

# Перспективы расширения номенклатуры плоских радиометрических источников большой площади с альфа/бета-излучающими радионуклидами, показатели ТОЧНОСТИ

В статье рассматриваются проблемы, возникающие при испытаниях, калибровке и применении зарубежных приборов радиационного контроля из-за отсутствия единых требований к средствам измерений в российских и международных стандартах, в частности, к единой номенклатуре радиометрических источников. Представлены перспективные направления по расширению номенклатуры плоских радиометрических источников большой площади, затронуты вопросы оценки показателей точности.

## **Ключевые слова:**

*обеспечение единства измерений, испытания в целях утверждения типа СИ, плоские радиометрические источники большой площади, поток альфа-, бета-частиц в  $2\pi$  ср (стерадиан), коэффициенты перехода от потока к активности, равномерность распределения радиоактивного вещества, неопределенность результатов измерений.*

**Т.И.Шильникова,  
И.В.Алексеев, С.М.Аршанский,  
Г.В.Жуков, А.В.Заневский,  
Н.Н.Моисеев, А.А.Осокина,  
С.В.Сэпман, Е.Е.Терещенко**

(ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург)

**Д**ля обеспечения требуемого уровня достоверности результатов измерений все средства измерений (далее СИ), отнесенные к сфере государственного регулирования в области обеспечения единства измерений, подлежат обязательным государственным испытаниям в целях утверждения типа СИ в соответствии с приказом Минпромторга РФ N 2905 от 28.08.2020 «Об утверждении порядка проведения испытаний стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа, порядка утверждения типа стандартных образцов или типа

средств измерений, внесения изменений в сведения о них, порядка выдачи сертификатов об утверждении типа стандартных образцов или типа средств измерений, формы сертификатов об утверждении типа стандартных образцов или типа средств измерений, требований к знакам утверждения типа стандартных образцов или типа средств измерений и порядка их нанесения».

Первый этап работ по проведению испытаний средств измерений включает разработку и согласование с Заявителем программы испытаний средств измерений, один из обязательных пунктов которой содержит определение метрологических и технических характеристик средств измерений, включая показатели точности. Данное требование распространяется на СИ как российских, так и зарубежных изготовителей.

Если российские изготовители при выпуске СИ руководствуются требованиями государственных стандартов и, соответственно, представляют методы испытаний в целях установления их соответствия метрологическим и техническим требованиям с использованием доступных в РФ средств измерений, то зарубежные изготовители выпускают СИ в соответствии с международными стандар-

тами, которые (на сегодняшний день) отличаются как по перечню обязательных метрологических и технических характеристик, так и по методам их проверки.

Разные требования к метрологическим характеристикам и разные методы их определения приводят к проблемам и неразберихе уже на первом этапе испытаний при согласовании характеристик СИ, порождая в дальнейшем массу трудностей как у конечных пользователей СИ, так и у специалистов, занимающихся испытаниями приборов и разработкой методик поверки, необходимых для обеспечения точности измерений в соответствии с Государственной поверочной схемой для средств измерений активности радионуклидов, удельной активности радионуклидов, потока альфа-, бета-частиц и фотонов радионуклидных источников [1].

Вопрос о необходимости согласования российских и международных стандартов в области радиационной безопасности поднимался уже неоднократно. В частности, на семинаре Госкорпорации «Росатом» «Радиационная безопасность и охрана окружающей среды в атомной отрасли» в мае 2018 г. принято «Решение семинара ГК «Росатом» по радиационной безопасности о международных

стандартах» [2]. Применение единых стандартов существенно упростит процедуры испытаний, порой протекающие как серьезные научно-исследовательские работы, сократит время от подачи заявки до получения разрешения на применение приборов в РФ, и, что немаловажно, даст реальную возможность применять и адаптировать калибровки изготовителя под задачи российских пользователей.

В данной статье отражены проблемы, возникающие из-за применения разных радиометрических источников для испытаний и калибровки однотипных приборов в РФ и за рубежом, описаны перспективы их решения.

### **Плоские радиометрические источники альфа-, бета-излучения большой площади, область применения**

Основная область применения плоских радиометрических источников большой площади – калибровка, поверка, испытания приборов контроля радиоактивного загрязнения: радиометров загрязненности поверхностей альфа- и бета-излучающими радионуклидами, мониторов радиоактивного поверхностного загрязнения персонала, радиометров альфа-бета-излучения. Измерения

**Табл.1.** Типы источников.

| Тип источников |            | Площадь активной части источников, см <sup>2</sup> |
|----------------|------------|--|
| Pu-239         | Sr-90+Y-90 |  |
| 1П9            | 1СО        | 1  |
| 2П9            | 2СО        | 4  |
| 3П9            | 3СО        | 10   |
| 4П9            | 4СО        | 40   |
| 5П9            | 5СО        | 100  |
| 6П9            | 6СО        | 160  |

радиоактивного загрязнения имеют исключительное значение для обеспечения радиационной безопасности, особенно при выводе из эксплуатации ядерных установок и в чрезвычайных ситуациях, подобных аварии на АЭС «Фукусима-Дайити» в 2011 году.

