

## ВВЕДЕНИЕ

**Радиометрия** (от лат. *radio* – излучаю и греч. *metreo* – измеряю) является одним из основных разделов метрологии в области ионизирующих излучений, в задачу которого входит разработка методов и средств точных измерений количественных характеристик радиоактивных источников излучений с целью обеспечения единства и правильности этих измерений. Базируется на различных физических эффектах, возникающих при воздействии излучения на вещество – люминесценция, ионизация, образование видимых следов и т. д.

Одним из основоположников радиометрии является [Ганс Гейгер](#), который впервые в 1903 г. измерил число  $\alpha$ -частиц, испускаемых в 1 с 1 г Ra (удельная активность), и в [1908](#) г. изобрел [счетчик заряженных частиц](#), который и в настоящее время называется его именем. Имя [Чарльза Вильсона](#) связано с изобретением камеры, позволяющей наблюдать траектории заряженных частиц с помощью конденсации пара.

Предметом радиометрии является разработка и применение методов определения активности и концентрации радиоактивных веществ в различных пробах и источниках ионизирующего излучения, а также определение спектров их излучения. Кроме того, термин «радиометрия» используют для обозначения процесса измерения активности.

Методы обнаружения излучений, которыми сопровождаются естественная или искусственная радиоактивность и ядерные реакции, а также космических лучей основаны на взаимодействии излучения с облучаемым веществом. Эти излучения при прохождении через вещество отдают свою кинетическую энергию непосредственно орбитальным электронам облучаемого вещества.

При взаимодействии любых видов ионизирующих излучений с веществом образуются ионы и свободные электроны в поглощающем веществе. Энергия, затрачиваемая частицей в результате различных процессов взаимодействия, в дальнейшем может преобразовываться в иные формы энергии. На этом принципе основаны практически все методы регистрации ионизирующих излучений.

Все эти процессы заключаются в преобразовании энергии излучения в другие виды энергии и используются для регистрации частиц и квантов.

Основная проблема измерения количеств радиоактивных веществ возникла вскоре после открытия в 1896 г. Анри Беккерелем самопроизвольного испускания солями урана проникающего излучения, сходного по своим свойствам с рентгеновским излучением, открытым годом ранее. Огромный размах исследований, предпринятых Пьером и Марией Кюри, А. Дебырном, Э. Резерфордом, Ф. Содди и многими другими учеными, ставившими своей целью поиски новых радиоактивных элементов, изучение природы радиоактивности и законов радиоактивного распада, настоятельно требовал обеспечения возможности сравнивать и сопоставлять результаты измерений,

полученные в разных лабораториях. Для решения задачи необходимо было прежде всего выбрать физическую величину, связанную с количеством радиоактивного вещества, установить единицу ее измерения, создать эталоны, воспроизводящие эту единицу, и разработать методы практических измерений, иными словами, создать новый раздел метрологии.

После открытия в 1898 г. супругами Кюри радия и получения М. Кюри в 1902 г. первых дециграммов хлористого радия этот элемент в сравнительно короткий срок получил широкое распространение в качестве основного радиоактивного источника ионизирующего излучения. Поэтому внимание ученых было обращено в первую очередь на решение проблемы измерения количеств радия. Наиболее простым и естественным казалось определение количества радия в препаратах в единицах массы. Однако измерение количества радия путем непосредственного взвешивания не могло осуществляться в повседневной практике по целому ряду причин. Основные из них заключались в следующем:

- во-первых, радиевые препараты обычно заключены в герметичные ампулы и извлечь радий невозможно без вскрытия ампул;
- во-вторых, количество радиевой соли в препаратах обычно не велико и составляет миллиграммы и микрограммы;
- в-третьих, трудно полностью очистить радиевую соль от примеси солей бария.

Необходимы были косвенные методы определения массы радия в радиевых препаратах. Таким методом явилось гамма-взвешивание, т. е. сравнение двух радиевых препаратов по интенсивности  $\gamma$ -излучения, которая, как это было установлено М. Кюри, пропорциональна массе радия, содержащегося в препарате.

В соответствии с этим Международный конгресс по электричеству и радиологии, собравшийся в 1910 г. в Брюсселе, постановил, что количество радия в радиевых препаратах следует измерять, сравнивая их по интенсивности  $\gamma$ -излучения с радиевым препаратом, содержащим известное количество радия, выраженное в миллиграммах и принятым за эталон, выражая результат измерения в миллиграмм-эквивалентах радия. Одновременно было решено поручить изготовление первичных международных радиевых эталонов М. Кюри и О. Хениггимиду.

