

Пензенский государственный университет
Кафедра метрологии и систем качества

ЭТАЛОНЫ

Учебное пособие

Рекомендовано к использованию в учебном процессе решением кафедры "Метрология и системы качества"
от 3 марта 2006 г. протокол №9

Эталоны / Сост. К.В.Сафронова.– Пенз. гос. ун-т, каф. МСК, 2006 (Для учебных целей).

В учебном пособии дается определение понятия "эталон", приводится классификация эталонов в соответствии с их местом в поверочной схеме для средств измерений физических величин. Рассмотрены основные требования к государственным эталонам, структура и состав эталонной базы России. Даны краткие описания государственных первичных эталонов основных единиц международной системы единиц физических величин.

Учебное пособие предназначено для студентов направления 200500 "Метрология, стандартизация и сертификация" при изучении фундаментальной метрологической дисциплины "Теория измерений".

Рецензент: Г.А.Солодимова, кандидат технических наук, главный метролог научно-исследовательского института электромеханических приборов.

Издательский комплекс кафедры МСК ПГУ.
Компьютерная верстка М.В. Перевертина
Технический редактор К.В. Сафронова
Внутрикафедральное издание
Заказ № 1 от 30 марта 2006 г. Тираж 5 экз.

Содержание

1	Определение понятия «эталон»	4
2	Классификация эталонов.....	4
3	Основные требования к государственным эталонам.....	6
4	Структура и состав эталонной базы России.....	7
5	Государственные эталоны основных единиц СИ	12
5.1	Государственный первичный эталон единицы массы.....	13
5.2	Государственный первичный эталон единицы времени и частоты	14
5.3	Государственный первичный эталон единицы длины	16
5.4	Государственный первичный эталон единицы температуры	18
5.5	Государственный первичный эталон единицы силы света.....	19
5.6	Государственный первичный эталон единицы силы постоянного электрического тока	20

1 Определение понятия «эталон»

Одной из главных задач метрологии является обеспечение единства измерений. Решение этой задачи невозможно без создания эталонной базы измерений. Попытки решения задачи обеспечения единства измерений привели более двухсот лет назад во Франции к идее создания метрической системы, а затем – к подписанию рядом стран метрической конвенции в 1875 году. Именно с тех пор в метрологическую практику вошло слово «эталон».

Слово "эталон" — французского происхождения (etalon); в буквальном смысле означает образец, мерило, идеальный или узаконенный образец чего-либо. В словаре синонимов русского языка оно стоит в одном ряду с такими словами, как образец, пример, образчик. В этом широком значении слово "эталон" и производные от него слова находят употребление в самых различных областях практической деятельности.

В Законе Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений» дано следующее определение эталона: «эталон единицы величины – средство измерений, предназначенное для воспроизведения и хранения единицы величины (или кратных, либо дольных значений единицы величины)». В этом определении не учитывается, что эталоны воспроизводят и хранят не только единицы, но и шкалы измерений. К тому же немногие современные государственные эталоны воспроизводят номинальное, кратное или дольное значение единицы измеряемой величины. Так, например, государственный эталон единицы электрического сопротивления воспроизводит 12906,4035 Ом; 6453,20175 Ом и 1,0 Ом. Цезиевый репер частоты воспроизводит интервал времени (период колебаний), равный $1/9122631770$ части секунды. Для многих эталонов указывают не значения единиц, а диапазоны.

В реальности эталон может воспроизводить любое значение величины (любую точку или часть шкала), лишь бы эти значения были известны с требуемой точностью и стабильно воспроизводились. В определении эталона отсутствует также указание на то, что эталон должен воспроизводить единицу или шкалу с наивысшей при данном уровне науки и техники точностью. Точность государственного эталона должна быть достаточной для поверки (калибровки) основного парка эксплуатируемых в стране средств измерений. Наряду с государственными эталонами существуют уникальные независимо аттестуемые средства измерений, обеспечивающие проведение научных экспериментов, более точные, чем государственные эталоны производных единиц.

Наиболее удачным определением эталона следует признать выдвинутое рядом метрологов следующее понятие: «Эталон (шкалы или единицы измерений) – устройство, предназначенное и утвержденное для воспроизведения и (или) хранения и передачи шкалы или размера единицы измерений средствами измерений».

В этом определении подчеркивается, что эталон обязан передавать размер единицы или шкалу, а не значение величины, равное принятой единице.

2 Классификация эталонов

В приведенном выше определении понятие "эталон единицы" является собирательным, так как на его основе образован целый ряд укоренившихся в отечественной литературе производных понятий-терминов, таких как "государственный эталон единицы", "первичный эталон", "специальный эталон", "вторичный эталон", "эталон-копия", "эталон сравнения", "эталон-свидетель" и "рабочий эталон".

Чтобы разобраться в этом многообразии эталонов, следует рассмотреть как практически строятся и реализуются системы обеспечения единства измерений отдельных физических величин. Очевидно, что достижению этой цели, прежде всего, будет способствовать применение одинаковых с точки зрения их определения единиц. В этом отношении очень важным этапом в решении обеспечения единства измерений явилась разработка международной системы единиц физических величин— СИ.

Однако "словесной" одинаковости единиц какой-либо физической величины (одинаковости их определения и наименования) еще недостаточно. Для обеспечения единства измерений этой физической величины важно, чтобы единицы были одинаковы в их вещественном выражении в тех образцах (эталонах), с которыми сравнивается измеряемая физическая величина. В то же время, очевидно, что любой такой образец создается специально, и никакие два подобных образца не могут быть сделаны абсолютно одинаковыми: реальные размеры единицы в образцах обязательно будут в той или иной мере отличаться друг от друга. Отсюда следует, что среди таких образцов следует выбрать и узаконить какой-либо один, наилучшим образом соответствующий определению единицы, в качестве самого "образцового образца" (исходного эталона единицы), относительно которого затем определять и контролировать размер единицы для всех остальных образцов.

При наличии большого парка рабочих средств измерений различной точности возникает необходимость в создании системы образцов разной степени точности для данной измеряемой физической величины, и тем самым — к иерархической соподчиненности образцов единицы в такой системе. Именно по такому иерархическому принципу разрабатываются в нашей стране так называемые общероссийские поверочные схемы для средств измерений отдельных физических величин. Эти поверочные схемы являются нормативными документами (как правило, в виде ГОСТ), устанавливающими номенклатуру и соподчиненность средств измерений данной физической величины, обеспечивающих рациональную систему передачи размера единицы от единого исходного образца всем имеющимся в стране средствам измерений данной физической величины.

Непременным элементом любой из действующих сейчас общероссийских поверочных схем является государственный эталон России единицы данной физической величины, обеспечивающий централизованное воспроизведение и хранение единицы для передачи ее размера всем остальным средствам измерений в соответствии с утвержденной поверочной схемой. Все остальные разновидности эталонов называют вторичными.

К ним относятся:

- эталоны-копии;
- эталоны-свидетели;
- эталоны сравнения;
- рабочие эталоны.

В настоящее время различают следующие виды эталонов:

Первичный эталон — эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы с наивысшей в стране (по сравнению с другими эталонами той же единицы) точностью. Первичные эталоны подразделяются на национальные (государственные), международные и специальные.

Вторичный эталон — эталон, получающий размер единицы непосредственно от первичного эталона данной единицы. Вторичные эталоны подразделяются на эталоны-копии и эталоны сравнения.

Термин "рабочий эталон" заменил используемый ранее термин "образцовое средство измерений".

Национальный эталон — эталон, признанный официальным решением служить в качестве исходного для страны. Первичный эталон, признанный решением уполномоченного на то государственного органа в качестве исходного на территории Российской Федерации, называется *государственным первичным эталоном*. Оба термина имеют адекватное значение. Термин "национальный эталон" применяется тогда, когда хотят подчеркнуть соподчиненность государственного эталона международному.

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

Специальный эталон — эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы в особых условиях и заменяющий для этих условий первичный эталон. Единица, воспроизводимая с помощью специального эталона, по размеру должна быть согласована с единицей, воспроизводимой с помощью соответствующего первичного эталона.

Эталон-копия — вторичный эталон, предназначенный для передачи размеров единиц рабочим эталонам. Эталон-копия не всегда является физической копией государственного эталона, он копирует лишь метрологические свойства государственного эталона.

Эталон сравнения — вторичный эталон, применяемый для сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличены друг с другом.

Рабочий эталон воспринимает размер единицы от вторичных эталонов и, в свою очередь, служит для передачи размера менее точному рабочему эталону (низшего разряда) или рабочим средствам измерений.

Разрядный эталон — эталон, обеспечивающий передачу размера единицы физической величины через цепочку соподчиненных по разрядам рабочих эталонов. При этом от последнего рабочего эталона в этой цепочке размер единицы передается рабочему средству измерения. Принцип использования разрядов в метрологической цепочке передачи размера единицы показан на рисунке 1. Число разрядов для каждого вида средств измерений устанавливается государственной поверочной схемой.