На сегодняшний день российскую номенклатуру радиометрических плоских источников большой площади с альфа-бета-излучающими радионуклидами, предназначенных для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений и, соответственно, применяемых

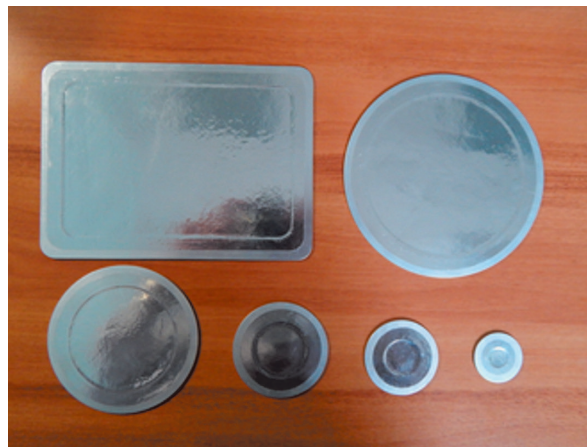
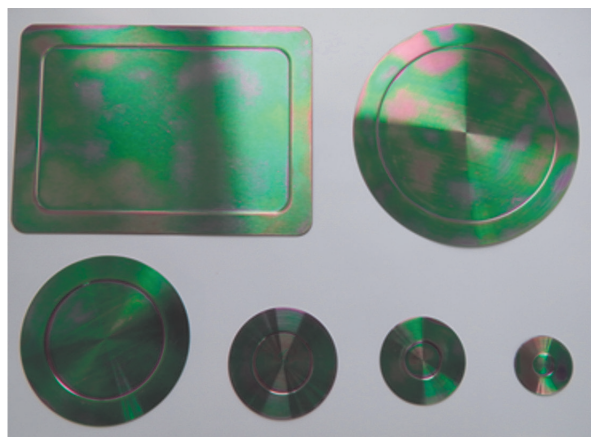
для испытаний, поверки, калибровки приборов, нельзя назвать широкой даже с большой натяжкой. К этим источникам относятся:

- источники альфа-излучения закрытые с радионуклидом плутоний-239;
- источники бета-излучения закрытые с радионуклидами стронций-90+иттрий-90 (регистрационные номера в федеральном информационном фонде: 61304-15, 61305-15, соответственно).

В зависимости от площади активной части, источники делятся на типы, представленные в табл.1, внешний вид источников представлен на рис.1.

Серийно выпускаемых радиометрических источников большой площади, но другой формы, как и источников с другими альфа-бета-излучающими радионуклидами, как средств измерений утвержденного типа на сегодняшний день нет. Следует отметить, что в этой статье не идет речь о спектрометрических источниках альфа-бета-излучения, таких как ОСАИ, ОРИБИ, ОСИКЭ и т. д., имеющих другую область применения.

ПО «Маяк» выпускает также источники большой площади в идентичном П9 конструктиве с радионуклидами U-234, U-238, но эти источники не проходили процедуру испытаний с целью утверждения типа, и для применения в сфере государственного регулирования в области обеспечения единства измерений в соответствии со статьей 9 Федерального закона «Об обеспечении единства измере-



**Рис.1.** Источники типов П9 и СО.

ний» от 26.06.2008 N 102-ФЗ должны быть утверждены как тип СИ.

Существует и другой вариант применения источников или приборов неутвержденного типа в сфере государственного регулирования. Согласно постановлениям правительства РФ от 23 сентября 2010 г. N 734 «Об эталонах единиц величин, используемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений» и от 21 октября 2019 г. N 1355 «О внесении изменений в Положение об эталонах единиц величин, используемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений» источники или приборы могут быть аттестованы в качестве эталонов в соответствии с государственной поверочной схемой.

Аттестация эталонов выполняется в соответствии с приказом Минпромторга N 456 от 11.02.2020 г. «Об утверждении требований к содержанию и построению государственных поверочных схем и локальных поверочных схем, в том числе к их разработке, утверждению и изменению, требований к оформлению материалов первичной аттестации и периодической аттестации эталонов единиц величин, используемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, формы свидетельства об аттестации эталона единицы величины, требований к оформлению правил содержания и применения эталона единицы величины, формы извещения о непригодности эталона единицы величины к его применению».

