

Опыт применения Нововоронежской АЭС методики измерения активности, радионуклидного состава радиоактивных отходов в контейнерах типа НЗК с использованием программного средства «Satellite»

В статье приведен анализ результатов применения на Нововоронежской АЭС методики измерений с программным средством, предназначенных для определения активности радионуклидов в контейнере с радиоактивными отходами по результатам регистрации энергетического распределения гамма-излучения вблизи контейнера. Предложенный метод применяется к гомогенным отходам и обеспечивает снижение затрат на их характеризацию. Представлены результаты экспериментального исследования методики и предложения по ее совершенствованию.

Ключевые слова:

радиоактивные отходы, радионуклид, контейнер, гамма-спектрометр, неопределенность измерений, программное средство, спектр гамма-излучения, подтверждающие измерения.

**В.П.Поваров, А.Ю.Меремьянин,
Н.В.Степин, С.В.Росновский,
Э.С.Мельников, С.К.Булка,
Е.И.Юрченко**

(Филиал АО «Концерн Росэнергоатом»
«Нововоронежская АЭС», г. Нововоронеж)

**Е.А.Иванов, Д.А.Шаров,
А.С.Коротков**

(АО «ВНИИАЭС», г. Москва)

Актуальность

Одной из важных задач, возникающих при обращении с радиоактивными отходами на объектах атомной энергетики, является корректное измерение таких характеристик, как радионуклидный состав, удельная и суммарная активность радионуклидов, содержащихся в РАО [1]. Наименьшая неопределенность таких измерений обеспечивается при измерениях проб отходов, проводимых в лабораторных условиях спектрометрическими методами. При этом важным условием является обеспечение представительного пробоотбора, что гарантированно может быть обеспечено только при условии гомогенности контролируемых отходов.

На практике приведение радиоактивных отходов в гомогенное состояние зачастую невозможно, либо экономически нецелесообразно. В ряде случаев представительный пробоотбор технически невозможен либо нецелесообразен с точки зрения принципа *ALARA*, поскольку требует вскрытия и нарушения герметичности контейнеров с РАО и ведет к дополнительным дозовым нагрузкам на персонал.

Таким образом, на практике во многих случаях является оправданным измерение активности, радионуклидного состава гамма-излучающих радионуклидов в РАО посредством измерений спектра гамма-излучения от упаковки с РАО без ее вскрытия *in situ*. Характеристики других радионуклидов («чистых» альфа- и бета-излучателей, а также радионуклидов с энергией гамма-излучения менее 100 кэВ и/или малым квантовым выходом) в этом случае определяются с применением технологии радионуклидного вектора [2]. Сравнительно высокая погрешность подобных методов выполнения измерений является приемлемой с точки зрения нормативных документов и компенсируется простотой технологических операций и низкими дозовыми нагрузками на персонал при выполнении указанных измерений.

Исходные данные

Проектной документацией энергоблоков 3, 4, 5 Нововоронежской АЭС предусматривается затаривание РАО в виде расплава солей после установок глубокого упаривания (УГУ) в металлические контейнеры типа А2201.00.000 (и аналоги), представляющие собой усиленную бочку из стали Ст3 ($H = 910$ мм, $D = 560$ мм, полезный объем $0,2$ м³) с заливной горловиной, герметично закрывающейся крышкой. При этом удельная активность солевого продукта УГУ может достигать 10^9 Бк/кг, что обуславливает наличие существенных радиационных полей и высокие дозовые нагрузки на персонал при обращении с указанными отходами.

Поскольку технические характеристики контейнера А2201.00.000 не позволяют направлять РАО на захоронение в соответствии с [1] без дополнительной упаковки, Нововоронежской АЭС с 2008 года проводятся работы по кондиционированию указанных отходов путем их размещения в дополнительных железобетонных контейнерах типа НЗК, сертифицированных для целей окончательной изоляции РАО.

Основные технические характеристики контейнера НЗК-150-1,5П приведены в табл.1 [3].

Разработанная НВАЭС технология кондиционирования РАО в виде солевого продукта УГУ предусматривает размещение в контейнере НЗК 4-х контейнеров типа А2201.00.000 с отвержденным солевым плавом. Классическая схема размещения контейнеров – симметричная относительно центра и стенок контейнера (рис.1а).

Для обеспечения временного хранения заполненных контейнеров НЗК на площадке предприятия до отправки на захоронение Нововоронежской АЭС была разработана оригинальная технология, предусматривающая применение легких хранилищ ангарного типа [4,5]. При этом снижение радиационных

Табл.1.

