
**ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРИБОРЫ, МОДЕЛИ
И МЕТОДЫ АНАЛИЗА**

УДК 504.064.3; 502: 621.039

© В. И. Тарханов, В. В. Петухов, А. В. Храмов

**ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ
В УЧЕТЕ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ
И РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

В статье рассмотрены основные особенности применения контрольно-измерительной аппаратуры в системах учета ядерных материалов, радиоактивных веществ и радиоактивных отходов. Показана необходимость развития базы средств измерения в сторону повышения автоматизации измерений, компьютеризации обработки данных и контроля качества измерений.

ВВЕДЕНИЕ

Контрольно-измерительное оборудование в целом играет важную роль в учете и контроле веществ, испускающих ионизирующее излучение. Эти вещества в нормативных документах [1, 2, 3] подразделяются на ядерные материалы, радиоактивные вещества и радиоактивные отходы. Характер применения контрольно-измерительного оборудования зависит как от вида излучения измеряемого вещества, так и от самого объекта измерения. Приборы, измеряющие общий радиоактивный фон, уровни радиации и индивидуальную дозу облучения, относятся к системе защиты персонала и не входят в автоматизированную систему учета и контроля.

Важнейшими элементами обеспечения ядерной и радиационной безопасности государства являются современные автоматизированные системы учета и контроля. В настоящее время в России создается система учета и контроля ядерных материалов как составная часть международной системы защиты от несанкционированного распространения ядерного оружия в страны, которые им еще не обладают, и от попадания его в руки субнациональных групп (например, террористов) во избежание национальной или всемирной ядерной катастрофы.

Государственная система учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов должна предотвратить возможные потери, хищения, несанкционированное использование радиоактивных веществ и радиоактивных отходов, обеспечить информационную поддержку принятия государственных, ведомственных и региональных управленческих решений по безопасному обращению с радиоактивными веществами и радиоактивными отходами и тем самым содействовать снижению вероятности возникновения экологических катастроф и радиологического риска для

населения, препятствовать радиоэкологическому терроризму, что особенно актуально в настоящее время.

**ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОАКТИВНЫХ
ВЕЩЕСТВ И РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

Все виды учитываемых объектов характеризуются одним набором параметров: массой, объемом и активностью испускаемого излучения. Последняя характеристика является наиболее важной.

Наиболее простая ситуация складывается с учетом радиоактивных веществ — источников ионизирующего излучения, которые находятся в составе приборов. Характеристики ионизирующего излучения данных источников принимаются равными заводским показателям. Необходимость измерения активности этих источников возникает лишь в случае их списания в радиоактивные отходы при выработке ресурса.

Замеры удельной активности радиоактивных отходов, как жидких, так и твердых, в зависимости от вида излучений, наиболее часто осуществляются сцинтилляционными и полупроводниковыми приборами. Их использование для уточнения активности предполагает проведение спектрального анализа, что требует значительных временных затрат. Это является тормозом для внедрения автоматизированной системы учета радиоактивных отходов, т. к. не позволяет вести on-line регистрацию удельной или общей активности.

До сих пор считалось, что радиоактивные отходы потенциально более опасны для окружающей среды, чем для человечества, и, в целом, значительно менее опасны по сравнению с ядерными материалами, из которых может быть создано ядерное оружие. Однако рост терроризма в мировом масштабе, возможности создания "грязного" оружия для проведения террористических атак

требуют строгого и оперативного учета всех радиоактивных отходов.

Измерение активности вещества, у которого излучение представляет собой поток заряженных частиц, достаточно апробировано, хотя и занимает длительное время. По характеру регистрации взаимодействия частиц с датчиком различают интегральные и дифференциальные методы измерений. В настоящее время дифференциальные методы практически вытеснили более простые, но менее информативные интегральные методы, хотя последние еще находят применение в ряде специальных случаев.

Абсолютными называются измерения, позволяющие непосредственно определить истинную активность источника по числу распадов в секунду. Известно, что число регистрируемых установкой частиц оказывается, как правило, отличающимся от активности источника. Коэффициент пропорциональности между этими величинами часто называют эффективностью измерительной установки. Этот коэффициент зависит от целого ряда факторов: свойств детектора, геометрии установки, толщины источника и других параметров. В общем случае коэффициент можно представить соотношением

$$\varepsilon = \varepsilon_d G f_1 f_2 \dots f_n, \quad (1)$$

где

ε — эффективность измерительной установки;
 ε_d — эффективность детектора;
 G — геометрический фактор;
 f_1, f_2, \dots, f_n — коэффициенты, учитывающие другие факторы.

Если значение эффективности установки известно, то по зарегистрированному в единицу времени числу частиц a можно легко найти истинную активность A источника:

$$A = \frac{a}{\varepsilon}. \quad (2)$$

Так как трудно точно оценить величину ε , то часто прибегают к относительным измерениям, при которых активность неизвестного препарата A_x сравнивается с известной активностью эталонного источника A_3 . Тогда интересующая нас величина активности определится соотношением

$$A_x = A_3 \frac{a_x}{a_3}, \quad (3)$$

где a_x и a_3 — величины, непосредственно определяемые в ходе опыта.

