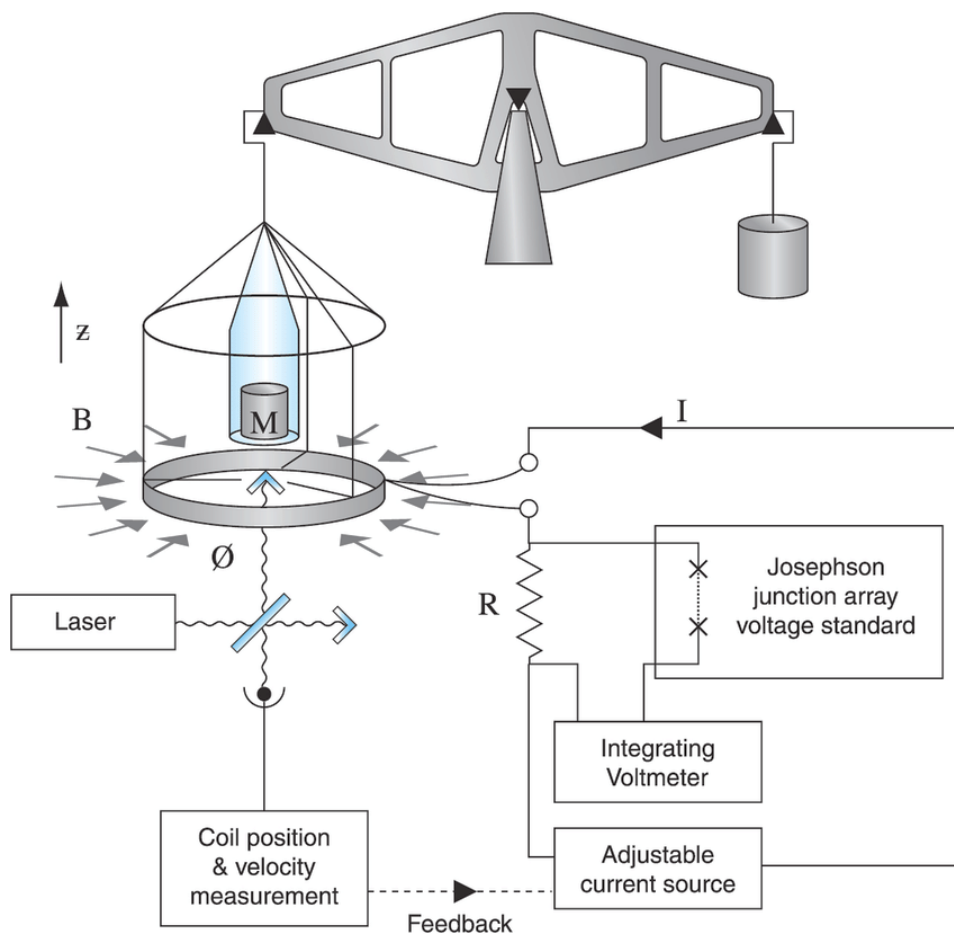
$6,02214 \times 10^{23}$ /моль. Для вычисления числа Авогадро создана идеальная сфера из чистого кремния-28.

Точно зная размеры сферы и период кристаллической решётки, можно рассчитать число атомов в ней, получить число Авогадро и постоянную Планка.

Единица измерения массы – **килограмм** – это последний стандарт в Интернациональной системе единиц, реликт 127-летней давности, который основан на физическом объекте и не переопределён до нашего времени.

Эталон массы, который содержится в безвоздушном пространстве под тремя стеклянными колпаками при контролируемой температуре, теряет массу. Потеря массы представляет проблему современной науки, т.к. очень многие технологии зависят от точности измерений. Микроэлектроника, нанотехнологии, фармакология – это те отрасли, в которых используются малые массы и от точности измерений зависит качество реальных объектов. Перед учёными уже несколько десятилетий стоит задача замены эталона массы, основанная на константах природы. Учёные из Национального Института Стандартов и Технологий предложили использовать постоянную Планка, которая устанавливает связь между энергией фотона и его частотой $E=hf$. Энергия же связана с массой через известную формулу Эйнштейна $E=mc^2$. Команда учёных института измеряет постоянную Планка особым методом, называемом метод ватт-баланса. Весы Киббла – прибор для установления соотношения между массой и электрической мощностью.

Удалось измерить постоянную Планка с точностью до 13 миллиардных долей (13×10^{-9}).



Весы Киббла



Весы Киббла – установка

В 2018 на 26-й Генеральной Конференции по мерам и весам были рассмотрены и изучены результаты различных научных групп, обработаны на компьютере для получения окончательного результата: $6,62607 \times 10^{-34}$ Дж·сек. Принято решение о переопределении килограмма. Старый гранд–кг отправлен на пенсию. Определение килограмма через постоянную Планка – серьёзное интеллектуальное и технологическое достижение. Таким образом, все единицы системы СИ привязаны к фундаментальным физическим константам. В принципе, новая система будет пригодна для применения в любом месте Вселенной. Это открывает путь к новой физике и новым технологиям.

Источники

1. sciencenews.org
2. wikipedia.org
3. Gerard W. Kelly. Metric System Simplified. Sterling Publishing, New York, 1974.