### Обоснование необходимости расширения номенклатуры источников

В табл.2 и 3 представлены перечни радионуклидов в плоских радиометрических источниках большой площади российских и зарубежных производителей, а также приведены ядерно-физические данные [3], относящиеся к испускаемым при распаде ядра заряженным частицам, для альфа-распада указаны энергии альфа-частиц, для бета-распада указаны максимальные и средние энергии электронов. Для зарубежных источников радионуклиды указаны в соответствии с ISO 8769:2016 *Reference sources – Calibration of surface contamination monitors – Alpha-, beta- and photon emitters*.

**Табл.2.** Перечень радионуклидов в источниках российских производителей.

| Российские производители  |  |             |                  |   |
|---|--|-------------|------------------|---|
| Тип источников/<br>площадь активной<br>поверхности, см <sup>2</sup> | Размер активной<br>поверхности источника, мм   | Радионуклид | Тип<br>распада   | Энергия, кэВ/<br>вероятность испускания на<br>100 распадов                      |
| 1П9-6П9/(от 1 до 160)   | Диаметр:<br>12 (1П9, 1У4, 1У8, 1СО);<br>22 (2П9, 2У4, 2У8, 2СО);<br>36 (3П9, 3У4, 3У8, 3СО);<br>71 (4П9, 4У4, 4У8, 4СО);<br>113 (5П9, 5У4, 5У8, 5СО) | Pu-239      | Альфа-<br>распад | 5105,81(21)/11,87(3)<br>5143,82(21)/17,14(4)<br>5156,59(14)/70,79(10)           |
| 1У4-6У4/(от 1 до 160)<br>(не утвержден тип)                         |  | U-234       |                  | 4722,4(7)/28,42(2)<br>4774,6(7)/71,37(2)  |
| 1У8-6У8/(от 1 до 160)<br>(не утвержден тип)                         |  | U-238       |                  | 4151(5)/22,33(50)<br>4198(3)/77,54(50)  |
| 1СО-6СО/(от 1 до 160)   | Длина × ширина:<br>155×105 (6П9, 6У4, 6У8, 6СО)  | Sr-90+Y-90  | Бета-<br>распад  | max: 545,9(14)/100<br>avg: 196(1)<br>max: 2278,7(16)/99,983(7)<br>avg: 926,7(8) |

**Табл.3.** Перечень радионуклидов в источниках зарубежных производителей.

| Зарубежные изготовители:<br>ISO 8769:2020 Measurement of radioactivity – Alpha-, beta- and photon emitting radionuclides – Reference measurement standard specifications for the calibration of surface contamination monitors – действующий стандарт (ISO 8769:2016 Reference sources – Calibration of surface contamination monitors – Alpha-, beta- and photon emitters) – действовал до 2020 г. |                                     |  |
|---|-------------------------------------|--|
| Размер активной поверхности источника, мм   | Радионуклид                         | Энергия, кэВ/вероятность испускания на 100 распадов  |
| 100×100<br>100×150<br>100×200   | Альфа-распад                        |  |
|   | Am-241                              | 5442,86(12)/13,23(10)<br>5485,56(12)/84,45(10)   |
|   | Th-230                              | 5456,3(2)/28,85(6)<br>5499,03(20)/71,04(6)   |
|   | Альтернативные варианты             |  |
|   | Pu-238                              | 5456,3(2)/28,85(6)<br>5499,03(20)/71,04 (6)  |
|   | Бета-распад                         |  |
|   | C-14                                | max: 156,476(4)/100; avg: 49,16(1)   |
|   | Tc-99                               | max: 293,8(14)/99,99855(30); avg: 94,6(17)   |
|   | Cl-36                               | max: 709,53(5)/98,1(1); avg: 316(16)   |
|   | Sr-90+Y-90                          | max: 545,9(14)/100; avg: 196(1)<br>max: 2278,7(16)/99,983(7); avg: 926,7(8)  |
|   | Ru-106+Rh-106                       | max: 39,40(21)/100; avg: 10,03(6)<br>max: 2412(5)/9,82(15); avg: 978,9(2)<br>max: 3034(5)/8,2(3); avg: 1269,5(24)<br>max: 3546(5)/78,80(24); avg: 1511,1(24) |
|   | Альтернативные варианты             |  |
|   | Pm-147                              | max: 224,1 (3)/99,99456(13); avg: 61,8(1)  |
|   | Tl-204                              | max: 763,7(2)/97,08(13); avg: 243,9(1)   |
|   | Co-60                               | max: 317,32(21)/99,88(3); avg: 95,6(1)   |
|   | H-3*                                | max: 18,591(1)/100; avg: 5,68(1)   |
| Ni-63   | max: 66,980(15)/100; avg: 17,434(4) |  |

\* Перечень радионуклидов в таблице приведен в строгом соответствии с ISO 8769:2016, конструктив и область применения источников трития авторам неизвестны.