Форма	Прямоугольный параллелепипед
Габаритные размеры, мм	1650×1650×1370
Внутренний объем, м ³	1,5
Толщина стен корпуса, мм	150
Материал стенки	Армированный бетон
Масса порожнего контейнера (с крышкой), т	4,3
Масса контейнера с отходами (не более), т	7,3
Превалирующие радионуклиды в отвержденных РАО (солевой плав)	Cs-137 Cs-134 Co-60

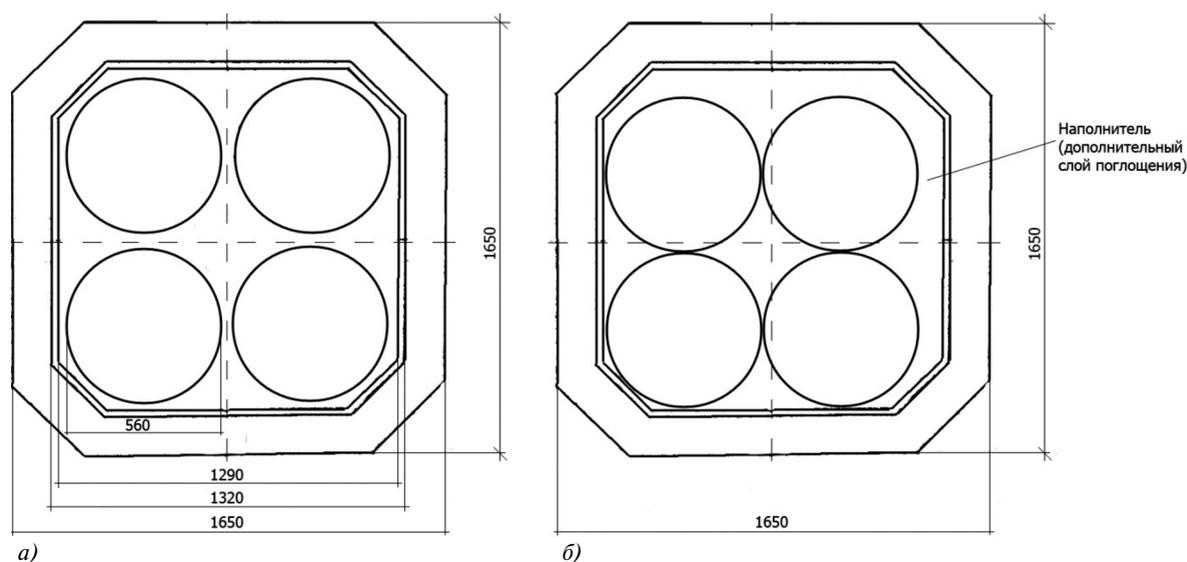


Рис.1. Схема размещения контейнеров А2201.00.000 с соевым плавом в контейнере НЗК-150-1,5П при симметричном размещении (а) и при использовании приема асимметричной загрузки (б).

полей вокруг хранилищ РАО обеспечивается за счет организационно-технических мероприятий (использование приема асимметричной загрузки РАО в контейнеры НЗК (рис.16), засыпка свободного межблочного пространства буферным материалом, применение свойств самоэкранировки радиационных упаковок и т. д.).

С 2008 г. по настоящее время Нововоронежской АЭС проведены работы по кондиционированию РАО в виде солевого продукта УГУ, наработанных с 1988 г. до вступления в силу Федерального закона «Об обращении с РАО» N 190-ФЗ от 11.07.2011 г. и находящихся в федеральной собственности. Та же технология применяется в отношении РАО, образовавшихся после вступления в силу Федерального закона N 190-ФЗ и являющихся собственностью АО «Концерн Росэнергоатом».

Для целей измерения активности отвержденных РАО в виде солевого плава, размещенных в контейнеры НЗК-150-1,5П, Нововоронежской АЭС совместно с АО «ВНИИАЭС» была разработана и аттестована «Методика контроля активности твердых отходов в контейнерах прямоугольной формы МК N 3.3.13-08», предусматривающая выполнение «прямых» измерений активности, радионуклидного состава гамма-излучающих радионуклидов в отвержденных РАО *in situ*.

Накопленный Нововоронежской АЭС опыт применения данной методики подтверждает заложенные в ней метрологические характеристики. Проведены многочисленные сравнительные измерения, подтверждающие хорошую сходимость результатов измерений *in situ* и измерений проб РАО в лабораторных условиях.