В выражении (3) предполагается, что эффективность измерительной установки постоянна. На практике это не всегда выполняется и даже при относительных измерениях необходимо иметь оп-

ределенную информацию о зависимости детекторов от энергии излучения, свойств используемых источников и других факторов для введения соответствующих поправок. Для оценки интенсивности излучения необходимо знать его энергетический спектр. В этих целях широко используются спектрометрические методы, в которых непосредственно измеренный амплитудный спектр преобразуется в энергетический. Амплитудный и энергетический спектры связаны известным интегральным уравнением

$$N(V) = \int \Phi(E)G(E, V)dE, \quad (4)$$

где

$N(V)$ — измеренный амплитудный спектр импульсов;

$\Phi(E)$ — энергетический спектр;

$G(E, V)$ — функция отклика (характеристика детектора).

Решение уравнения (4) обычно находят численными методами, т. к. функции $N(V)$ и $\Phi(E)$ не удается представить в аналитическом виде. Поэтому интегральное уравнение (4) заменяют системой линейных алгебраических уравнений

$$N_i = \sum_{j=1}^n \Phi_j G_{ij}, \quad (5)$$

где N_i , Φ_j и G_{ij} — средние значения функций $N(V)$, $\Phi(E)$ и $G(E, V)$ в выбранных интервалах усреднения.

Система линейных алгебраических уравнений (5) не позволяет использовать обычные методы решений, т. к. является плохо обусловленной. Для задач определения энергетического спектра разработаны специальные методы решения уравнения (5). Широко используются методы, учитывающие гладкость функции $\Phi(E)$. Тогда ищется решение, обладающее наибольшей гладкостью и имеющее наименьшее среднеквадратичное отклонение:

$$\sum_i \left(N_i - \sum_j \Phi_j G_{ij} \right)^2 \leq \delta, \quad (6)$$

где δ — числовой параметр, обуславливающий выбор гладких функций.

В ряде случаев удается получить достаточно устойчивые решения, использующие особенности функции отклика.

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Учет ядерных материалов сопровождается измерениями на протяжении всего жизненного цикла изделия, изготовленного с применением данных ядерных материалов. Порядок использования контрольно-измерительного оборудования регла-

ментирован многочисленными нормативными актами, которые соответствуют требованиям международных контролирующих организаций, таких как МАГАТЭ, Евроатом и др. Применяются методы разрушающего и неразрушающего анализов. Основным является метод разрушающего анализа, т. к. он более точен и информативен. Методы неразрушающего анализа применяются для экспресс-анализа при инспекциях ядерных материалов.

Наиболее точным, арбитражным является гравиметрический метод разрушающего анализа ядерных материалов. Он позволяет определить массу чистого вещества известного состава (уран, плутоний, окислы урана и плутония), содержащегося в ядерном материале. Гравиметрический метод связан со сложными физико-химическими операциями (растворение, осаждение, фильтрация, прокаливание, взвешивание). Для взвешивания применяются как электронные, так и рычажные аналитические весы с весовыми эталонами высокого уровня аттестации.

Группа титриметрических методов также связана с физико-химической обработкой проб. В последнее время активно развиваются фотометрические, фотоколориметрические и спектрофотометрические методы, позволяющие проводить замеры на образцах с высокой радиоактивностью. Высокая точность и надежность методов разрушающего контроля компенсируется длительностью процесса измерения (часы), что делает их пригодными для применения только в заводских и лабораторных условиях при производстве изделий из ядерных материалов.

Методы неразрушающего анализа имеют более широкое применение не только при производстве ядерных материалов, но и при складировании, транспортировке, переработке отходов. Они также применяются для обеспечения гарантии безопасности в пределах ядерного объекта (проверка персонала и транспорта на наличие ядерного материала). Все методы основаны на регистрации ионизирующего излучения и потоков заряженных частиц с последующим спектральным анализом. Большинство методов обеспечивает высокую скорость измерений при приемлемой точности. Контрольно-измерительная аппаратура может быть портативной, например ручные сканеры для проверки персонала.

Методы неразрушающего анализа также широко применяются в измерении активности источников ионизирующего излучения (радиоактивных веществ) и радиоактивных отходов. Недостатком является недостаточная надежность метода, трудность определения источника погрешности (природные, механические, человеческие источники погрешности, источники образца).

ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗМЕРЕНИЙ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УЧЕТА И КОНТРОЛЯ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ И РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Отдельным важным направлением является область контроля за исправностью контрольно-измерительного оборудования. И методы разрушающего, и методы неразрушающего анализов для подтверждения достоверности измерений требуют наличия эталонных рабочих материалов, которые должны производиться в лабораториях (их должно быть в стране не менее двух) методами, которые не менее чем в 5 раз точнее общепринятых.

Термин "контроль качества измерений" заимствован из-за рубежа и до недавнего времени в России не применялся. По своему содержанию он означает то же самое, что российский термин "метрологическое обеспечение измерений", значение и содержание которого хорошо известно и однозначно связано с метрологией. Существенным отличием контроля качества измерений в зарубежном понимании от метрологического обеспечения является оперативность, присущая контролю качества измерений за рубежом. Высокий уровень автоматизации измерений в развитых зарубежных странах обеспечивает техническую возможность осуществлять калибровку измерительной аппаратуры буквально перед каждой измерительной процедурой. В этих условиях контроль качества измерений становится неотъемлемой частью собственно измерений, что обеспечивает их высокое качество.