Как видно из табл. 2 и 3, источники отличаются перечнем радионуклидов, формой и размерами, но помимо этого существуют еще и конструктивные особенности, обусловленные технологией изготовления. Все перечисленные факторы влияют на определение метрологических характеристик приборов с помощью этих источников.

Рассмотрим самый простой пример. Производитель дает характеристики прибора, определенные по источнику Cl-36 или по источнику C-14. Найти способ проверить эти характеристики, имея в распоряжении только источник Sr-90+Y-90, вряд ли получится. Результаты измерений даже конструктивно одинаковых источников

C-14 и Sr-90+Y-90 на одном и том же приборе будут абсолютно разными в силу самой природы радиоактивного распада. Электроны, испускаемые при бета-распаде, имеют непрерывный спектр, разница в максимальных энергиях для C-14 и Y-90 составляет больше 2000 кэВ, а отклик любой детектирующей электроны системы имеет столь сильную

зависимость от энергии, что разница даже в 50 кэВ порой может быть критической.

Не столь катастрофична ситуация с точки зрения использования источников с разными альфа-излучающими нуклидами, так как энергии альфа-частиц, испускаемых практически при всех известных ядерных распадах, находятся в узком энергетическом диапазоне, в основном, от 4 МэВ до 6 МэВ. Эффективность регистрации альфа-частиц детектором при прочих равных условиях, т. е. одинаковой конструкции источников и геометрии источник–детектор, будет одной и той же для любой энергии от 4 МэВ до 6 МэВ.

При использовании же источников с одинаковыми радионуклидами, как альфа-, так и бета-излучающими, необходимо учесть влияние конструкции и размеров источников на измеряемые характеристики приборов.

Таким образом, сравнение эффективностей (чувствительностей) приборов по источникам с одним и тем же радионуклидом, но разных размеров и конструкции, так же как и одинаковых размеров и конструкции, но с разными радионуклидами, нельзя считать корректными. Решением этих проблем может стать серийное производство источников боль-

шой площади в соответствии с системой международных стандартов ISO.

Унификация применяемых источников позволит выполнять калибровку, оценку и сравнение характеристик однотипных приборов независимо от страны-изготовителя.

### **Особенности измерений метрологических характеристик плоских радиометрических источников большой площади**

Одна из основных задач обеспечения единства измерений заключается в создании и поддержке структуры прослеживания измеряемых физических величин к национальным эталонам путем четко определенной цепочки с использованием конкретных способов и методов. В частности, любая рутинная калибровка мониторов загрязнения должна выполняться с применением источников, метрологические характеристики которых по регламентированной жесткой схеме связаны с национальным первичным эталоном, обеспечивающим воспроизведение, хранение и передачу потока заряженных частиц и активности альфа-бета-излучающих радионуклидов. В РФ это Государственный первичный эталон единиц активности радионуклидов, удельной активности радионуклидов,

потока альфа-, бета-частиц и фотонов радионуклидных источников ГЭТ 6-2016 [4] (ГЭТ 6-95 до 2016 г.).

Подтверждение измерительных и калибровочных возможностей национальных эталонов осуществляется путем проведения международных сличений под эгидой Международного бюро мер и весов – МБМВ (*Bureau International des Poids et Mesures – BIPM*) [5]. Участие в международных сличениях является гарантией эквивалентности национальных эталонов, необходимой для обеспечения достоверности, точности и единства измерений согласно международной метрической конвенции, подписанной 17 странами, включая Россию, 20 мая 1875 г. в Париже. На сегодняшний день число стран, присоединившихся к конвенции, существенно увеличилось [6].

В 2009 г. МБМВ были организованы международные сличения по измерению характеристик плоских радиометрических источников альфа-бета-излучающих радионуклидов с участием 23 стран, что говорит о значимости проблемы измерений таких источников в целях обеспечения радиационной безопасности. Для сличений все участники поочередно получали один и тот же комплект источников, соответствующих



ISO 8769, с радионуклидами Am-241, C-14, Pm-147 и Sr-90, размеры активной поверхности каждого источника составляли 100×100 мм.

Задача сличений – определение потока заряженных частиц в  $2\pi$  ср для каждого источника, в качестве дополнительных, но не обязательных заданий – определение равномерности радиоактивного вещества по поверхности для источника Sr-90 и определение активности радионуклида в каждом источнике. Сличения проводились в течение нескольких лет, комплект источников путешествовал по всему миру с остановками для измерений в странах-участниках сличений. Если измерение потока в  $2\pi$  ср не вызвало затруднений у участников, и практически все результаты согласовались в пределах указанных неопределенностей, то результаты активности в источниках смогли представить только 3 национальных метрологических института, равномерность не определили больше половины участников. ВНИИМ также принимал участие в этих сличениях с представлением в качестве результата одной характеристики – потока в  $2\pi$  ср с неопределенностью ( $k = 2$ ) порядка 1%.