В 1911 г. эти эталоны были изготовлены. Эталон, изготовленный М. Кюри в Институте радия в Париже, содержал 21,99 мг чистого безводного хлорида радия, заключенного в стеклянную ампулу диаметром 1,45 мм, длиной 32 мм при толщине стенок 0,27 мм. Атомный вес радия, определенный в процесс изготовления эталона, был найден равным 225,97.

О. Хениггимид в Радиевом институте в Вене изготовил препарат, содержащий 31,17 мг чистого безводного хлорида радия в запаянной стеклянной ампуле диаметром 3,2 мм, длиной 30 мм при толщине стенок 0,27 мм. Атомный вес – 225,97.

Эталоны были сравнены между собой в Париже и в 1912 г. Международный конгресс по радиологии и электричеству в Брюсселе утвердил эталон, изготовленный М. Кюри в качестве первичного международного эталона единицы массы радия, а эталон, изготовленный О. Хениггимидом, – в качестве основной копии первичного эталона. Первичный эталон решено было хранить в Институте радия в Париже, копию – в Радиевом институте в Вене.

В 1930 г. определение «кюри» было расширено и распространено на остальные продукты распада радия. Теперь под кюри подразумевалось количество любого элемента семейства радия, находящегося в радиоактивном равновесии с 1 г радия.

Значительно сложнее решалась проблема измерения количеств радиоактивных элементов, не принадлежащих к семейству радия. В силу ряда принципиальных трудностей невозможно было изготовить и использовать таким же образом соответствующие эталоны, содержащие известные количества этих элементов.

Поэтому препараты из радиоактивных элементов, испускающих  $\gamma$ -излучения, стали сравнивать с радиевыми эталонами, выражая результат в миллиграмм-эквивалентах радия, как и при сравнении радиевых препаратов. Но если результат сравнения радиевых препаратов с радиевыми эталонами, выраженный в миллиграмм-эквивалентах радия, довольно близко совпадал с массой радия в этих препаратах в миллиграммах, то результат измерения препаратов радиоэлементов, не относящихся к семейству радия, ничего не говорил о количестве радиоактивного вещества в препарате, а указывал на значение величины, названной в последствии  $\gamma$ -эквивалентом. В дальнейшем эту методику стали применять и для измерения  $\gamma$ -источников из искусственных радионуклидов.

Применение такой методики измерений нельзя было признать удачным. Вследствие различия в составе спектров  $\gamma$ -излучения измеряемого радионуклида и радия результаты измерений сильно зависели от условий измерений: от типа размеров и материала стенок детекторов, от предварительной фильтрации излучения и геометрических условий измерения. Наконец, по самому своему определению единица миллиграмм-эквивалент радия была неприменима для измерений радионуклидов, не испускающих  $\gamma$ -излучения. Между тем число таких нуклидов было довольно велико, а с открытием искусственной радиоактивности возросло во много раз. Поэтому в 1950 г. комиссия по единицам, эталонам и константам в области радиоактивности узаконила видоизмененное определение единицы измерения кюри как количество любого радионуклида, в котором в 1 с происходит  $3,7 \times 10^{10}$  актов распада. Предложенная в 1946 г. единица резерфорд не смогла конкурировать с единицей кюри. Определение кюри как единицы количества радионуклида было принято и Международной комиссией по радиологическим единицам и измерениям на сессии в 1956 г.

Масса радионуклида, соответствующая 1 Ки, зависит от вида нуклида, изменяясь от периода полураспада и активности. Поскольку значения периода полураспада большинства радионуклидов определены со сравнительно невысокой точностью, значения массы радионуклидов, соответствующие 1 Ки, тоже не могут быть точно определены.

Более логичным и рациональным явилось определение **кюри как единицы активности** радионуклида в радиоактивном источнике, данное советскими метрологами в 1952–1953 гг. Единица кюри была определена как активность препарата данного изотопа, в котором в 1 секунду происходит  $3,7 \times 10^{10}$  актов распада. В 1962 г. эту формулировку утвердила Международная комиссия по радиологическим единицам и измерениям, определив кюри как единицу активности радионуклида, а не его количества.

С 1925 г. действует Международная комиссия по радиационным единицам и измерениям (МКРЕ).