В зависимости от назначения и исполнения эталоны подразделяются следующим образом:

♦ *одиночный эталон*, в составе которого имеется одно средство измерений (мера, измерительный прибор, эталонная установка) для воспроизведения и хранения единицы;

◆ *групповой эталон*, в состав которого входит совокупность средств измерений одного типа, номинального значения или диапазона измерений, применяемых совместно для повышения точности воспроизведения единицы или ее хранения; за результат измерений обычно принимается среднее арифметическое значение из результатов измерений однотипными средствами измерений или эталонными установками;

◆ *эталонный набор*, состоящий из совокупности средств измерений, позволяющих воспроизводить и хранить единицу в диапазоне, представляющем объединение диапазонов указанных средств; эталонные наборы создаются в тех случаях, когда необходимо охватить определенную область значений физической величины, например набор эталонных гирь;

◆ *транспортируемый эталон*, иногда специальной конструкции, предназначенный для его транспортировки к местам поверки или калибровки средств измерений или сличений эталонов данной единицы.

Совокупность всех государственных и вторичных эталонов образует эталонную базу России — одно из ценнейших национальных достояний страны.

3 Основные требования к государственным эталонам

Главная функция и одновременно главная отличительная особенность любого государственного эталона состоит в том, что он (и только он!) воспроизводит единицу данной физической величины, ибо государственный эталон является исходным, т. е. "самым образцовым" (в рамках государственной системы обеспечения единства измерений) образцом единицы, а под воспроизведением единицы и понимается осуществление материализации единицы, наилучшим образом соответствующей ее определению, т. е. ее исходная материализация. Все остальные средства измерений получают размер единицы от соответствующего государственного эталона и, в лучшем случае, обеспечивают хранение этой единицы. Государственные эталоны обеспечивают также хранение единицы, т. е. обеспечивают неизменность ее размера во времени, с тем, чтобы в любой момент времени от государственного эталона можно было бы передавать по возможности один и тот же размер единицы.

Основные функции государственного эталона (воспроизведение и хранение единицы), зафиксированные в его определении по основополагающему стандарту (ГОСТ 8.057 - 80), определяют основные требования и к метрологическим параметрам, и к составу, и к условиям хранения и применения государственных эталонов.

Прежде всего, условие наилучшего соответствия о вещественной государственным эталоном единицы ее определению и статус исходного средства измерений в стране неизбежно означает требование наивысшей точности государственного эталона среди всех средств измерений данной физической величины, изготавливаемых и используемых в стране. Отсюда следует требование предельно возможной тщательности изготовления основных узлов и элементов государственных эталонов, а также жесткие требования к идеальности условий хранения государственных эталонов, максимально исключая влияние внешних воздействий, так как только при этом можно достичь максимальной точности измерений (воспроизведения единицы). В ряде случаев это приводит к необходимости создания специальных инженерно-технических сооружений. Очевидным требованием к составу государственных эталонов, вытекающим из выполняемых ими функций, является наличие средств, непосредственно воспроизводящих единицу физической величины (наличие стабильного "генератора" физической величины), а также средств и методов, позволяющих поддерживать этот размер максимально длительное время.

По номенклатуре метрологических параметров, фиксируемых для государственных эталонов при их утверждении, для большинства эталонов указываются характеристики погрешности воспроизведения единицы в виде двух составляющих:

— оценки случайной погрешности воспроизведения единицы в виде среднего квадратического отклонения результата измерения (СКО);

— оценки неисключенной систематической погрешности воспроизведения единицы (НСП).

Способы выражения погрешностей устанавливает ГОСТ 8.881 - 80 «ГСИ. Эталоны. Способы выражения погрешностей».

Немаловажное значение имеет также стабильность эталона во времени.

Все это неизбежно влечет за собой такое требование, как тщательное и достаточно длительное физико-метрологическое исследование как самого эталона, так и (что особенно важно в период, предшествующий его созданию) тех физических эффектов и явлений, которые закладываются в основу эталона. Для правильного построения поверочных схем важно также знать параметры, характеризующие производительность государственного эталона, диапазон его измерений и некоторые другие технические параметры.

Уникальность и исключительная значимость государственных эталонов в общероссийском масштабе предъявляют к ним ряд требований и правил организационного и юридического (правового) характера, таких как:

- постоянство места хранения и применения государственных эталонов (в соответствующем метрологическом институте Госстандарта (Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии);
- официальное назначение постоянных ученых — хранителей эталонов и их помощников из числа наиболее высококвалифицированных специалистов — метрологов в данной области измерений;
- создание ряда вторичных эталонов для случаев особо массовых и прецизионных видов измерений.

В ранге государственного каждый эталон утверждается по строго регламентированному порядку, предусматривающему обязательный перечень представляемой документации на эталон. Эта документация предварительно рассматривается на научно-техническом совете института, создавшего эталон, затем на специально назначаемой межведомственной комиссии из представителей соответствующих отраслей науки и промышленности и окончательно на научно-техническом совете Госстандарта. Эталон утверждается в качестве государственного специальным решением (постановлением) Госстандарта, которое оформляется актом об утверждении. Основные сведения об эталоне заносятся в Государственный реестр эталонов России, хранящийся во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологической службы (ВНИИМС), а также в паспорт на эталон, который вместе с другой обязательной документацией хранится у ученого-хранителя в институте, создавшем данный государственный эталон.

Важным моментом в деле совершенствования эталонной базы является выполнение исследований государственных эталонов в процессе их эксплуатации и, в частности, проведение международных сличений. Сличения (особенно так называемые "круговые сличения") помогают выявить «систематику» и оценить действительный технический уровень национальных эталонов разных стран. В ходе сличения проводят до тысячи отдельных наблюдений и измерений.

4 Структура и состав эталонной базы России

Центральным звеном эталонной базы является система государственных эталонов. Поэтому иногда систему государственных эталонов для простоты называют эталонной базой. Так как государственные эталоны служат для воспроизведения единиц физических величин, структура эталонной базы России прежде всего отражает структуру системы единиц физических величин, узаконенных и применяемых в нашей стране.

Как отмечалось выше, в России и в подавляющем большинстве стран мира применяют Международную систему единиц, сокращенно СИ (от начальных букв русской транскрипции французского наименования *Systeme Internationale*). Эта система была разработана специальной международной комиссией и в первоначальном варианте утверждена в 1960 г. решением XI Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) — высшего органа метрической конвенции.

В ее резолюциях были утверждены шесть упомянутых выше основных единиц, две дополнительные (радиан и стерадиан), первый перечень производных единиц (27 единиц), а также 12 десятичных приставок для образования наименований кратных и дольных единиц. В последующих решениях Генеральной конференции по мерам и весам Международная система единиц получила дальнейшее развитие.

При построении любой системы единиц принципиально важными являются два момента: выбор основных единиц системы и выбор правил образования производных единиц. При построении СИ исходили из следующих соображений:

- система должна охватывать все области науки и техники;
- необходимо обеспечить максимальную преемственность удобных для практики размеров единиц (по крайней мере для основных);
- единицы основных величин должны быть воспроизведены с наибольшей точностью (при помощи эталонов);
- максимальная простота и однозначность образования производных единиц системы.

Эти четыре принципа привели к созданию системы, в которой в качестве основных единиц были выбраны метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, кандела и моль, а все производные единицы являлись когерентными. Когерентные единицы образуют из уравнений связи между величинами, в которых числовые коэффициенты приняты равными 1 при подстановке единиц СИ.

В нашей стране внедрение СИ началось еще в 1961 г. Официально СИ действует с 1 января 1982 г. в соответствии с ГОСТ 8.417 - 81 "ГСИ. Единицы физических величин".

Основу эталонной базы России составляют государственные эталоны основных и дополнительных единиц СИ. Они обеспечивают возможность воспроизведения любых производных единиц СИ, а также не-

которых внесистемных единиц, допущенных к применению (как, например, единиц твердости по различным шкалам). В настоящее время эталонная база России имеет в своем составе 118 первичных государственных эталонов и более 300 вторичных эталонов физических величин. Из них 52 находятся во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии им. Д.И. Менделеева (ВНИИМ, Санкт-Петербург), в том числе эталоны метра, килограмма, ампера, кельвина и радиана; 25 – во Всероссийском научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ, Москва), в том числе эталоны единиц времени и частоты; 13 – во Всероссийском научно-исследовательском институте оптико-физических измерений, в том числе эталон канделы; 5 и 6 – соответственно в Уральском и Сибирском научно-исследовательских институтах метрологии. Созданные государственные эталоны охватывают такие важнейшие области науки и техники, как механика и акустика, термодинамика, электромагнетизм, радиотехника и электротехника, оптика и светотехника, ионизирующие излучения и ядерная техника. Современная эталонная база России не только полностью заменила эталонную базу СССР, но во многих областях измерений превзошла её по точностным параметрам. Многочисленные международные сличения подтвердили высокий уровень российской эталонной базы. Международными экспертами подтверждено, что уровень и состояние этой базы обеспечивает вступление России в Всемирно-торговую организацию в части присоединения к соглашению по техническим барьерам в торговле.

Перечень эталонов не повторяет перечня физических величин. Для ряда единиц эталоны не создаются из-за того, что нет возможности непосредственно сравнивать соответствующие физические величины, например, нет эталона площади. Не создаются эталоны и в том случае, когда единица физической величины воспроизводится с достаточной точностью на основе сравнительно простых средств измерений других физических величин.

Конструкция эталона, его физические свойства и способ воспроизведения единицы определяются физической величиной, единица которой воспроизводится, и уровнем развития измерительной техники в данной области измерений. Эталон должен обладать по крайней мере тремя взаимосвязанными свойствами: неизменностью, воспроизводимостью и сличаемостью.