Обратимся к причинам и объяснению особенностей измерений плоских источников

для лучшего понимания проблем и поиска их решения.

Основными измеряемыми физическими величинами и, соответственно, метрологическими характеристиками плоских радиометрических источников альфа-, бета-излучающих радионуклидов являются поток альфа/бета-заряженных частиц в  $2\pi$  ср и активность радионуклида в источнике с соответствующими показателями точности.

Для измерений потока альфа-, бета-частиц в  $2\pi$  ср от плоских источников применяются широко распространенные безоконные пропорциональные счетчики, сконструированные таким образом, чтобы активная поверхность источника полностью находилась внутри рабочего объема счетчика для обеспечения  $2\pi$ -геометрии измерений или, другими словами, для обеспечения регистрации каждой попадающей в рабочий объем счетчика заряженной частицы. В такой конфигурации источник закрепляется на проводящей подставке внутри счетчика, проводящая подставка выступает в роли катода, при этом подложка источника также должна быть выполнена из проводящего материала для устранения искажений электрических полей внутри рабочей области счетчика при подаче напряжения на электроды.

Именно таким способом измеряется поток частиц абсолютным методом на установках национальных эталонов практически всех стран, в том числе ГЭТ 6-2016. Абсолютные методы применяются для измерений с самой высокой точностью и реализуются на установках национальных первичных эталонов. Универсальных методов измерений, подходящих для любого радионуклида, не существует, для того чтобы охватить как можно большую область радиоактивных ядер и добиться высокой точности измерений, методы и установки разрабатываются с учетом особенностей однотипных схем распада. Так, на сегодняшний день в состав ГЭТ 6-2016 входит 7 установок, каждая из которых предназначена для определенных видов измерений [7].

В отличие от измерения потока заряженных частиц, определение активности радионуклида в источнике – весьма нетривиальная задача.

В идеальном случае бесконечно тонкого плоского источника на прозрачной или, наоборот, абсолютно поглощающей подложке («черная дыра» для частиц) активность есть поток в  $2\pi$  ср, умноженный на коэффициент  $k = 2$ , т. к. при каждом распаде испускается одна заряженная частица,

заряженные частицы вылетают из источника с равной вероятностью в любом направлении в телесный угол  $4\pi$  *ср* и каждая вылетевшая в  $2\pi$  *ср* частица регистрируется ( $2\pi$ -геометрия измерений). Умножая на 2 число зарегистрированных в  $2\pi$  *ср* частиц, получаем число вылетевших в  $4\pi$  *ср* частиц, равное числу ядерных распадов, т. е. активности радионуклида в источнике.

Но это идеальный случай, а реальность в физике и метрологии, как и в любой области, будь то наука или искусство, далека от идеала. Прежде всего, источники имеют определенную толщину за счет защитного покрытия и нанесенного на подложку радиоактивного вещества. Толщина является критическим параметром для всех альфа-частиц и для низкоэнергетических электронов в силу их малого пробега в веществе и высокой вероятности поглощения в активном слое источника. Особенно существенны потери электронов в слое самого источника для радионуклидов с максимальной энергией электронов менее 160 кэВ (С-14), так как чем меньше максимальная энергия бета-распада, тем большая доля электронов не имеет шансов вылететь с поверхности источника, если толщина превышает

максимально допустимую. Каждая потерянная, т. е. незарегистрированная по этой причине частица приведет к неучтенным потерям в активности, именно поэтому толщина защитного покрытия и нанесенного радиоактивного вещества строго регламентируется в международных стандартах.

Далее, для реализации  $2\pi$ -геометрии измерений в счетчике источник должен быть абсолютно плоским, это означает, что активная поверхность источника должна находиться строго в плоскости подложки, иначе, как в случае с источниками типа П9, имеющими конструктивные углубления для активной поверхности, появятся неучтенные потери потока альфа-частиц.

И последнее, в идеале подложка должна быть абсолютно прозрачной или «черной дырой» для частиц – это необходимо исключительно для электронов из-за высокого вклада в поток в  $2\pi$  *ср* электронов обратного рассеяния. В реальности же подложка изготавливается из металла для обеспечения проводимости в счетчике, поэтому устранить или точно учесть вклад обратнорассеянных электронов практически невозможно. Для альфа-частиц вкладом от обратного рассеяния можно пренебречь.