В 1960 г. создан отдел ионизирующих излучений в Международном бюро мер и весов, который обеспечивает регулярные международные сличения соответствующих радиоактивных эталонов.

Радиометрия тесно связана с дозиметрией, поскольку радиометрия характеризует сами источники излучений, а дозиметрия количественно оценивает их воздействие. Без знания активности и концентрации радиоактивных веществ в источниках излучения, окружающей среде и организме нельзя производить дозиметрические расчеты доз облучения от внешних и внутренних источников. Методы радиометрии также служат для оценки воздействия радиоактивных веществ на человека, животных и для дозиметрического контроля за их содержанием в окружающей среде, продуктах и организме.

Методы и средства радиометрии используются при исследованиях с применением радиоактивных веществ, а также в промышленности, сельском хозяйстве, при разведке полезных ископаемых, для определения возраста Земли, археологических находок и т. д. Для определения малых количеств стабильных элементов и их соединений в пробах используют радиометрический анализ, применяя метод радиоактивных индикаторов или переводя исследуемые вещества в радиоактивные.

Наиболее широко методы радиометрии используют в медицине, биологии и ветеринарии для изучения динамики обмена радиоактивных веществ в окружающей среде. Радиометрические методы и приборы используют для измерения гамма-излучения источников, применяемых с лечебными целями для внешних локальных воздействий и радиоактивных источников, вводимых внутрь для локального облучения отдельных органов и тканей, а также с диагностической целью.

Методы радиометрии также применяют при изготовлении эталонов и образцовых источников излучений, градуировке радиометрической и дозиметрической аппаратуры.

Все растущее применение радиоактивных веществ и радиоактивных источников ионизирующих излучений в различных отраслях народного хозяйства при одновременном расширении номенклатуры этих веществ и источников настоятельно требует обеспечения единообразия и правильности измерений основной количественной характеристики любого радиоактивного образца – активности нуклида в образце, а также массы радия для радиевых образцов. Эту задачу и должна решать радиометрия.

## **Раздел 1. РАДИОМЕТРИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

### **1.1. Эталоны и образцовые средства измерений**

Основу поддержания единства и правильности измерений любой физической величины составляют эталоны.

Эталоном единицы называется средство измерений (или комплекс средств измерений), обеспечивающее воспроизведение и хранение единицы с целью передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений; эталон должен быть выполнен по особой спецификации и официально утвержден в своем качестве.

Эталоны создают для воспроизведения основных единиц, а также для воспроизведения производных единиц в тех случаях, когда это целесообразно с точки зрения обеспечения единства измерений в стране.

Существуют две категории эталонов. Одну категорию составляют эталоны в виде конкретных мер или измерительных приборов, например, международный и национальные эталоны единицы массы – килограмма – в виде платино-иридиевых гирь, эталоны единицы массы радия в виде ампул, содержащих известное количество чистой радиевой соли. Существенным недостатком всех таких эталонов является их относительная недолговечность, поскольку они подвержены естественному старению, а при неблагоприятных обстоятельствах – порче и даже разрушению. Это вызывает необходимость периодической замены пришедших в негодность эталонов, что приводит, как правило, к некоторому изменению размера воспроизводимых ими единиц. Поэтому усилия метрологов уже давно направлены на создание «нетленных», т. е. неразрушаемых, или легко восстанавливаемых эталонов, основанных на постоянных свойствах веществ или тел, имеющих в природе, или на физических явлениях. Такие эталоны иногда называют «естественными», и они составляют вторую категорию эталонов.

Под «естественным» эталоном подразумевают всю совокупность средств, необходимых для воспроизведения и хранения единицы измерения и для передачи ее размера непосредственно подчиненным данному эталону мерам и измерительным приборам, т. е. метод измерения, измерительную аппаратуру, спецификацию, устанавливающую условия воспроизведения единицы и передачи ее размера, и операции, которые должны быть при этом

выполнены. Измерительная установка, предназначенная для воспроизведения единицы измерения и официально утвержденная в этом качестве, называется эталонной.

**Средства измерений**, обеспечивающие воспроизведение единицы величины с максимально возможной точностью и ее хранение для передачи размера другим средствам измерений, выполненные по особой спецификации и официально утвержденные, называются **эталонами** (рис. 1). Эталоны являются высокоточными средствами измерений и поэтому используются для проведения метрологических измерений в качестве средства передачи информации о размере единиц.