Методология

Методика основывается на измерении активностей гамма-излучающих радионуклидов в отходах, содержащихся в контейнере, с помощью полупроводникового или сцинтилляционного спектрометра с коллимированным датчиком, размещенным на расстоянии от контейнера до 1 м, с применением расчетной программы «*Satellite 2.2*» и последующем определении суммарной и удельной активности ТРО в контейнере.

В связи с применением при кондиционировании РАО приема асимметричной загрузки, в 2011 г. АО «ВНИИАЭС» было разработано «Методическое дополнение к базовой методике контроля активности твердых отходов в контейнерах прямоугольной формы МВК N 3.3.13-08. Выполнение радиационного контроля отходов при асимметричной загрузке четырех цилиндрических контейнеров с солевым концентратом в НЗК».

В связи с выходом Приказа Минпромторга России от 15.12.2015 N 4091 «Об утверждении Порядка аттестации первичных референтных методик (методов) измерений, референтных методик (методов) измерений и методик (методов) измерений и их применения», вышеуказанная методика была актуализирована с изменением названия и переаттестована в установленном порядке (Свидетельство об аттестации «Методики контроля твердых отходов в контейнерах прямоугольной формы МВК 3.3.13-17» N 465-RA.RU.311243-2017/450.033-636).

МВК 3.3.13-17 позволяет определять значения удельной активности радионуклидов в партии РАО, размещенной в прямоугольном контейнере, а также суммарной активности и удельной суммарной активности отходов в контейнере. Методика обеспечивает измерение удельной активности радионуклидов в ТРО в диапазоне от 10^2 до 10^{12} Бк/кг с расширенной неопределенностью не более 65% (при уровне доверия $P=0,95$).

Методика обеспечивает измерение активности и удельной активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{60}Co , ^{54}Mn и других, распад которых сопровождается гамма-излучением с энергией более 100 кэВ. Перечисленные радионуклиды для солевого плава Нововоронежской АЭС являются определяющими при отнесении к одному из классов РАО. С целью определения удельной активности РАО необходимо предварительно обеспечить измерение массы радиоактивных отходов. Данный параметр входит в объем обязательных сведений о РАО, предоставляемых в Систему государственного учета и контроля РВ и РАО, и подлежит обязательному измерению для всех видов РАО, образующихся на НВАЭС.

Измерения выполняются в четырех контрольных точках, расположенных в геометрических центрах каждой из боковых поверхностей контейнера на фиксированном расстоянии блока детектирования до поверхности упаковки с РАО. При этом для стационарно расположенных полупроводниковых детекторов Нововоронежской АЭС (спектрометры энергии гамма-излучения полупроводниковые типа «Гамма-1П») для проведения измерений применяется поворотная платформа (АУ ДВ.788-1214.00.00.00). Необходимым условием при выборе расстояния от детектора до контейнера является полное попадание контейнера в область обзора используемого коллиматора.

Для случая размещения твердых радиоактивных отходов различной морфологии (сжигаемые отходы, теплоизоляция, металлические отходы, строительные отходы, контейнеры с солевым плавом и т. д.) важное значение имеет корректная сортировка радиоактивных отходов, размещаемых в контейнеры, т. к. методика предусматривает, что измеряемая упаковка заполняется отходами со сходными физическими характеристиками. Размещение в одном контейнере НЗК радиоактивных отходов различных морфологических групп может существенно влиять на качество выполняемых измерений.

Фиксация геометрии измерения для каждого отсортированного вида отходов и фиксация характеристик различных контейнеров обеспечивают возможность градуировки путем введения расчетных поправок к эффективности регистрации гамма-излучения спектрометром, установленной при проверке или градуировке спектрометрической установки для геометрии точечного источника. Расчет поправок к эффективности регистрации для возможных геометрий измерения

протяженных источников выполняют с помощью расчетной программы *Satellite*, которая является неотъемлемой частью методики.

Программное средство *Satellite* позволяет рассчитывать геометрические коэффициенты для построения энергетической зависимости эффективности регистрации излучения спектрометром. Модель расчета, изложенная в программном средстве *Satellite*, основывается на формуле расчета плотности потока излучения от точечного источника, интегрируемой по объему реального источника методом Монте-Карло. При расчете учитывается поглощение излучения в наполнителе контейнера, в стенках контейнера и в детекторе. В качестве геометрического коэффициента (поправки на эффективность регистрации) K_{ij} для энергии E_i j -го радионуклида используется отношение плотностей потока гамма-квантов с энергией, соответствующей пику полного поглощения энергии анализируемого радионуклида, от точечного источника (стандартная геометрия) и протяженного источника – упаковки с РАО (измерительная геометрия):

$$K_{ij} = \frac{\varphi_T(E_i)}{\varphi_{об}(E_i)}, \quad (1)$$

$$\varphi_T(E_i) = \frac{A_j \cdot \eta_{ij}}{4\pi r^2}, \quad (2)$$

$$\varphi_{об}(E_i) = \iiint_{x,y,z} \frac{A_j(x,y,z) \cdot \eta_{ij}}{4\pi r^2(x,y,z)} \cdot e^{-\mu_1(E_i)d_1(x,y,z) - \mu_2(E_i)d_2(x,y,z) - \dots - \mu_n(E_i)d_n(x,y,z)} \cdot dx dy dz, \quad (3)$$