Учитывая вышеперечисленные факторы, отличающие реальный источник от идеального, становится ясно, что для определения активности по измеренному значению потока в  $2\pi$  необходим коэффициент перехода, не просто равный 2, а учитывающий поправки на поглощение в активном слое источника, отклонение от  $2\pi$ -геометрии и обратное рассеяние.

Итак, для определения активности в источнике остаются два варианта: расчет коэффициента или измерение активности независимым способом. Теоретический расчет коэффициента сложен и не гарантирует высокой точности без сопоставления с экспериментальными результатами, поэтому второй вариант выглядит предпочтительней.

Независимый и очень точный способ определения активности радионуклида в источнике существует, но только на стадии изготовления источника. Это внесение в источник без потерь строго определенного количества эталонного раствора с известной удельной активностью. В этом случае активность определяется как произведение удельной активности на массу внесенного эталонного раствора, и погрешность активности будет зависеть в основном от погрешности эталонного раствора и



погрешности взвешивания, т. е. определения массы вносимого раствора.

Именно таким способом была определена активность источников типа СО еще в 60-е гг. прошлого века в лаборатории активности ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. Этот способ напрямую зависит от конструкции источников и возможности воспроизведения технологии изготовления в лабораторных условиях. Источники типа СО – это равномерно пропитанная радиоактивным раствором фильтровальная бумага, закрепленная на подложке и закрытая сверху металлической фольгой. Изготовление таких источников в лабораторных условиях не представляло особой проблемы, что и обеспечило появление нескольких наборов высокоточных (погрешность активности ~ 1% ( $P = 0,95$ )) источников типов 1СО-6СО с высокой степенью равномерности распределения радиоактивного раствора по рабочей поверхности.

Тогда же был получен экспериментальный коэффициент перехода от потока к активности для источников с активностью от 10 Бк до  $3 \cdot 10^4$  Бк. Коэффициент получен делением внесенной эталонной активности раствора на поток, измеренный на эталонной установке с боль-

шим  $2\pi$ -счетчиком. Ограничение по активности для экспериментального определения коэффициента связано с «мертвым временем» счетчика.

Так как возможность измерения потока для источников типа СО с активностью выше  $3 \cdot 10^4$  Бк в пропорциональном счетчике большой площади ограничена «мертвым временем» счетчика, то поток в этом диапазоне определяется пересчетом измеренной активности с использованием установленного коэффициента, распространенного на активность до  $10^7$  Бк по технологии изготовления. Активность измеряется на специально разработанном для этой цели компараторе из состава государственного первичного эталона и идентичного эталонного источника (эталона сравнения).

Подводя итог вышесказанному по поводу измерений источников типа СО, можно сделать следующие выводы:

- прямые измерения потока в  $2\pi$  *ср* выполняются с помощью беззаконных пропорциональных счетчиков, диапазон измерений – от  $5 \text{ с}^{-1}$  до  $3 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$  с неопределенностью ( $k = 2$ ) от 1%;
- поток в  $2\pi$  *ср* в диапазоне от  $3 \cdot 10^4$  Бк до  $10^8$  Бк определяется с помощью коэффициента перехода от измеренной на компараторе

активности, неопределенность ( $k = 2$ ) от 3%;

- прямых точных методов измерения активности в источниках типа СО пока не существует, активность в диапазоне от 10 Бк до  $8 \cdot 10^4$  Бк определяется с помощью коэффициента перехода от измеренного потока в  $2\pi$  *ср*, неопределенность от 3%;
- активность от  $8 \cdot 10^4$  Бк для источников СО измеряется на компараторе с помощью эталона сравнения, неопределенность ( $k = 2$ ) от 2%.

Рекомендуемый коэффициент перехода для источников типа СО любых размеров в диапазоне от 10 Бк до  $10^8$  Бк составляет  $(2,65 \pm 0,03) \text{ (част/с) / Бк}$ .

Ситуация с источниками типа П9 совершенно другая, воспроизвести в лабораторных условиях такой источник не представляется возможным из-за сложности технологического процесса, но опять же, благодаря многочисленным научно-исследовательским разработкам, в 60-е гг. была создана уникальная установка для измерений активности альфа-излучающих радионуклидов в плоских источниках большой площади в диапазоне от  $3 \cdot 10^3$  Бк до  $10^8$  Бк.

Метод измерений, реализованный в установке, основан на регистрации альфа-частиц

в точно определенном телесном угле. В качестве детектора был использован ZnS, имеющий эффективность 99,99% регистрации альфа-частиц любой энергии, со временем ZnS был заменен на полупроводниковый детектор типа PIPS, но конструктив остался прежним.