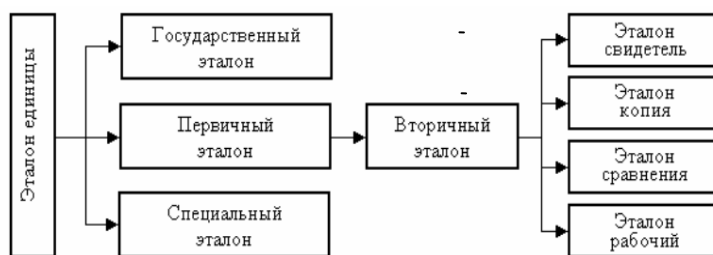


Рис. 1. Классификация эталонов

**Государственный эталон** – первичный эталон, признанный решением уполномоченного на то государственного органа в качестве исходного на территории государства. Государственными эталонами являются метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, кандела, ньютон, паскаль, вольт, беккерель.

**Первичный эталон** – эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы с наивысшей в стране (по сравнению с другими эталонами той же единицы) точностью. В случае, когда одним первичным эталоном технически нецелесообразно обслуживать весь диапазон измеряемой величины, создают несколько первичных эталонов, охватывающих части этого диапазона с таким расчетом, чтобы был охвачен весь диапазон. В этом случае проводят согласование размеров единиц, воспроизводимых «соседними» первичными эталонами. Он обеспечивает воспроизведение единицы с наивысшей в стране точностью.

В целях проведения различных метрологических работ создаются вторичные эталоны.

**Вторичный эталон** – эталон, получающий размер единицы непосредственно от первичного эталона данной единицы. Вторичные эталоны, в свою очередь, подразделяются на **эталон-свидетель, эталон-копия, эталон сравнения и рабочие эталоны.**

**Эталон-свидетель** предназначен для проверки сохранности и неизменности государственного эталона или для замены его в случае утраты или порчи.

**Эталон-копия** предназначен для передачи размера единицы рабочим эталонам. Благодаря этому первичный эталон разгружается от текущих работ

по передаче размера единицы, что повышает срок его службы.

**Эталон сравнения** – эталон, применяемый для сличений эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличены друг с другом (например, международные сличения эталонов).

**Рабочий эталон** – эталон, предназначенный для передачи размера единицы рабочим средствам измерений. Термин рабочий эталон заменил собой термин образцовое средство измерений (ОСИ), что сделано в целях упорядочения терминологии и приближения ее к международной. При необходимости рабочие эталоны подразделяют на разряды (1-й, 2-й, ...,  $n$ -й), как это было принято для ОС. В этом случае передачу размера единицы осуществляют через цепочку соподчиненных по разрядам рабочих эталонов. При этом от последнего рабочего эталона в этой цепочке размер единицы передают рабочему средству измерений (рис. 2).

Рабочие эталоны являются наиболее распространенной категорией вторичных эталонов.

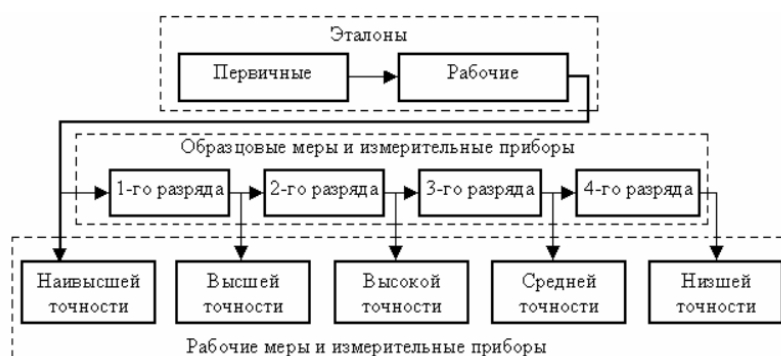


Рис. 2. Схема последовательности передачи размеров единиц

**Специальный эталон** служит для воспроизведения единицы в условиях, в которых первичный эталон не может использоваться и прямая передача размера единицы от первичного эталона с требуемой точностью технически неосуществима.

**Исходный эталон** – эталон, обладающий наивысшими метрологическими свойствами (в данной лаборатории, организации, на предприятии), от которого передают размер единицы подчиненным эталонам и имеющимся средствам измерений. Исходным эталоном в стране служит первичный эталон, исходным эталоном для республики, региона, министерства (ведомства) или предприятия может быть вторичный или рабочий эталон. Вторичный или рабочий эталон, являющийся исходным эталоном для министерства (ведомства) нередко называют ведомственным эталоном. Эталоны, стоящие по поверочной схеме ниже исходного эталона, обычно называют подчиненными эталонами.