где $\varphi_T(E_i)$ – плотность потока гамма-излучения с энергией E_i , испускаемого j -м радионуклидом точечного источника, в точке детектирования, $c^{-1} \cdot м^{-2}$; $\varphi_{об}(E_i)$ – плотность потока гамма-излучения с энергией E_i , испускаемого j -м радионуклидом объемного источника (РАО в контейнере), в точке детектирования; A_j – активность j -го радионуклида; $A_j(x,y,z)$ – активность j -го радионуклида в точке с координатами (x,y,z) в источнике; η_{ij} – квантовый выход на распад для гамма-квантов с энергией E_i j -го радионуклида; r – расстояние от точечного источника до детектора, задаваемое при определении стандартной эффективности регистрации в точечной геометрии; m ; $r(x,y,z)$ – расстояние от точки (x,y,z) до точки детектирования; $\mu_n(E_i)$ – линейный коэффициент ослабления излучения с энергией E_i в материале n ; $d_n(x,y,z)$ – толщина слоя материала n , через который проходит излучение по направлению от точки (x,y,z) к детектору; K_{ij} – геометрический коэффициент (поправка на конфигурацию измерений).

Активность анализируемого радионуклида в упаковке определяется по формуле:

$$A_j = \frac{N_{ij} \cdot K_{ij}}{\varepsilon_j(E_i) \cdot \eta_{ij}}, \quad (4)$$

где N_{ij} – измеренная скорость счета импульсов в i -м энергетическом интервале от j -го радионуклида (для расчетов используется наибольшая N_{ij} из всех зарегистрированных пиков полного поглощения; $\varepsilon_j(E_i)$ – стандартная эффективность регистрации спектрометром излучения j -го радионуклида с энергией E_i (определяется при проверке в калибровочной процедуре с применением эталона активности в геометрии точечного источника).

Так как для определения активности радионуклида используется отклик спектрометра только в пиках полного поглощения, соответствующих энергиям излучения радионуклида, то перенос рассеянного излучения в программе не учитывается.

В базе данных программного средства размещены исходные данные (типы возможных детекторов, радиоактивных отходов, виды применяемых контейнеров и геометрий измерений). В случае,

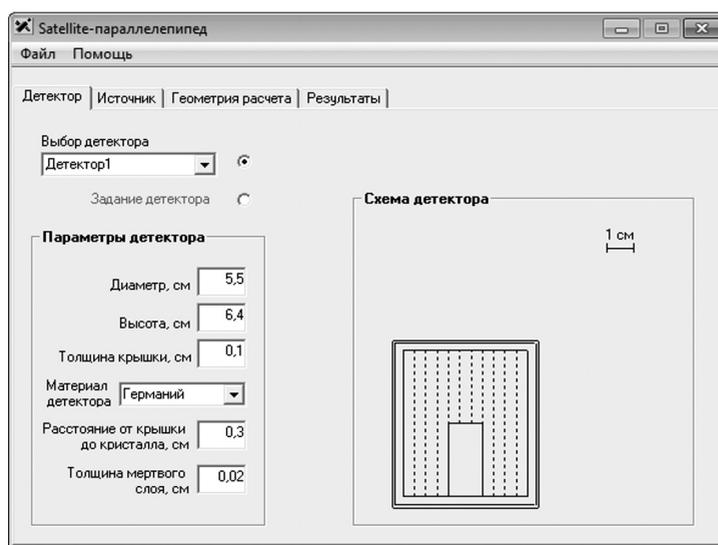


Рис.2. Диалоговое окно «Детектор» ПС Satellite.