Наличие двух позиций для размещения источников на расстояниях 100 и 300 мм от поверхности детектора в комбинации с набором диафрагм разного диаметра позволяет варьировать значения телесного угла в диапазоне от  $2 \cdot 10^{-2}$  до  $10^{-7}$  ср.

Расчет телесного угла для круглых источников и круглой диафрагмы, прямоугольного источника и круглой диафрагмы выполняется в соответствии с работами [8] и [9]. Следует отметить, что применение метода определенного телесного угла для измерений активности с высокой точностью возможно только в случае равномерного распределения радиоактивного вещества по рабочей поверхности источника.

Коэффициенты перехода от потока к активности определены для всех типов альфа-излучающих источников, которые можно измерить в пропорциональном счетчике и в установке с определенным телесным углом, диапазон активности таких источни-

ков от  $3 \cdot 10^3$  Бк до  $5 \cdot 10^4$  Бк, коэффициенты распространены на весь диапазон активностей, принимая во внимание одинаковую технологию изготовления. Уточнение коэффициентов выполняется регулярно в процессе поверки или калибровки подходящих источников.

Рекомендуемые коэффициенты перехода от потока альфа-частиц в  $2\pi$  ср к активности источника приведены в табл.4.

Основной вклад в погрешность коэффициента перехода вносят неравномерность радиоактивного вещества по рабочей поверхности источника и нарушение  $2\pi$ -геометрии, вызванное конструкцией источников. Если для источников с площадью до  $10 \text{ см}^2$  большой вклад дает нарушение геометрии, то для источников с большей площадью основное влияние оказывает неравномерность. Погрешности коэффициентов указаны для доверительной вероятности  $P=0,95$ .

Измерительные возможности потоков альфа-бета-

частиц от плоских источников большой площади с точностью порядка 1% на установках ГЭТ 6-2016 подтверждены результатами международных сличений [10] в 2013 г.

#### Равномерность распределения активности по площади источника

Влияние равномерности распределения радиоактивного вещества по площади источников на калибровку/поверку приборов необходимо учитывать в двух случаях:

- площадь входного окна детектора калибруемого прибора меньше площади активной поверхности источника;
- прибор калибруется в единицах поверхностной плотности, Бк/см<sup>2</sup> или (част/с)/см<sup>2</sup>.

Следует отметить, что высокая степень неравномерности также может служить причиной неправильных результатов при передаче единиц потока и активности источников методом компаратора. В связи с этим,

**Табл.4.** Коэффициенты перехода от потока альфа-частиц в  $2\pi$  ср к активности.

| Тип источника | Коэффициент перехода, Бк/(част/с) |
|---------------|-----------------------------------|
| 1П9           | 2,22±0,04                         |
| 2П9           | 2,14±0,04                         |
| 3П9           | 2,09±0,04                         |
| 4П9           | 2,09±0,04                         |
| 5П9           | 2,06±0,04                         |
| 6П9           | 2,11±0,04                         |

необходимо уделять должное внимание детектирующей системе компаратора, в частности, площадь входного окна детектора не должна быть меньше активной поверхности источников, при использовании диафрагм для источников с высокой активностью необходимо обеспечить равномерное измерение выделяемых зон по всей активной поверхности источника.

Равномерность источников типов П9 и СО не указана в перечне метрологических характеристик источников, тем не менее, это важная характеристика, необходимая как для правильной калибровки (поверки) приборов, так и для корректного определения коэффициентов перехода от потока к активности для источников с альфа-излучающими радионуклидами. В стандарте ISO 8769:2016 регламентированная равномерность составляет не менее 90% для источников площадью до 200 см<sup>2</sup>.

Для проверки равномерности источников также очень актуальна на сегодняшний день разработка специальных приборов, как автоматических сканеров поверхности источника, так и современных устройств на основе цифровой автордиографии.

### Оценка точности результатов измерений

Еще один вопрос, который трудно не затронуть в статье, посвященной согласованности стандартов, касается одного из самых важных аспектов метрологии и, как следствие, обеспечения единства измерений, а именно, оценки показателей точности.

Рекомендованные показатели точности указаны в документе «Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. РМГ 29-2013»: «Результат измерения может быть представлен **измеренным значением величины** с указанием соответствующего показателя точности. К показателям точности относятся, например, **среднее квадратическое отклонение, доверительные границы погрешности, стандартная неопределенность измерений, суммарная стандартная и расширенная неопределенности**».

Расчет неопределенности выполняется в соответствии с ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 «Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности из-

мерения. *Uncertainty of measurement. Part 3. Guide to the expression of uncertainty in measurement*». Это универсальный международный стандарт, согласно которому выполняется оценка неопределенности результатов любых видов измерений во всех странах, являющийся по сути основой для международного сопоставления результатов измерений.

Расчет погрешности для многократных измерений выполняется в соответствии с ГОСТ 8.736-2011 «Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения».