Неизменность – свойство эталона удерживать неизменным размер воспроизводимой им единицы в течение длительного интервала времени. При этом все изменения, зависящие от внешних условий, должны быть строго определенными функциями величин, доступных точному измерению. Реализация этих требований привела к идее создания «естественных» эталонов различных физических величин, основанных на физических постоянных.

Воспроизводимость – возможность воспроизведения единицы физической величины на основе ее теоретического определения с наименьшей погрешностью для существующего уровня развития измерительной техники. Это достигается путем постоянного исследования эталона в целях определения систематических погрешностей и их исключения путем введения соответствующих поправок.

Сличаемость – возможность обеспечения сличения с эталоном других средств измерений, нижестоящих по поверочной схеме, в первую очередь вторичных эталонов, с наивысшей точностью для существующего уровня развития техники измерения. Это свойство предполагает, что эталоны по своему устройству и действию не вносят каких-либо искажений в результаты сличений и сами не претерпевают изменений при проведении сличений.

Государственные эталоны России по своим метрологическим параметрам соответствуют международному уровню, а в отдельных случаях превосходят национальные эталоны некоторых высокоразвитых стран (Таблица 1).

Таблица 1

Величина, значение или диапазон	СКО случайной погрешности	Неисключенная систематическая погрешность
Длина, 0-1 м	$2 \cdot 10^{-11}$	10^{-9}
Масса, 1 кг	$8 \cdot 10^{-9}$	
Время, с	$1 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-14}$
Температура, К 0,8 – 273,16	0,001 К	0,003 К
Температура, °С 0– 2500	0,00005-1,4°С	0,00005-0,3°С
Сила постоянного электрического тока, А 1		

Величина, значение или диапазон	СКО случайной погрешности	Неисключенная систематическая погрешность
$1 \cdot 10^{-3}$ $1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-16}$	$5 \cdot 10^{-8}$ $5 \cdot 10^{-8}$ $3 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-7}$ $2 \cdot 10^{-7}$ $5 \cdot 10^{-4} \dots 2,5 \cdot 10^{-2}$
Сила переменного ($20 - 10^6$ Гц) электрического тока в диапазоне 1 мА – 20 А	$\leq 5 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-4}$
Сила переменного (0,1 – 300 МГц) электрического тока в диапазоне 0,04 – 300 А	$1 \cdot 10^{-3}$	$8,5 \cdot 10^{-3}$
Электродвижущая сила и электрическое напряжение, 1 В и 10 В	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$
Индуктивность 0,01 Гн $1 \cdot 10^3$ Гн	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$
Активное электрическое сопротивление, Ом 12906,4035 6453,20175 1	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$10 \cdot 10^{-8}$
Электрическая емкость, пФ 0,2	$2 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$

Если расположить эталоны в порядке уменьшения точности, то получится следующий перечень:

- 1 Эталон единиц времени и частоты
- 2 Эталон единицы длины
- 3 Эталон единицы массы
- 4 Эталон единицы ЭДС
- 5 Эталон единицы электрического сопротивления
- 6 Эталон единицы силы электрического тока
- 7 Эталон единицы плоского угла
- 8 Эталон единицы силы
- 9 Эталон единицы давления
- 10 Эталон единицы температуры в диапазоне
- 11 Эталон единицы силы света
- 12 Эталон единицы мощности СВЧ колебаний
- 13 Эталон единицы потока нейтронов
- 14 Эталон единицы объемной активности радиоактивных аэрозолей и т.д.

Точнее всего воспроизводятся единицы времени и частоты, относительная погрешность которых составляет $1 \cdot 10^{-14}$. Высокая точность характерна для воспроизведения метра и килограмма (несколько единиц на 10^{-9}), затем следуют эталоны единиц плоского угла, температуры и электрических величин ($10^{-7} \dots 10^{-6}$). Эталоны для измерений некоторых механических величин (сила, давление), имеют погрешность порядка 10^{-6} . Прочие эталоны характеризуются погрешностями от $\sim 10^{-4}$ до $\sim 10^{-2}$ (т. е. до нескольких процентов), что относится в частности к большинству величин в области оптики, радиотехники и ионизирующих излучений.

По количественному составу эталонная база России является самой представительной: ряд государственных эталонов не имеет соответствующих аналогов за рубежом. Может, однако, возникнуть вопрос: почему число государственных эталонов существенно превышает число воспроизводимых ими единиц? Ведь это означает, что некоторые единицы воспроизводятся несколькими государственными эталонами, а ранее говорилось о государственном эталоне как о едином (исходном) образце единицы физической величины.

Формально объяснение заключается в наличии так называемых "специальных" государственных эталонов, точнее — в наличии двух разновидностей государственных эталонов: первичных и специальных. Их введение потребовалось в силу нижеследующих причин.

Любой эталон (и государственный тоже) ове­ществляет не строго единицу, а некий размер физической величины, в лучшем случае максимально близкий к единице по ее определению, а чаще всего некий ограниченный диапазон (дискретный или непрерывный) значений физической величины. В то же время практика требует выполнения достоверных измерений физических величин в широком диапазоне их значений, иногда перекрывающих 10...20 и более порядков. Например, сила электрического тока измеряется в диапазоне от 10-16 до 106 А, электрическое сопротивление – от 10-6 до 1017 Ом. Неслучайно предусмотрено применение десятичных приставок к единицам для образования кратных и дольных единиц в диапазоне от 10-18 (атто-) до 1018 (экса-). Разумеется, требования и возможности по точности измерений в различных участках диапазона значений физической величины различны, но не всегда возможно от одного государственного эталона обеспечить передачу размера единицы на все участки диапазонов измерений с необходимой точностью. В этом заключается одна из причин создания специальных эталонов.

В качестве другой причины обычно называют особые условия измерений. Это прежде всего измерения величин, изменяющихся во времени (динамические измерения): пульсирующих температур, периодических и импульсных давлений, силы и напряжения на переменном токе, параметров переменных электрических и магнитных полей и т. д. Природа физической величины и ее единица при переходе от постоянных величин к переменным, естественно, не меняется. Однако измеряются в этом случае специфические параметры физической величины, характеризующие ее поведение во времени (амплитуда, среднее значение, мгновенное значение, среднеквадратическое значение и т. п.). Строго говоря, в этом случае изменяется само определение измеряемой физической величины и, как правило, метод измерения. Возникает необходимость воспроизведения единицы в этих особых условиях, т. е. требуется создать особый (специальный) эталон единицы.

Третья причина создания специальных государственных эталонов — существенная смена характера объекта измерений. Например, смена агрегатного состояния вещества при переходе от измерения объемного расхода жидкости к измерению объемного расхода газа, от плотности жидкости к плотности твердых веществ, от скорости твердого тела к скорости жидкости или газового потока и т. д. Или — смена вида элементарных частиц, например, при измерении параметров нейтронного и электронного полей. В этих случаях не меняются не только природа и единица физической величины, но и ее определение, однако может резко измениться способ (метод) измерения из-за резкого различия свойств объектов измерения при смене природы этого объекта.

Наконец, еще одну обширную группу особых условий составляют измерения физических величин, сильно зависящих от какой-либо другой величины, при изменении влияющей величины. Примером являются измерения теплоемкости или теплопроводности при разных значениях температуры излучаемого образца, измерения поглощенной дозы гамма-излучения (или другого вида излучения) при различных значениях энергии этого излучения, измерения различных параметров оптического излучения для разных длин волн и т. п.

Возможны и более сложные случаи особых условий в виде комбинаций из перечисленных выше четырех типов, например, в области акустических измерений, где измеряются переменные звуковые давления в различных средах (водной и воздушной). Во всех этих случаях могут создаваться специальные государственные эталоны.

Необходимость обеспечения единства измерений в особых условиях является необходимым условием создания специальных эталонов, но недостаточным. Достаточным условием может служить невозможность передачи с требуемой точностью размера единицы от первичного эталона к средствам измерений данной величины в особых условиях. Таким образом, первичные государственные эталоны воспроизводят единицу данной физической величины и являются самыми высокоточными измерительными устройствами среди всех средств измерений этой величины; специальные государственные эталоны также воспроизводят эту единицу, но в соответствующих особых условиях, и являются самыми высокоточными среди всех средств измерений данной величины в этих особых условиях.

Таким образом, для каждой физической величины должен быть (если обоснована необходимость централизации воспроизведения единицы) только один государственный первичный эталон. Специальных же государственных эталонов для той же физической величины может быть несколько в зависимости от числа представляющих практический интерес особых условий измерений и от возможностей первичной системы воспроизведения и передачи размера единицы.

Система передачи единицы физической величины от эталона к рабочим средствам измерений называется поверочной схемой. Она имеет несколько ступеней и в общем виде может быть представлена структурной схемой, показанной на рисунке 1.

Передача единицы величины от эталона ко всем рабочим средствам измерений осуществляется не единожды, а периодически, ибо нельзя гарантировать, что хранение единицы в рабочем средстве измерений не повлечет изменение размера этой единицы через некоторое время.

До 1994 года в нашей стране в течение более 200 лет применялся термин «образцовое средство измерений», которое служило промежуточным метрологическим звеном, расположенным между эталоном и рабочими средствами. С целью приближения терминологии, применяемой метрологами страны, к международной, было принято решение именовать образцовые средства измерений рабочими эталонами. Поскольку образцовые средства измерений в зависимости от точности подразделялись на разряды от 1-го (более высокой точности) до 3-его, а иногда даже до 4-го разряда, то рабочие эталоны стали называться рабочими эталонами 1-го разряда, 2-го разряда и т. д.