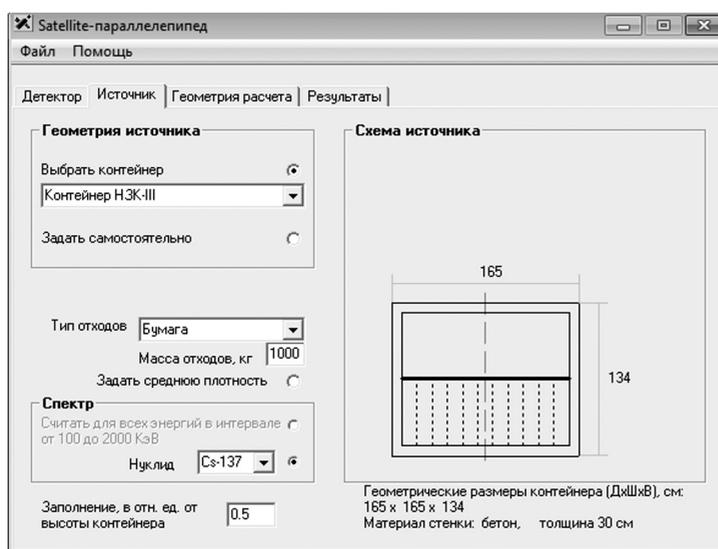


Рис.3. Диалоговое окно «Источник» ПС Satellite.

если в базе данных отсутствуют какие-либо данные, предусмотрена возможность ручного ввода параметров. Входной информацией для расчета поправочных коэффициентов является: тип или параметры детектора; тип контейнеров, в которые упакованы отходы; морфология РАО, масса РАО, уровень заполнения контейнера; радионуклиды, измеренные в РАО; геометрия размещения детектора относительно контейнера.

Информация вводится в диалоговых окнах (рис.2–5).

В результате работы программы определяется зависимость геометрических коэффициентов от энергии или геометрический коэффициент для выбранного радионуклида, исходя из результатов обработки спектра источника, который используется для расчета активности по формуле (4). Важнейшим параметром, характеризующим достоверность применяемого метода измерений, в соответствии со

стандартами по метрологии [6,7] и [9] является сходимость – показатель качества измерений, отражающий близость друг к другу результатов измерений, полученных на одном и том же образце (упаковке РАО) или однородных образцах в одинаковых условиях (практически в одно и то же время, на одном средстве измерений, одним исполнителем).

Сходимость результатов двух параллельных определений признают удовлетворительной, если выполняется следующий критерий:

$$d = X_{max,n} - X_{min,n} \leq d = Q(P,n) \cdot S_r \cdot \bar{X}, \quad (5)$$

где $X_{max,n}$ – максимальный результат из 2-х параллельных измерений; $X_{min,n}$ – минимальный результат из 2-х параллельных измерений; d – норматив оперативного контроля сходимости; $Q(P,n) = 2,33$ – квантиль распределения размахов; S_r – стандартная статистическая неопределенность, соответствующая значению первого измерения; \bar{X} – среднее значение по результатам 2-х измерений.

Анализ результатов

Результаты проверки сходимости измерений по МВК 3.3.13-17 приведены в табл.2. В результате проверки сходимости подтверждено выполнение критерия допустимого размаха однотипных измерений (5) для всех выполненных измерений.

Измерения активности контейнеров НЗК-150-1,5П с размещенными в нем контейнерами А2201.00.000 с соевым плавом выполнялись на Нововоронежской АЭС с 2008 г., при этом периодически проводились подтверждающие измерения в соответствии с требованиями МВК 3.3.13-17 к процедуре экспериментальной проверки качества измерений согласно [10].

При проведении подтверждающих измерений результаты гамма-спектрометрических измерений характеристик упаковки РАО, полученных *in situ* с применением МВК 3.3.13-17, сравнивались с расчетными данными, полученными на основании результатов измерений активности проб солевого продукта УТУ, проведенных в лабораторных условиях. Лабораторные измерения проводились в соответствии

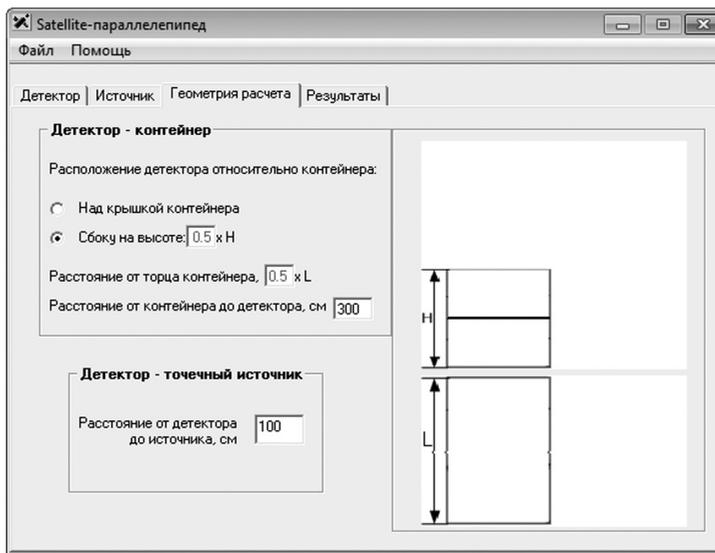


Рис.4. Диалоговое окно «Геометрия источника» ПС Satellite.