Итак, на сегодняшний день существуют два государственных стандарта для оценки показателей точности результатов измерений. Другими словами, один и тот же результат может быть приведен с неопределенностью и с погрешностью, и это не просто терминология, методы оценки погрешности и неопределенности разные. Переход на единую систему оценки точности в виде неопределенности позволил бы избавиться от ныне существующей «двойной бухгалтерии» в метрологии, в том числе

прояснить сопоставление результатов измерений при испытаниях зарубежных СИ с целью утверждения типа.

Но это в перспективе, на сегодняшний день по-прежнему весьма актуальным остается вопрос, интересующий многих специалистов, – какие именно показатели точности необходимо указывать, почему и в каких случаях.

### Заключение

Выполнен обзор ряда проблем, возникающих при испытаниях, калибровке и применении радиометров загрязненности из-за несо-

гласованности российских и международных стандартов. Представлены основные методы определения метрологических характеристик плоских источников альфа-бета-излучающих радионуклидов и перечень радионуклидов для возможного расширения номенклатуры источников. Приведены рекомендуемые коэффициенты перехода от потока к активности для источников типов П9 и СО. Отмечены проблемы при исследовании потенциальных источников нового типа, которые требуют особого внимания: методы определения активности

радионуклидов в источниках, требования к равномерности и способы проверки. Затронуты вопросы оценки показателей точности измерений.

Для подведения итогов всего вышесказанного приглашаем к диалогу и сотрудничеству заинтересованных специалистов, представителей организаций и компаний в области атомной промышленности, ядерного приборостроения, метрологического обеспечения проектов по радиационным измерениям. Контактное лицо – Татьяна Шильникова, shti@vniim.ru.

### Литература

1. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии N 2841 от 29 декабря 2018 г.
2. Гаврилов Б.М. Нурлыбаев К., Мартынюк Ю.Н. Решение семинара ГК «Росатом» по радиационной безопасности о международных стандартах // АНРИ. 2018. N 4(95). С. 82-90.
3. <http://www.lnhb.fr/nuclear-data/nuclear-data-table/> (дата обращения 01.06.2021).
4. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии N 2091 от 30 декабря 2016 г.
5. <http://www.bipm.org/en/about-us/> (дата обращения 01.06.2021).
6. <https://www.bipm.org/en/member-states> (дата обращения 01.06.2021).
7. Алексеев И.В., Заневский А.В., Жуков Г.В., Моисеев Н.Н., Сэпман С.В., Терещенко Е.Е., Трофимчук С.Г., Харитонов И.А., Шильникова Т.И. Государственный первичный эталон единиц активности радионуклидов, удельной активности радионуклидов, потока альфа-, бета-частиц и фотонов радионуклидных источников ГЭТ 6-2016 // Измерительная техника. 2019. N 8. С. 3-7.
8. Петржак К.А., Бак М.А. Определение доли излучения, падающей на круглую мишень от круглого источника // Журнал технической физики. 1955. Том XXV, вып.4. С. 636-643.
9. Шелюто В.А. Геометрический фактор и точные решения в системах с цилиндрической симметрией // Журнал технической физики. 1989. N 7. С. 198-201.
10. CCRI Supplementary Comparison CCRI(II)-S10 LASCE.

## Prospects for Range Extension of Large Area Sources with Alpha/Beta-Emitting Radionuclides, Precision Factors

Shilnikova Tatyana, Alexeev Ilya, Arshansky Sergey, Zhukov Grigoriy, Zanevsky Andrey,  
Moiseev Nikolay, Osokina Anna, Sepman Sergey, Tereshchenko Evgeny  
(D.I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM), St.Peterburg, Russia)

**Abstract:** The article deals with the problems of testing, calibration and application concerning foreign radiation protection instruments due to mismatch of regulatory requirements in Russian and international standards. In particular, there isn't unified nomenclature of radiometric sources. Promising directions for range extension of large area sources are presented. Some precision factors are discussed.

**Key words:** state system for ensuring the uniformity of measurements, instrument testing, large area sources, emission rate of beta and alpha particles in  $2\pi$  sr solid angle, source uniformity, measurements uncertainty.

Т.И.Шильникова (н.с.), И.В.Алексеев (к.ф.-м.н., рук.лаб.), С.М.Аршанский (рук.сект.),  
Г.В.Жуков (асп., н.с.), А.В.Заневский (н.с.), Н.Н.Моисеев (рук.лаб.), А.А.Осокина (н.с.),  
С.В.Сэпман (с.н.с.), Е.Е.Терещенко (н.с.) – ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург.

Контакты: тел. +7 (812) 323-96-12; e-mail: shti@vniim.ru.