Рабочие средства измерений, или просто средства измерений, могут быть существенно разного класса точности, поэтому сличение их с эталоном производится на соответствующей ступени поверочной схемы.

Схема состоит из некоторого числа ступеней передачи размера единицы физической величины. На каждой ступени используется один из методов поверки. Каждая ступень характеризуется допускаемой погрешностью поверки.

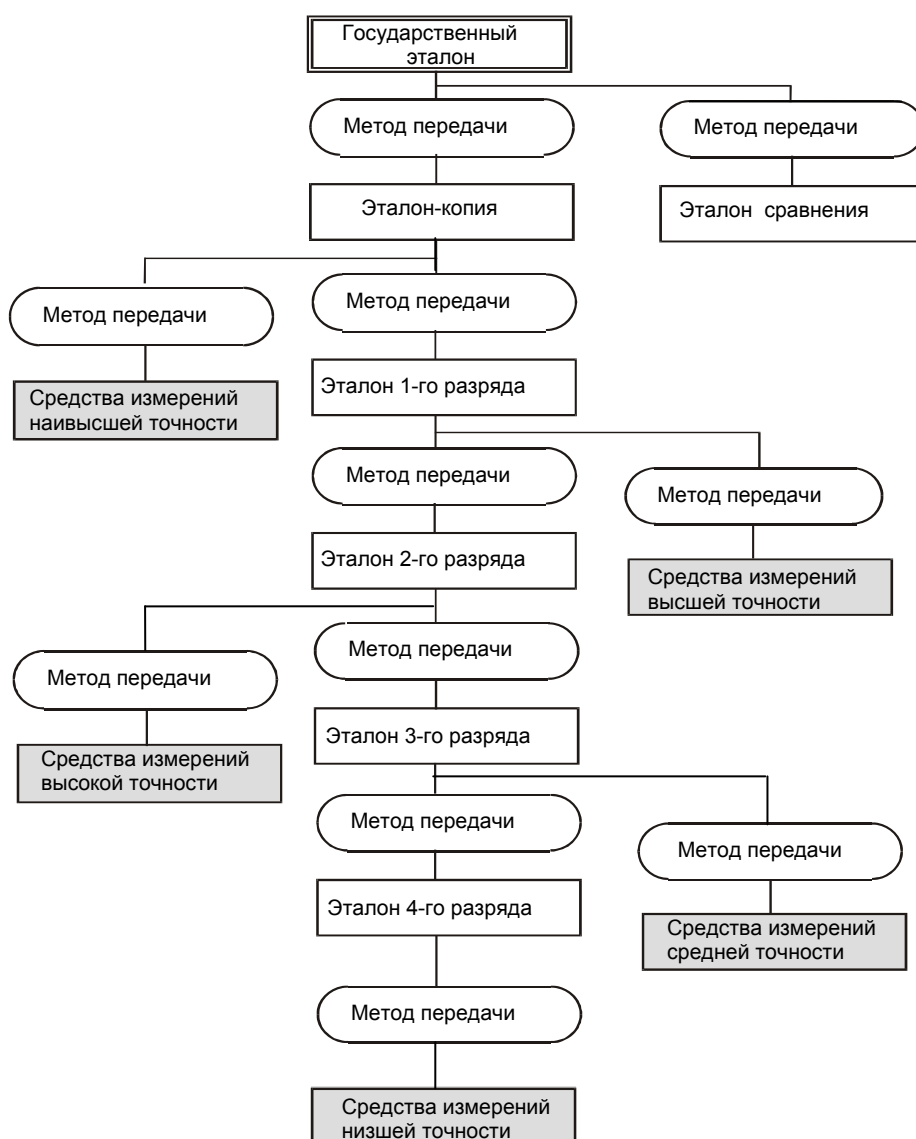


Рисунок 1. Структура передачи единицы физической величины рабочим средствам измерений различной точности

Стандартизованы следующие общие методы поверки:

- метод непосредственного сличения (т.е. без специальных средств сравнения);
- метод сличения при помощи компаратора;
- метод прямых измерений;

- метод косвенных измерений.

Государственная поверочная схема для каждой физической величины или даже для конкретных диапазонов устанавливается стандартом (ГОСТ Р). Она представляется в документах чертежом (графически).

5 Государственные эталоны основных единиц СИ

В соответствии с современными положениями СИ в качестве основных единиц приняты:

- единица длины — **метр** (м);
- единица массы — **килограмм** (кг);
- единица времени — **секунда** (с);
- единица силы электрического тока — **ампер** (А);
- единица термодинамической температуры — **кельвин** (К);
- единица силы света — **кандела** (кд);
- единица количества вещества — **моль** (моль).

Каждая из основных единиц имеет строгое определение, выработанное в решениях Генеральной конференции мер и весов.

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

Килограмм — масса, равная массе международного прототипа килограмма, хранящегося в международном бюро мер и весов.

Секунда — интервал времени, равный $9\,192\,631\,770$ периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

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

Кельвин — интервал температуры, равный $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды.

Кандела — сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила излучения которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт · ср⁻¹.

Моль — количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в образце из углерода - 12 массой 0,012 кг.

Выбор размеров основных единиц, как известно, произволен. В приведенных определениях отражены принципы преемственности размеров единиц и максимальной точности их воспроизведения. Номенклатура основных единиц позволяет охватить все области науки и техники.

До недавнего времени единицы плоского угла (радиан, равный углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу) и телесного угла (стерадиан, равный телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной размером с радиус этой сферы) были выделены в особую группу так называемых дополнительных единиц. С 1995 года они переведены в разряд производных единиц.

В настоящее время созданы и действуют государственные эталоны для единиц длины, массы, времени, температуры, силы света, силы электрического тока. Для единицы количества вещества (моля) эталоны пока не созданы нигде в мире, по-видимому, прежде всего по той причине, что практическое использование такого эталона не очень ясно.

Общее число государственных эталонов основных единиц (18) значительно (в 3 раза) превышает число воспроизводимых ими основных единиц (6), так как и для основных единиц потребовалось создание не только первичных, но и специальных эталонов. Так, для основной единицы длины (метра) функционируют 5 государственных эталонов: помимо первичного эталона метра, созданы специальные эталоны для таких специфических областей линейных измерений, как измерения длин волн оптического излучения в спектроскопии, измерения параметров шероховатости, измерения параметров эвольвентных поверхностей для зубчатых зацеплений, измерения амплитуды перемещений при колебательном движении твердых тел. Для основной единицы температуры — кельвина — функционируют 7 государственных эталонов; для единицы силы тока — ампера — 3 государственных эталона; для остальных основных единиц (килограмма, секунды и канделы) в настоящее время имеется только по одному (первичному) государственному эталону.

5.1 Государственный первичный эталон единицы массы

Государственный эталон единицы массы — килограмм — является самым древним из всех государственных эталонов, хотя в современном его составе он был утвержден в 1968 г.

Размер килограмма был впервые задан при установлении метрической системы через размер его дольной единицы — грамма, определенного как масса дистиллированной воды при температуре таяния льда в объеме куба с ребром 1/100 метра. Позднее перешли к более удобному размеру единицы — килограмму, как массе воды в объеме кубического дециметра. В качестве нормальных условий была принята температура +4°C, при которой вода имеет наибольшую плотность. В 1889 г. по результатам тщательных измерений массы 1 дм³ воды во Франции был изготовлен первый прототип килограмма — платино-иридиевая гиря в виде цилиндра высотой 39 мм, равной ее диаметру, впоследствии названная архивным килограммом. Дальнейшие успехи точного взвешивания позволили установить, что масса архивного килограмма на 0,028 г больше массы 1 дм воды и что определить массу платинового килограмма можно в тысячу раз точнее, чем массу 1 дм воды.

В 1878—83 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 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.

Первый Государственный эталон единицы массы в нашей стране был утвержден в 1918 г. Им являлся один из национальных прототипов, приобретенных Россией в 1889 г., — копия №12 международного прототипа килограмма. В МБМВ за 1883—1889 гг. была произведена окончательная подгонка всех прототипов и их исследование. Вся процедура изготовления прототипа №12 и его исследования подробно изложена в сертификате МБМВ на этот прототип, согласно которому масса прототипа №12 на 1889 г. составляла 1 кг + (0,068 ± 0,002) мг.

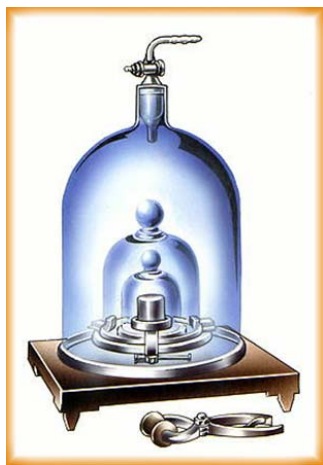


Рисунок 2. Государственный первичный эталон единицы массы

Все национальные прототипы каждые 25 — 35 лет должны сличаться в МБМВ с международным прототипом килограмма (или с его свидетелями). Передача размера килограмма (или его дольных частей) от прототипа №12 ко вторичным эталонам (эталонным гирям) до 1966 г. осуществлялась при помощи эталонных весов №1 с нагрузкой до 1 кг. Однако весы не входили тогда в состав Государственного эталона килограмма.