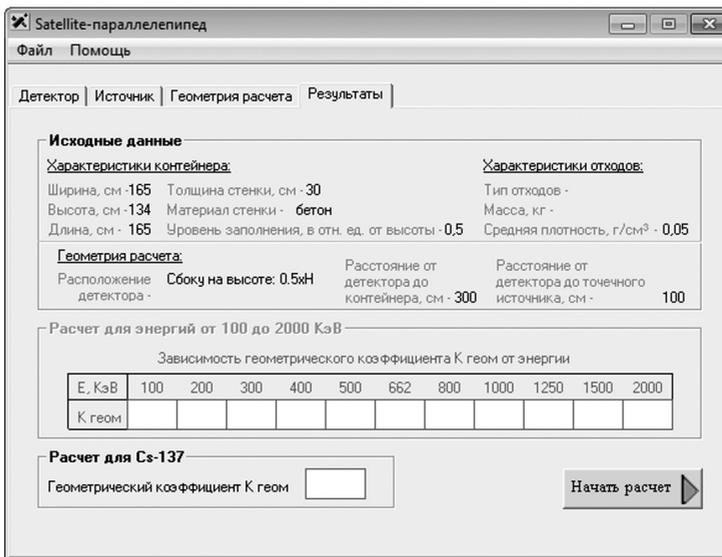


Рис.5. Диалоговое окно «Результаты» ПС Satellite.

Табл.2.

N п/п	Результат измерений по МВК 3.3.13-17, Бк (относительная неопределенность)		$ X_{изм(max)} - X_{изм(min)} $, Бк	d, Бк	Выполнение критерия сходимости (1)
	измерение N 1	измерение N 2			
1	1,49·10 ⁵ (18%)	1,81·10 ⁵ (10%)	37201	69201	Выполняется
2	1,91·10 ⁵ (7%)	1,58·10 ⁵ (17%)	4539	28460	Выполняется
3	4,39·10 ⁵ (7%)	4,40·10 ⁵ (7%)	70682	71682	Выполняется
4	2,66·10 ⁴ (31%)	2,57·10 ⁴ (32%)	3365	4265	Выполняется

с аттестованной «Методикой измерений активности счетных образцов на гамма-спектрометрах НВАЭС МВИ 15.1.6-17».

Для анализа качества измерений по методике путем сопоставления с лабораторным методом изначально использовался критерий допустимого расхождения (критерий качества измерений), установленный в типовой программе измерений в СУиК РВ и РАО [8], определяемый по формуле:

$$|X_{п.и.} - X_Y| \leq 2,58 \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta_{п.и.}}{k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_Y}{k}\right)^2}, \quad (6)$$

где $X_{п.и.}$ – результат подтверждающих измерений (измеренное путем отбора и анализа проб значение суммарной активности РАО в контейнере $A_{ИЗМ}$, Бк); X_Y – учетные данные (результат измерений суммарной активности РАО в контейнере $A_{ПАСП}$, Бк, полученный при паспорттизации РАО с применением МВК 3.3.13-17); $\Delta_{п.и.}$ – показатель точности подтверждающего измерения (погрешность СИ или неопределенность измерений, установленная методикой); Δ_Y – показатель точности учетных измерений (выполненных при паспорттизации РАО с применением МВК 3.3.13-17); 2,58 – квантиль нормированного нормального распределения при вероятности 0,99; k – квантиль нормированного нормального распределения, равный 1,96 при вероятности 0,95.

После актуализации типовой программы измерений критерий качества измерений был изменен в сторону ужесточения и согласно [9] записывается в виде:

$$|X_{п.и.} - X_Y| \leq \sqrt{(\Delta_{п.и.})^2 + (\Delta_Y)^2}. \quad (7)$$

В табл.3 приведены результаты контроля выполнения критерия (6), действовавшего в период проведения подтверждающих измерений, а также результаты применения к проведенным измерениям критерия (7). Согласно полученным результатам, критерий (6) был выполнен для всех случаев сопоставления значений активности РАО в контейнерах НЗК, полученных *in situ* и на основании лабораторных измерений. Критерий (7) в двух случаях из девяти не выполняется (табл.3).