Первичные и специальные эталоны являются исходными для страны, их утверждают в качестве государственных. Все эталоны характеризуются неисключенной систематической погрешностью воспроизведения

соответствующей единицы и относительным среднеквадратическим отклонением результата измерения размера этой единицы. Первая величина показывает точность эталона по отношению к принятому определению единицы и важна как для обеспечения правильности измерений, так и для их единства в международном масштабе. Вторая характеризует воспроизводимость эталоном размера единицы и является важнейшей характеристикой обеспечения единства измерений в стране.

Основаниями для создания первичных эталонов являются:

- широкое распространение образцовых и рабочих средств измерений, градуированных в данных единицах;
- целесообразность воспроизведения единицы в одном органе государственной метрологической службы;
- техническая возможность создания эталона и передачи размера единицы, воспроизводимой им, с необходимой точностью.

Основанием для создания вторичных эталонов является целесообразность:

- предохранения исходного эталона от преждевременного износа;
- наиболее рациональной организации поверочных работ;
- обеспечения сличений эталонов;
- контроля за неизменностью размера единицы, воспроизводимой исходным эталоном.

**Национальный эталон** – эталон, признанный официальным решением служить в качестве исходного для страны. Данное определение по существу совпадает с определением понятия государственный эталон. Это свидетельствует о том, что термины «государственный эталон» и «национальный эталон» отражают одно и то же понятие. Вследствие этого термин «национальный эталон» применяют в случаях проведения сличения эталонов, принадлежащих отдельным государствам, с международным эталоном или при проведении так называемых круговых сличений эталонов ряда стран.

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

**Одиночный эталон** – эталон, в составе которого имеется одно средство измерений (мера, измерительный прибор, эталонная установка) для воспроизведения и (или) хранения единицы.

**Групповой эталон** – 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. Групповые эталоны подразделяют на групповые эталоны постоянного или переменного составов. За результат измерений принимают обычно среднее арифметическое значение результатов измерений однотипными средствами измерений или эталонными установками.

**Эталонный набор** – эталон, состоящий из совокупности средств измерений, позволяющих воспроизводить и (или) хранить единицу в

диапазоне, представляющем объединение диапазонов указанных средств (эталонные разновесы, наборы эталонных гирь и эталонные наборы ареометров). Эталонные наборы создаются в тех случаях, когда необходимо охватить определенную область значений физической величины.

**Транспортируемый эталон** – эталон (иногда специальной конструкции), предназначенный для его транспортирования к местам поверки (калибровки) средств измерений или сличений эталонов данной единицы.

**Хранение эталона** – совокупность операций, необходимых для поддержания метрологических характеристик эталона в установленных пределах. При хранении первичного эталона выполняют регулярные его исследования, включая сличения с национальными эталонами других стран с целью повышения точности воспроизведения единицы и совершенствования методов передачи ее размера. Для руководства работ по хранению государственных эталонов устанавливают специальную категорию должностных лиц – ученых хранителей государственных эталонов, назначаемых из числа ведущих в данной области специалистов-метрологов.

**Эталонная база страны** – совокупность государственных первичных и вторичных эталонов, являющаяся основой обеспечения единства измерений в стране. Число эталонов не является постоянным, а изменяется в зависимости от потребностей экономики страны. Обычно прослеживается увеличение их числа во времени, что обусловлено постоянным развитием рабочих средств измерений.

**Эталонная установка** – измерительная установка, входящая в состав эталона. Эталон может состоять из нескольких эталонных установок.

В состав государственного первичного эталона единицы активности радионуклидов входит шесть эталонных установок.

**Поверочная установка** – измерительная установка, укомплектованная рабочими эталонами и предназначенная для поверки рабочих средств измерений и подчиненных рабочих эталонов.

#### **Основные свойства эталонов:**

– 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 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 сличения с эталоном других средств

измерений, нижестоящих по поверочной схеме, в первую очередь вторичных эталонов, с наивысшей точностью для существующей техники измерения. Это свойство предполагает, что эталоны по своему устройству и действию не вносят каких-либо искажений в результаты сличения и сами не претерпевают изменений в результате сличений.