Действующий в настоящее время Государственный первичный эталон единицы массы — килограмма утвержден в 1968 г. в составе следующих средств измерений:

- 1) копия №12 международного прототипа килограмма;
- 2) эталонные весы №1 и №2.

Прототип №12 обеспечивает воспроизведение и хранение единицы массы в национальном масштабе — масштабе всей страны. При этом используются сложные приемы бережливого хранения вещественного килограмма и ювелирная техника работы на эталоне. 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 перемещений 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°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. Как и большинство высокоточных весов, эталонные весы №1 и №2 являются равноплечными призматическими рычажными весами. Весы №2 имеют ряд преимуществ по сравнению с весами №1 в части конструкции и снабжены автоматическим регистрирующим устройством. Управление обоими "эталонными" весами производится дистанционно при помощи манипуляторов, которые позволяют освобождать коромысла весов (и перемещать в них гири) из другого помещения, с расстояния почти 4 м. Для уменьшения влияния температурных и воздушных колебаний в процессе измерений, а также попадания

всевозможных пылинок, эталонные весы заключены в специальный стеклянный кожух. Специальное устройство позволяет измерять дистанционно температуру воздуха внутри весов с погрешностью $0,002^{\circ}\text{C}$.

Использование методики, основанной на способе Гаусса, позволяет обеспечивать на государственном первичном эталоне воспроизведение единицы массы в 1 кг и передачу ее размера вторичным эталонам с СКО результата, не превышающим 0,007 мг при условии соблюдения установленных правил хранения и применения эталонов массы.

Государственный первичный эталон единицы массы хранится и применяется во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Опыт применения национальных прототипов килограмма из платиноиридиевого сплава на протяжении более 80 лет показал, что эти гири обладают высокой стабильностью массы; по исследованиям МБМВ эти гири обеспечат хранение единицы массы с погрешностью не более 10^{-8} в течение нескольких столетий их применения.

В настоящее время, однако, остается принципиальное несовершенство эталона, связанное с искусственным определением единицы массы. Стремясь заменить его естественным эталоном и получить гарантию определенной стабильности, ученые ведут поиски путей существенного повышения точности определения атомной единицы массы с тем, чтобы выразить килограмм через массу какой-либо элементарной частицы или атома.

Германские ученые стремятся вывести единицу массы через трудоемкий подсчет количества атомов, содержащихся в килограммовом кристалле кремния. Речь идет об основном изотопе кремния - 28, отделением которого от прочих изотопов немецкие ученые занимаются совместно в сотрудничестве с российскими физиками-ядерщиками, разработавшими наиболее эффективные методы центрифужного получения высокообогащенных радиоактивных элементов.

Американские ученые пошли по другому пути: их идея заключается в том, чтобы точно измерить в ваттах величину электромагнитной мощности, необходимой для уравнивания эталонного килограмма (так называемый ваттовый баланс). Окончательное решение – какой из этих двух вариантов определения килограмма взять за основу – остается за Международным комитетом мер и весов.

5.2 Государственный первичный эталон единицы времени и частоты

В 1967 г. на XIII ГКМВ было принято новое определение единицы времени - секунды как промежуток времени, в течение которого совершается 9 192 631 770 колебаний, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между уровнями ($F = 4, m_F = 0$) и ($F = 3, m_F = 0$) сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия - 133 при отсутствии внешних возмущающих полей.

Государственный первичный эталон единиц времени и частоты является самым сложным из всех эталонов. В его состав входит большой комплекс аппаратуры, каждое звено которого представляет весьма сложное техническое устройство.

Эталон в целом предназначен для воспроизведения и хранения:

- 1) единицы времени — "атомной" секунды (с);
- 2) единицы частоты — герца (Гц);
- 3) шкалы атомного времени — ТА ;
- 4) шкалы координированного времени — UTC .

Воспроизведение единицы времени (и частоты) в соответствии с ее определением осуществляет в эталоне специально созданная, уникальная по своим характеристикам установка—цезиевый репер частоты — реализующая с наивысшей точностью принцип цезиевой меры частоты (рисунок 3).

Государственный эталон времени и частоты обеспечивает воспроизведение размеров единиц времени и частоты (секунды и герца) со средним квадратическим отклонением, не превышающим $5 \cdot 10^{-14}$, при не исключенной составляющей систематической погрешности менее 10^{-14} .

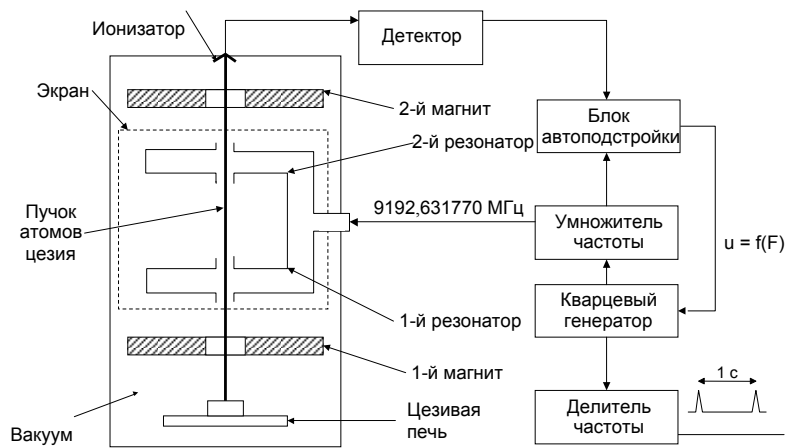


Рисунок 3. Государственный первичный эталон единицы времени и частоты

Эталон соответствует определению единицы времени—секунды как интервала времени, в течение которого совершается 9192 631 770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями ($F=4, m_F=0$ и $F=3, m_F=0$) основного состояния атома цезия-133 в отсутствие внешних полей.

Принцип действия эталона (рисунок 3) заключается в следующем. Атомы цезия-133 испаряются цезиевой печью при температуре около 400 К и со скоростью 20 км/с попадают в неоднородное поле первого магнита, которое направляет к центру установки атомы с квантовым числом $F=4$ и рассеивает все остальные частицы. В центре установки расположена система из 1-го и 2-го резонаторов, где на атомы цезия действует высокочастотное магнитное поле, создаваемое кварцевым генератором. При настройке частоты генератора в резонанс с частотой квантового перехода возникает лавинообразный процесс перехода атомов цезия от уровня $F=4$ к уровню $F=3$. Затем атомы цезия попадают в неоднородное поле второго сортирующего магнита, которое фокусирует на детекторе атомы с уровнем $F=3$ и рассеивает все другие. Создаваемый детектором ток ионизации достигает максимума при совпадении частоты кварцевого генератора с частотой квантового перехода. При неравенстве этих частот уменьшается ток ионизации, что служит сигналом для автоматической подстройки частоты генератора.

В состав эталона входят два цезиевых квантовых стандарта частоты и 4 водородных стандарта частоты. Входящие в состав эталона водородные реперы частоты имеют другой принцип действия, основанный на резонансном излучении с меньшей частотой (1 420 405 751,8 Гц). Они выполняют роль эталона-копии и позволяют долгое время хранить однажды установленный с помощью первичного (цезиевого) репера размер секунды, не прибегая к его частому включению. Однако все реперы воспроизводят значение частоты, определяющей размер секунды, лишь периодически.

Хранители частоты — это непрерывно работающие меры (кварцевые плюс квантовые), обеспечивающие формирование и хранение шкал времени.

Основная шкала, хранимая эталоном - шкала равномерного атомного времени - ТА. Это равномерная шкала интервалов с фиксированным нулем отсчета. Размер ее секунды соответствует определению 1967 г. Шкала никак не связана с вращением Земли, с ее положением в пространстве. Наряду с ней существует группа неравномерных шкал времени, связанных с положением Земли в пространстве и калибруемых по результатам астрономических и радиоастрономических наблюдений:

- шкала всемирного времени UT0, длительность секунды в которой равна средней солнечной секунде.
- шкала всемирного времени UT1, которая отличается от UT0 поправкой на колебания полюсов Земли:

$$UT1 = UT0 + \Delta\lambda.$$

- шкала всемирного времени UT2, которая отличается от UT1 поправкой на сезонную неравномерность вращения Земли:

$$UT2 = UT1 + \Delta T_s.$$

Шкалы ТА и UT постепенно и постоянно расходятся. Чтобы максимально устранить последствия этого, введена шкала координированного времени UTC. Секунда UTC равна секунде ТА, а начало счета может меняться ровно на 1 секунду с первого числа каждого месяца (предпочтительно 1 января или 1 июня) в 0 часов по шкале UT2 с тем, чтобы расхождения между UTC и UT2 не превышали бы 0,9 секунды. Практически поправка вводится раз в год - 1 января.

Шкала UTC (точнее, ее национальная версия UTC-SU) также поддерживается эталоном времени и частоты России.

Именно шкала UTC-SU используется для передачи сигналов времени через радио- и телевизионные каналы.

Постепенно точность «горизонтальных» цезиевых реперов перестала удовлетворять требованиям науки и техники. Выход был найден в разработке нового репера, получившего полуофициальное название "фонтан". В нем атомы цезия движутся вертикально со скоростями порядка единиц сантиметров в секунду (применяется так называемое лазерное охлаждение). При таких скоростях уже можно пренебрегать эффектом Допплера и рядом других мешающих факторов. В результате можно ожидать значений относительной погрешности порядка $1 \cdot 10^{-16}$.