Подтверждающие измерения по МВК 3.3.13-17 выборочно проводятся при проведении плановых инвентаризаций РАО. При этом также используется критерий (6). Результаты применения указанного критерия при выборочном контроле НЗК в период плановой инвентаризации РАО по состоянию на 01.01.2017 приведены в табл.4. Критерии (6) и (7) во всех 10 случаях выполняются.

Выводы

Полученные результаты демонстрируют выполнение установленных на момент использования методики требований к качеству измерений [8] и подтверждают достоверность радиационного контроля гомогенных РАО, к которым, согласно установленному в методике критерию, относится солевой плав. Однако в связи с изменением отраслевых требований к контролю качества измерений [9] и ужесточением применяемых критериев, необходим пересмотр установленных в методике процедур расчета неопределенности и контроля качества измерений, что позволит гарантировать соблюдение актуальных критериев качества измерений (7) и исключить несоответствия, отмеченные по результатам применения действующего критерия (7) (табл.3).

Необходимо отметить, что для случая измерений активности негетогенных РАО (ветошь, теплоизоляция, куски дерева, СИЗ, строительные отходы, металлические отходы и их комбинации)

Табл. 3.

N п/п	N НЗК	Результаты измерения суммарной активности, Бк		$ A_{изм} - A_{пасп} $, Бк	$2,58 \sqrt{\frac{(\Delta_{п.и.})^2}{1,96^2} + \left(\frac{\Delta_Y}{1,96}\right)^2}$, Бк	Заключение о выполнении критерия (6)	$\sqrt{(\Delta_{п.и.})^2 + (\Delta_Y)^2}$, Бк	Заключение о выполнении критерия (7)
		по МВК 3.3.13-17 (in situ) $A_{пасп}$	по данным лабораторных измерений $A_{изм}$					
1	1363	1,15E+11	1,10E+11	4,90E+09	6,33E+10	Выполнен	4,83E+10	Выполнен
2	1366	1,01E+10	1,40E+10	3,86E+09	6,30E+09	Выполнен	4,81E+09	Выполнен
3	1371	2,04E+11	1,14E+11	8,961E+10	1,04E+11	Выполнен	7,94E+10	Не Выполнен
4	1373	1,22E+11	1,32E+11	9,52E+09	6,91E+10	Выполнен	5,27E+10	Выполнен
5	1374	1,16E+11	1,39E+11	2,260E+10	6,73E+10	Выполнен	5,13E+10	Выполнен
6	1377	1,020E+10	1,579E+10	5,59E+09	6,58E+09	Выполнен	5,02E+09	Не Выполнен
7	1380	1,14E+11	1,31E+11	1,74E+10	6,55E+10	Выполнен	5,0E+10	Выполнен
8	1387	1,02E+10	1,28E+10	2,60E+09	6,20E+09	Выполнен	4,73E+09	Выполнен
9	1388	1,11E+11	1,18E+11	6,49E+09	6,32E+10	Выполнен	4,82E+10	Выполнен

Табл. 4.

N п/п	Регистрационный номер контейнера НЗК	Учетные данные		Активность на дату инвентаризации $A_{пасп}$, Бк	Результаты измерений при инвентаризации $A_{изм}$, Бк	$ A_{изм} - A_{пасп} $, Бк	$\sqrt{(\Delta_{п.и.})^2 + (\Delta_Y)^2}$, Бк
		A, Бк	Дата определения активности				
1	878	2,53E+10	28.10.11	2,24E+10	2,41E+10	1,7E+09	1,29E+10
2	914	2,24E+10	23.11.11	1,99E+10	2,10E+10	1,10E+09	1,90E+10
3	855	2,70E+10	19.10.11	2,39E+10	2,43E+10	4,0E+08	1,34E+10
4	875	2,38E+10	28.10.11	2,11E+10	2,13E+10	2,0E+08	1,18E+10
5	450	5,32E+10	17.07.10	4,58E+10	5,15E+10	5,7E+09	1,93E+10
6	1296	1,08E+11	18.11.13	1,0E+11	9,94E+10	6,0E+09	5,53E+10
7	691	1,55E+11	01.06.11	1,36E+11	1,35E+11	1,0E+09	7,51E+10
8	715	1,99E+11	16.05.11	1,75E+11	1,81E+11	6,0E+09	9,85E+10
9	707	1,83E+11	20.05.11	1,61E+11	1,68E+11	7,0E+09	9,08E+10
10	325	1,68E+11	03.09.09	1,42E+11	1,46E+11	4,0E+09	8,01E+10

Табл. 4. Продолжение.