В условиях России масштабы применения компьютеризованных средств измерений и соответственно автоматизация измерений и контроля качества пока что очень скромны, и осуществление оперативного контроля качества измерений в большинстве случаев технически невозможно. Поэтому в России основным способом контроля характеристик погрешности средств измерения остается периодический контроль (поверка, калибровка, аттестация), который проводится обычно 1 раз в год. Понятно, что в таких условиях качество измерений не может быть столь высоким, как при оперативном контроле.

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Отдельно следует остановиться на обработке результатов измерения. В учете ядерных материалов под результатом измерения понимается конечный результат, который получается в процессе обработки результатов наблюдений, полученных при осуществлении измерительных процедур. Единичную процедуру измерения, в котором по-

лучают численное значение измеряемой величины, принято называть наблюдением, а полученное значение — результатом наблюдения.

Каждая контролируемая характеристика ядерного материала измеряется многократно, и получаемые значения различны. В учете ядерных материалов анализ полученных таким образом данных называется статистическим анализом инвентаризационной разницы и основан на методах математической статистики. Применение анализа регламентировано специальными нормативными документами и основано на вычислении дисперсии измеренной величины. Уравнение баланса ядерных материалов принято записывать в виде:

$$ID = IB + R - S - IE, \quad (7)$$

где

- ID — расхождение в инвентарном количестве;
- IB — начальный инвентарный запас;
- R — полученный материал;
- S — отгруженный материал;
- IE — конечный инвентарный запас.

В случае идеального технологического процесса, когда нет потерь ядерных материалов и учетные единицы измеряются без погрешностей, $ID = 0$. В реальных условиях всегда присутствуют погрешности измерений, поэтому ID, как правило, не равно нулю, что может свидетельствовать либо о влиянии погрешности измерений, либо об аномалии в учете и контроле ядерных материалов. Таким образом, необходимо определить, является ли это расхождение значимым, т. е. неслучайным.

Данный анализ проводится при следующих предположениях.

1. Величина ID подчиняется нормальному закону распределения со средним значением, равным нулю, и дисперсией σ_{ID}^2 .

2. Доверительный интервал, в соответствии с нормативными документами, определяется следующим образом:

если $|ID| \leq U_{1-a/2} \sigma_{ID}$, то принимается решение о том, что аномалии в учете и контроле ядерных материалов нет;

если $|ID| > U_{1-a/2} \sigma_{ID}$, то принимается решение о том, что есть аномалия в учете и контроле ядерных материалов и необходимо провести анализ возможных причин.

Здесь $U_{1-a/2}$ — квантиль нормального распределения; $a = 0.01$ — в соответствии с действующими нормативными документами [4].

Таким образом, статистический анализ инвентаризационной разницы заключается в определении величины σ_{ID} , что представляет собой отдельную сложную задачу, использующую различные модели погрешности приборов, в частности аддитивную, мультипликативную и смешанную модели.

ВЫВОДЫ

1. В России до сих пор применяются ретроспективные методы анализа, позволяющие производить все вычисления вручную. Однако эти методы не рекомендованы международными наблюдающими организациями.

2. Необходимость создания современной системы учета и контроля ядерных материалов, радиоактивных веществ и радиоактивных отходов неразрывно связана с комплексной компьютеризацией обработки информации как деловой, так и технической.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 21.11.1995 № 170-ФЗ "Об использовании атомной энергии (с изменениями на 22 августа 2004 года)".
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 15.12.2000 № 962 "О порядке ведения государственного учета и контроля ядерных материалов".
3. Постановление Правительства Российской Федерации от 11.10.1997 № 1298 "Об утверждении правил организации системы государственного учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов (с изменениями на 1 февраля 2005 г.)".
4. ОСТ 95 10571-2002 "Система измерений для целей учета и контроля ядерных материалов. Основные положения". Минатом России, 2002.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (Тарханов В.И.)

ФГУП ЦНИИ ТС (Петухов В.В.)

ФГУП ЦНИИ КМ "Прометей" (Храмов А.В.)

Материал поступил в редакцию 12.01.2007.

TEST EQUIPMENT APPLICATION PROBLEMS IN TAKING STOCK OF NUCLEAR MATERIALS, RADIOACTIVE SUBSTANCES, AND RADIOACTIVE WASTE

V. I. Tarkhanov, V. V. Petukhov¹, A. V. Khramov²

Saint-Petersburg State Polytechnic University

¹*FSUE CRIST, Saint-Petersburg*

²*FSUE CRISM "Prometey", Saint-Petersburg*

The paper considers the main specific features of exploiting measuring equipment in taking stock of nuclear materials, radioactive substances, and radioactive waste. It has been shown that it is necessary to improve the measuring tools so as to raise the levels of measurement automation, computerization of data processing, and measurement quality control.