Главным недостатком нового репера является очень большая стоимость, от 500000 до миллиона долларов. На сегодня работают три «фонтана»: французский, американский и германский. На очереди четвертый - российский.

Комплекс аппаратуры Государственного первичного эталона хранится и применяется во ВНИИФ-ТРИ, где он размещен в пяти термостатных комнатах и четырех аппаратных залах. Аппаратура размещена на специальных фундаментах, развязанных от корпуса здания, и экранирована от внешних магнитных полей. Температура в термостатных комнатах в течение года изменяется не более чем на 4°C , в течение суток - не более $0,2^{\circ}\text{C}$. Влажность колеблется в пределах $70 \pm 10\%$.

5.3 Государственный первичный эталон единицы длины

Каким длительным и сложным бывает путь к новому определению основных единиц и к их практической реализации, наглядно свидетельствует история создания современного первичного государственного эталона длины - метра.

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.

Две такие копии (№28 и №11) получила Россия, из них копия №28 явилась первым Государственным эталоном метра в нашей стране, утвержденным в 1918 г., и просуществовавшим в этом ранге вплоть до 1968 г., когда в качестве государственного первичного был утвержден новый эталон метра, соответствующий новому "световому" определению единицы длины. Размер новой единицы ($1\ 650\ 763,73$ длин волн оранжевой линии криптона-86) соответствовал размеру прежнего международного прототипа метра.

В основе Государственного первичного эталона метра, как и в основе определения этой единицы, были заложены два фундаментальнейших свойства материи:

- 1) атомное "происхождение" оптического излучения, имеющего квантово-механический характер и
- 2) явление интерференции электромагнитных волн.

В 1983 г. XVII Генеральная конференция по мерам и весам приняла новое определение метра: "Метр – длина пути, проходимого в вакууме светом за $1/299792458$ доли секунды". Новый эталон метра опирается на эталон единиц времени и частоты.

Создание единого эталона единиц времени-частоты-длины является значительным шагом в использовании современной физики в метрологии, в осуществлении программы перехода на естественные эталоны, основанные на фундаментальных физических константах. Преодолеть технические трудности, стоящие на пути создания единого эталона, стало возможным лишь после разработки систем, использующих фундаментальные достижения квантовой механики. Возможность создания единого эталона, т. е. возможность воспроизведения в одном физическом процессе - распространении плоской электромагнитной волны в вакууме - двух единиц физических величин - единиц времени и длины, базируется на фундаментальной

постоянной - скорости света в вакууме $c = 299792458$ м/с и соотношении $c = \lambda \cdot \nu$, связывающем пространство и время (ν - частота, λ - длина волны).

Ранее использовать значение скорости света как фундаментальной физической константы было затруднительно. К 1980 г. ее значение принималось как $(299792,458 \pm 0,0012)$ км / с, т.е. не могло рассматриваться как константа. Использование высокостабильных лазеров при измерении скорости света позволило постулировать значение скорости света точно равной $299792,458$ км / с.

В настоящее время для обеспечения высокой степени стабилизации важнейшего параметра лазерного излучения – частоты широко применяются гелий – неоновые лазеры на длине волны излучения $\lambda = 3,39$ мкм (инфракрасная область спектра) и $\lambda = 0,63$ мкм (видимая область спектра), стабилизированные соответственно по насыщенному поглощению в метане (He–Ne/ CH₄) и молекулярном йоде (He–Ne/I₂). Лазеры на основе (He–Ne/ CH₄) по воспроизводимости частоты приближаются к цезиевому стандарту частоты, являющемуся основой эталона единиц времени и частоты. Работающий в видимом диапазоне спектра He–Ne/I₂ лазер позволяет реализовать новое определение метра через скорость распространения света в вакууме. Наличие излучения на двух длинах волн ($\lambda = 0,63$ мкм и $\lambda = 3,39$ мкм) дает возможность с помощью интерферометра обеспечить высокую точность измерений.

На рисунке 4 приведена структурная схема единого эталона. В состав его входят: государственный первичный эталон единиц времени и частоты, включающий государственный эталон единиц времени и частоты (радиодиапазона), радиооптический частотный мост, лазеры ($\lambda = 3,39$ мкм), а также государственный первичный эталон единицы длины (метра), включающий лазеры ($\lambda = 0,633$ мкм), интерферометры 1 и 2 и установку для измерения отношения длин волн.

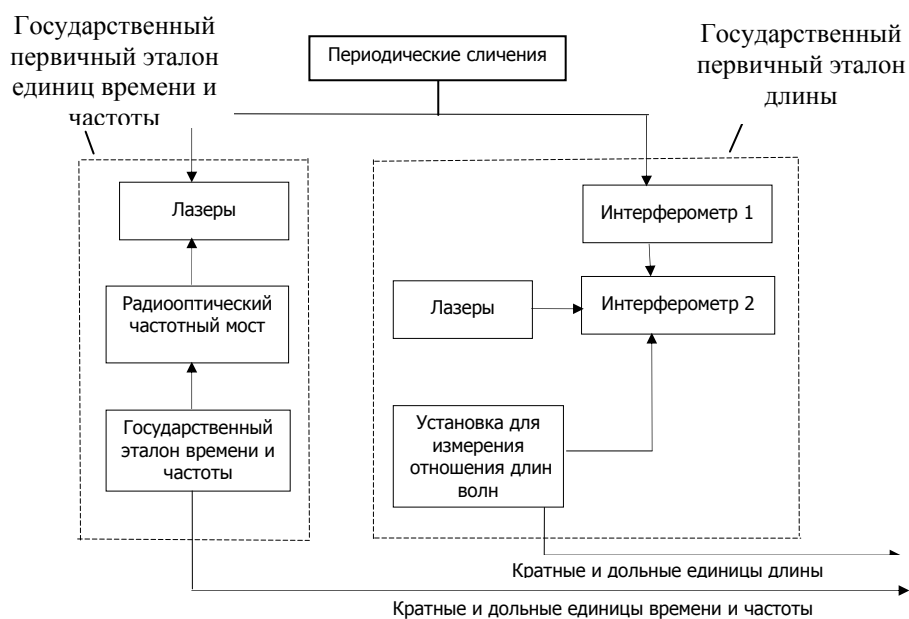


Рисунок 4. Государственный единый эталон единиц времени, частоты и длины

Этот эталон имеет погрешность воспроизведения в виде среднего квадратического отклонения результата измерений $1 \cdot 10^{-11}$.

Единый эталон метра – секунды – герца введен в действие как государственный в 1992 году. Эталон единиц времени, частоты и длины состоит из двух частей: эталон времени и частоты, а также РОЧМ, составляющие его первую часть, находятся в ГП «ВНИИФТРИ», вторая же часть, составляющая интерферометр для сравнения длин волн, He–Ne/CH₄ и He–Ne/I₂ лазеры и интерференционный компаратор, находится во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. С целью объединения обеих частей эталона в единый был разработан и введен в состав эталона транспортируемый He–Ne/CH₄ лазер, длина волны которого устанавливается по выходному He–Ne/CH₄ лазеру РОЧМ и служит для измерения длины волны He–Ne/I₂ лазеров, находящихся во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева.

5.4 Государственный первичный эталон единицы температуры

Специфика температурных измерений, связанная с неаддитивностью температуры, требует построения температурной шкалы, в которой единица должна быть определена фактически в каждой точке этой шкалы (во всей области реализуемых температур). Сущность такой (термодинамической) температуры раскрывается при изучении обратимого цикла Карно, осуществляемого тепловой машиной, при котором поглощаемое количество теплоты Q_1 при температуре T_1 и отдаваемое количество теплоты Q_2 при температуре T_2 связаны однозначно между собой:

$$Q_1 / Q_2 = T_1 / T_2. \quad (1)$$

Это соотношение не зависит от свойств рабочего вещества, участвующего в цикле. Входящая в выражение температура T характеризует энергию внутреннего состояния и называется термодинамической температурой, а построенная на ее основе температурная шкала называется термодинамической температурной шкалой (ТТШ), или — шкалой Кельвина. Именно термодинамическая температура входит во все фундаментальные физические законы.

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. Температуры, определяемые по этой шкале, должны максимально совпадать с термодинамической шкалой температуры Кельвина. Это требование выполняется тем, что носителями шкалы Кельвина в основном являются термометры сопротивления, градуированные по результатам предельно точных измерений термодинамических температур, полученных и сопоставленных в ведущих термометрических лабораториях мира. Кроме того, указанное требование выполняется за счет возможности независимого воспроизведения международной шкалы в любой стране.

Для построения температурной шкалы необходимо выбрать начало отсчета и определить размер единицы. Естественным и удобным началом отсчета в ТТШ служит абсолютный нуль температуры; хотя он практически не реализуем, но этого и не требуется ввиду того, что существование $T=0$ следует из самого понятия термодинамической температуры. Выбор единицы в ТТШ достигают фиксацией—273,16 К — температурного интервала между абсолютным нулем и одной из наиболее точно реализуемых опорных (реперных) точек — температурой тройной точки воды.

Такой размер единицы для измерений температуры наиболее близок к размеру единицы шкалы Цельсия. Шкала Цельсия использует реперные точки, связанные с практически хорошо реализуемыми фазовыми состояниями системы молекул H_2O : точку таяния льда и точку кипения воды. Цельсий предложил интервал этих температур делить на 100 частей и тем самым ввел единицу для измерений температуры — градус Цельсия. Эта же единица была узаконена первой (I) ГКМВ в 1889 г., когда впервые принималась ТТШ для температурных измерений. Последующие точные измерения термодинамической температуры различных фазовых состояний позволили установить, что наиболее точно воспроизводится тройная точка воды, лежащая на 0,01°С выше точки таяния льда, и имеющая температуру 273,16°К. Десятая (X) ГКМВ в 1954 году установила ТТШ с одной реперной точкой—тройной точкой воды —и приписала ей точное значение $T = 273,16$ К. Поэтому связь между температурой в градусах Цельсия (t) и термодинамической температурой (T) определяется соотношением $t = T - T_0$, где $T_0 = 273,15$ К, а градус Цельсия (°С) равен Кельвину (К).

Наиболее точно ТТШ реализуется при помощи газового термометра, в котором используют то обстоятельство, что реальный газ в достаточно разреженном состоянии близок к идеальному и, следовательно, к нему можно применять уравнение (1). Однако газовый термометр является достаточно сложным устройством, а измерения на нем (в частности — передача размера единицы по всей шкале температур) имеют серьезные трудности, длительны и кропотливы. Поэтому еще в 1927 г. 18 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) с небольшими редакционными изменениями.

При этом основной реперной точкой шкалы является кельвин, воспроизводимый в тройной точке воды. Тройная точка воды может быть воспроизведена с погрешностью не хуже $0,0001^{\circ}\text{C}$. Это тепловое равновесие воды в твердой, жидкой и газообразных фазах и использовано для построения исходного эталона температуры.

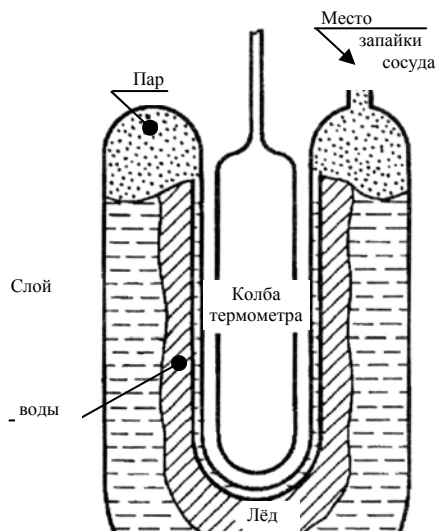


Рисунок 5. Эталон для воспроизведения единицы термодинамической температуры

Температурная шкала МТШ – 90 поддерживается двумя государственными эталонами единицы температуры. Государственный эталон единицы температуры в диапазоне $0...2500^{\circ}\text{C}$ 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.

На рисунке 5 показана схема исходного эталона единицы температуры - кельвина. Внутри защищенной от внешних источников тепла камеры помещается сосуд (ампула) для образования тройной точки воды. В ампулу загружается лед (ледяная крошка). В результате длительного воздействия льда и воды в той области ампулы, которая соприкасается с ледяной крошкой, образуется слой льда, а на внутренней области ампулы, в центре которой имеется цилиндрическая полость для помещения термометра, остается очень тонкий слой воды. В верхней части ампулы вода находится в парообразном состоянии. Таким образом, воспроизводится тройная точка воды. В качестве термометра, регистрирующего состояние тройной точки воды, применяется газовый термометр, представляющий замкнутый объем, снабженный 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 объем термометра с газом, R -газовая постоянная.

Государственный первичный эталон в диапазоне температур $0,8...303\text{ K}$ хранится во ВНИИФТРИ. Эталон имеет ряд измерительных установок: в диапазонах $0,8...4,2\text{ K}$, $4,2...13,81\text{ K}$ и выше. В диапазоне измерений $0,8...4,2\text{ K}$ эталон имеет высокие метрологические характеристики: СКО не хуже $0,0006\text{ K}$, неисключенная систематическая погрешность $0,001\text{ K}$. В диапазоне измерений $4,2...13,81\text{ K}$ значение СКО результатов наблюдений составляет $0,0005\text{ K}$, неисключенная систематическая погрешность не хуже $0,003\text{ K}$. Для наилучшего приближения к термодинамической температурной шкале в указанных диапазонах измерений используется газовый термометр. В эталонных установках, воспроизводящих температуру выше $13,81\text{ K}$, используются платиновые термометры сопротивления.

5.5 Государственный первичный эталон единицы силы света

Все световые величины описывают видимое излучение (свет), т. е. электромагнитное излучение с длиной волны в диапазоне $380 \dots 760\text{ нм}$. Их введение было обусловлено практическими потребностями в характеристиках источников и приемников освещения, воспринимаемых человеческим глазом. В качестве основной световой единицы с давних пор выбрана единица силы света, характеризующая источники видимого излучения.

В 1909 г. за единицу силы света была принята "международная свеча", осуществляемая на основе электрических ламп накаливания. Такие электрические эталонные лампы сохраняли световые единицы в течение многих лет с погрешностью $0,1\%$. Однако воспроизводимость их не могла быть высокой, так как зависела от конструкции и технологии изготовления.

Наиболее универсальным излучателем является абсолютно черное тело (полный излучатель). Его излучение и приняли в качестве эталонного на IX ГКМВ (1948 г.), хотя уже в конце 30-х годов многие страны создали эталоны на основе абсолютного воспроизведения свечи в виде полного излучателя при температуре затвердевания платины. Температура, при которой должно находиться излучающее тело, играет важную роль по двум причинам. Во-первых, эта температура должна быть достаточно большой, так как при этом увеличивается яркость (и сила света) источника. Кроме того, наиболее приближающимся по составу излучения к солнечному свету является абсолютно черное тело при температуре около 6000 K . Во-вторых, температура излучающего тела должна фиксироваться с возможно большей точностью, так как интенсивность излучения резко зависит от температуры. Такую фиксацию температуры наилучшим образом реализуют реперные точки — фазовые состояния чистых веществ. Выбор в качестве такой температуры точки затверде-

вания платины (2042 К) обусловлен практическими соображениями: большую температуру трудно реализовать в лабораторных условиях при соблюдении требований высокой точности аппаратуры эталона. Размер единицы силы света (свечи), определенной на IX ГКМВ и уточненной на 20 ГКМВ (1967 г.) с присвоением наименования "кандела", определялся (кроме температур излучателя) площадью поперечного сечения полного излучателя и отличался от прежнего размера "международной свечи" на 0,5%.

В 1979 году на XVI Генеральной конференции мер и весов было принято новое определение канделы, по которому она воспроизводится путем косвенных измерений.

Световые измерения имеют ту особенность, что в них очень большую роль играет ощущение человека, воспринимающего световой поток посредством глаз. В связи с этим обычные энергетические характеристики являются не совсем удобными для описания результатов таких измерений. Между энергетическими и световыми величинами существует однозначная зависимость, и, строго говоря, для проведения измерений световых величин не требуется введения новой основной величины. Однако, учитывая исторически сложившееся к моменту возникновения системы СИ число основных единиц физических величин, а также значительное влияние на результаты световых измерений субъекта измерений – человека, было принято решение ввести единицу силы света – канделу. Кандела – сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила излучения которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт \cdot ср⁻¹.

Исследования показали, что средний глаз человека имеет наибольшую чувствительность при длине волны около 0,555 мкм, что соответствует частоте $540 \cdot 10^{12}$ Гц. Эту зависимость чувствительности глаза от длины волны излучения описывают абсолютной световой эффективностью, которая равна отношению светового потока (т.е. оцениваемой нашим глазом мощности излучения) к полному потоку излучения. Световая эффективность представляет собой величину, позволяющую переходить от энергетических величин к световым. Она измеряется в люменах, деленных на ватт. При существующем определении канделы максимальной световой эффективности придано точное значение $K_m = 683$ Лм/Вт, тем самым она введена в ранг фундаментальных констант. В связи с этим кандела определяется путем косвенных измерений и, следовательно, является производной физической величиной, формально оставаясь основной.

Современный государственный эталон канделы имеет диапазон номинальных значений 30 – 15000 кд, среднее квадратическое отклонение результата измерений - $1 \cdot 10^{-3}$ кд; неисключенная систематическая погрешность составляет $2,5 \cdot 10^{-3}$ кд.

5.6 Государственный первичный эталон единицы силы постоянного электрического тока

В соответствии с определением единицы силы тока эталон должен быть основан на измерении силы взаимодействия двух прямолинейных проводников бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенных на расстоянии 1 м один от другого в вакууме. При силе электрического тока в проводниках 1 А сила взаимодействия составляет $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

Данное определение длительное время реализовывалось с помощью токовых весов, включающих подвижную и неподвижную токонесущие катушки и высокоточные равноплечие рычажные весы, к одному из плеч которых присоединена подвижная катушка, к другому – «чашка» с уравнивающим грузом.

Взаимодействие подвижной и неподвижной катушек, соединённых последовательно, при протекании по ним постоянного электрического тока, создаёт силу, которая вызывает отклонение одного плеча коромысла токовых весов. Эта сила уравнивается грузом (набор гирь), помещённым на «чашке» весов второго плеча коромысла. Взаимодействие токов определяется по закону Ампера

$$F_1 = kI_1I_2,$$

где F_1 – сила взаимодействия токов в подвижной и неподвижной катушках; I_1 и I_2 – сила электрического тока в подвижной и неподвижной катушках; k – постоянная электродинамической системы весов, зависящая от формы и размеров катушек, диаметра сечения проводов катушек, магнитной проницаемости сред и т.д.

В связи с последовательным соединением катушек токи в них одинаковы ($I_1 = I_2$).

Уравнивающая сила тяжести, определяющая положение нагружаемой гирями «чашки» весов, равна $F_2 = mg$,

где m – масса добавочного груза; g – значение ускорения свободного падения в месте расположения весов.

При равновесном положении токов весов, когда $F_1 = F_2$, сила тока должна иметь значение

$$I = \sqrt{(mg/k)},$$

где k – постоянная электродинамической системы, с размерностью $\text{ЛМТ}^{-2}\text{А}^{-2}$.

Таким образом, можно определить силу электрического тока в зависимости от массы добавочного груза.

Эталон силы постоянного электрического тока в виде токовых весов включает в себя:

- электродинамическую систему, состоящую из подвижной катушки, имеющей две однослойные обмотки, и двух коаксиально расположенных неподвижных катушек с однослойными обмотками. Постоянная электродинамической системы составляет $3860555 \cdot 10^{-8} \text{ Н/А}^2$;
- рычажные весы с дистанционным управлением, к одному плечу которых присоединена подвижная катушка, к другому – «чашка» для установки добавочного груза;
- цилиндрическую гирю диаметром 5 мм и длиной 50 мм, имеющую массу 8,16044 г;
- аппаратуру для передачи размера ускорения свободного падения вторичному и рабочим эталонам силы электрического тока.

Погрешность воспроизведения данным эталоном единицы ампера, выраженная средним квадратическим отклонением результата измерений, составляет $4 \cdot 10^{-6}$, неисключённая составляющая систематической погрешности не превышает $8 \cdot 10^{-6}$. Этот эталон до 1992 года служил в качестве государственного эталона ампера.

В 1992 году в качестве государственного первичного эталона силы постоянного электрического тока в диапазоне $10^{-6} \dots 30 \text{ А}$ утверждён эталон, позволяющий значительно повысить точность воспроизведения и передачи размера силы электрического тока. Новый эталон ампера состоит из двух комплексов. В первом применяется способ воспроизведения размера единицы силы тока (1мА и 1А) 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 (см. ниже).

Второй комплекс воспроизводит силу постоянного тока в диапазоне $10^{-16} \dots 10^{-9} \text{ А}$. Его основу составляет многозначная мера силы тока, включающая меру линейно изменяющегося электрического напряжения с набором герметизированных конденсаторов (C_0), прибора для измерения напряжения (U_d), прибора для измерения времени (T_d) и компарирующего (сравнивающего) устройства.

При воспроизведении размеров единицы силы тока последний определяется по формуле

$$I_0 = U_d (C_0 / T_d).$$

При этом производится компенсация электрического заряда, образуемого на одной из пластин конденсатора измеряемым (калибруемым) током I_x , зарядом, создаваемым на другой пластине конденсатора эталонным током I_0 . Таким образом, калибруемому источнику тока передается размер единицы эталонного источника тока.

Погрешности действующего государственного эталона единицы силы электрического тока в зависимости от воспроизводимой величины приведены в таблице 2.

Из сравнения первой строки таблицы 2 и указанной ранее погрешности воспроизведения размера единицы ампера с помощью «токовых весов» следует, что погрешность воспроизведения ампера с помощью нового эталона возросла более чем на два порядка. Существенно уменьшилась и неисключённая систематическая погрешность.

Таблица 2

Диапазон воспроизведения, А	Среднее квадратическое отклонение результата измерения, А	Неисключённая систематическая погрешность, А
1,0	$5 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-7}$
$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-7}$
$1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-16}$	$3 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-4} \dots 2,5 \cdot 10^{-2}$
$1 \cdot 10^{-10} \dots 1 \cdot 10^{-16}$	$2 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3} \dots 2,5 \cdot 10^{-2}$
$1 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
$1 \cdot 10^{-15}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$
$1 \cdot 10^{-16}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$

Эффект Джозефсона возникает между двумя сверхпроводниками, образующими туннельный контакт. Если два проводника (в обычном состоянии) разделены окисной пленкой толщиной порядка 10^{-7} см , то из-за туннельного эффекта электроны переходят из одного проводника в другой и между ними установ-

ливается электрическое равновесие (разность потенциалов между проводниками равна нулю). Если же к проводникам приложить извне разность потенциалов, то через туннельный контакт будет протекать электрический ток.

Если туннельный контакт образуется между двумя сверхпроводниками, то возникает эффект Джозефсона (стационарный или нестационарный), открытый английским ученым Б. Джозефсоном в 1962 г. Туннельный контакт при этом часто называют джозефсоновским.

Стационарный эффект Джозефсона состоит в том, что при нулевой разности потенциалов через туннельный контакт в сверхпроводнике течет малый постоянный электрический ток.

Нестационарный эффект Джозефсона возникает в случае, когда к джозефсоновскому контакту прикладывается постоянное напряжение U . При этом через контакт будет протекать переменный ток

$$i(t) = I_0 \sin[\varphi_0 + (2e/h)Ut],$$

где I_0 и φ_0 - постоянные величины, характеризующие амплитуду силы электрического тока и начальную фазу, соответственно; $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона (с точностью до 3 – го знака после запятой); $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – постоянная Планка.

Джозефсоновский контакт, на котором поддерживается постоянная разность потенциалов, испускает электромагнитное излучение с частотой ω :

$$\omega = (2e/h)U,$$

где $\omega = 2\pi f$ - круговая частота.

Величина $\omega/U = 2e/h = 483,59767$ МГц / мкВ является постоянной Джозефсона.

Нестационарный эффект Джозефсона обратим: если джозефсоновский контакт облучать электромагнитным полем с частотой ω , то на контакте напряжение будет ступенчатым образом изменяться в зависимости от частоты внешнего электромагнитного поля:

$$U = n \cdot (h/2e)f,$$

где f – частота электромагнитного поля.

При выполнении равенства $2eU = nhf$ каждый раз при увеличении числа n на единицу будут наблюдаться резкие ступеньки. Интервал между последовательными ступеньками достигает 4...5 мВ.

В метрологии эффект Джозефсона, нашел применение в качестве эталона единицы напряжения – вольта. Повышение точности эталона вольта на эффекте Джозефсона выше $1 \cdot 10^8$ оказалось возможным только при увеличении в $10^3 \dots 10^4$ раз квантованного напряжения первичного преобразователя частота-напряжение (криозонда), который помещается в гелиевый сосуд, т.е. достижение значений квантованного напряжения (1...10) В. Этого удалось добиться путем применения интегральной микросхемы, содержащей одновременно до $10^3 \dots 10^4$ последовательно соединенных туннельных джозефсоновских переходов. Такие микросхемы были созданы за рубежом и в нашей стране ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. В схемах с 1000 джозефсоновских переходов получено напряжение около 1 В, а в схемах с 20000 переходов – около 12 В.

В России государственный первичный эталон ЭДС и постоянного напряжения воспроизводит вольт с помощью эффекта Джозефсона. Размер единицы вольта передается вторичному эталону, в качестве которого применяется группа термостатированных насыщенных нормальных элементов.

Квантовый эффект Холла связан с использованием явления сверхпроводимости. Если структуру металл-окисел-полупроводник (МОП-структура) охладить до температуры 4,2 К и поместить в сильное магнитное поле с индукцией (6...12) Тл, то на выходе МОП-структуры, называемой холловским контактом, электрическое сопротивление будет изменяться ступенчатым образом, в соответствии с записью $g_x = n (h/e^2)$, где h – постоянная Планка, Дж·с; e – заряд электрона, Кл. Значение холловского сопротивления $g_x = 25812,807$ Ом имеет погрешность измерений около $2 \cdot 10^{-7}$.

Эталонная база России является, с одной стороны, самостоятельной и независимой, а с другой стороны, адаптированной к европейской и мировой системам обеспечения единства измерений.

Основными направлениями развития эталонной базы России в настоящее время являются:

– оптимизации эталонной базы по составу и структуре;

– создание системы взаимосвязи эталонов, в том числе "естественных", основанных на фундаментальных физических константах и статистических физических исследованиях в области воспроизведения основных и важнейших производных единиц;

– создание систем эталонов, в которой разумно сочетается централизованное и децентрализованное воспроизведение единиц;

–поисковое исследование и внедрение новых физических явлений и технологий, способных обеспечить научный прорыв при создании эталонов;

–разработка предельных по точности методов и средств измерений эталонного значения.

Эти направления конкретизованы в научно-технической программе "Эталон России", главная цель которой – создание новых и совершенствование существующих государственных эталонов в таких важнейших областях науки и техники, как механика, электромагнетизм, термодинамика, оптико-физика, физикохимия, ядерная физика и др.

Использованная литература

- 1 Российская метрологическая энциклопедия. – Санкт-Петербург. Лики России, 2001.
- 2 ГОСТ 8.057-80 ГСИ. Эталоны единиц физических величин. Основные положения.
- 3 Тарбеев Ю. В., Балалаев В. А. Государственные эталоны СССР. – М.: Машиностроение, 1981.
- 4 Кузнецов В. А., Ялунина Г. В. Метрология (теоретические, прикладные и законодательные основы): Учеб. пособие. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998.
- 5 Сергеев А. Г., Крохин В. В. Метрология: Учебное пособие для вузов. – М.: Логос, 2000.
- 6 Брянский Л. Н. Непричесанная метрология.- М.: ПОТОК – ТЕСТ, 2002.