№ п/п	$2,58 \sqrt{\left(\frac{\Delta_{п.и.}}{1,96}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\gamma}}{1,96}\right)^2}$, Бк	Заключение о выполнении критериев (6), (7)
1	1,69E+10	Выполнен
2	2,49E+10	Выполнен
3	1,75E+10	Выполнен
4	1,54E+10	Выполнен
5	2,53E+10	Выполнен
6	7,24E+10	Выполнен
7	9,84E+10	Выполнен
8	1,29E+11	Выполнен
9	1,19E+11	Выполнен
10	1,05E+11	Выполнен

процедура контроля качества измерений в методике не предусмотрена, неопределенность измерений по методике с ростом гетерогенности РАО возрастает, и при превышении заданного критерия гомогенности РАО методика неприменима.

Для оценки возможности актуализации методики в части измерений гетерогенных РАО и разработки соответствующих процедур потребуется:

- выполнить анализ влияния неравномерности распределения плотности отходов и активности радионуклидов в контейнере на результат измерений;
- проработать варианты критериев ограничения применимости методики согласно полученным результатам анализа;
- рассмотреть необходимость разработки объемных эталонных мер с неравномерным распределением плотности и активности;
- учесть опыт применения методов неразрушающего анализа морфологии содержимого упаковок (томография, гамма-сканирование и др.), выполнить соответствующие эксперименты;
- внедрить в ПС *Satellite* процедуры учета неравномерного распределения плотности и активности по объему упаковки;
- разработать бюджет неопределенности, процедуру оценки неопределенности и оценить ее значение.

Полученные за время использования МВК 3.3.13-17 результаты, в том числе приведенные в данной статье, свидетельствуют о несомненной практической пользе указанной методики, обеспечивающей существенную оптимизацию временных затрат и дозовых нагрузок на персонал при обеспечении необходимого качества измерений гомогенных РАО, и о достоверности получаемых результатов измерений.

Анализ многолетнего опыта применения на Нововоронежской АЭС методики выполнения измерений активности, радионуклидного состава гамма-излучающих радионуклидов в контейнерах НЗК с использованием программного средства *Satellite* на примере контроля отверженных ЖРО в виде солевого плава УГУ, размещенных в типовых контейнерах, позволяет сделать вывод о сходимости результатов измерений, соблюдении критерия качества измерений (6) и достоверности результатов паспортизации гомогенных РАО с применением методики. Для обеспечения безусловного соблюдения критериев качества (6), (7) необходимо актуализировать процедуры оценки неопределенности и контроля качества измерений по методике.

Для расширения области применения МВК 3.3.13-17 и снижения неопределенности измерений необходимо разработать и дополнить методику процедурами учета неравномерности распределения плотности и активности по объему упаковки РАО, а также процедурами контроля качества измерений негомогенных РАО.

Литература

1. НП-093-14. Критерии приемлемости РАО для захоронения.
2. Булка С.К., Коротков А.С., Наливайко Е.М., Шаров Д.А. и др. Внедрение технологии радионуклидного вектора на Нововоронежской АЭС. МНТК-2016, сборник докладов. М.: Росэнергоатом, 2016.
3. Гатауллин Р.М., Давиденко Н.Н., Свиридов Н.В., Сорокин В.Т. и др. Контейнеры для радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности: монография. М.: Логос, 2012. 256 с.
4. Росновский С.В., Булка С.К. Прогнозирование радиационной обстановки при хранении кондиционированных РАО в хранилищах ангарного типа // Теплоэнергетика. 2014. Выпуск 61, N 2. С. 47-54. DOI: 10.1134/S0040363614020118.
5. Поваров В.П., Щукин А.П., Наливайко Е.М., Прытков А.Н., Росновский С.В. Способ временного хранения радиоактивных отходов. Российская Федерация, Патент на изобретение RU 2530538 С2, заявка от 08.06.2012.
6. ГОСТ Р 8.932-2017. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Требования к методикам (методам) измерений в области использования атомной энергии. Основные положения.
7. ГОСТ Р 8.984-2019. Государственная система обеспечения единства измерений. Внутренний контроль качества измерений в области использования атомной энергии.
8. Программа измерений в системе учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов (типовая) ТПРГ 1.2.6.9.0176-2013.
9. Контроль качества измерений в системе учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов. Типовая программа ТПРГ 1.1.3.09.1394-2017.
10. ГОСТ 8.638-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение радиационного контроля. Основные положения.

Novovoronezh NPP Experience in Applying the Methodology for Measurement the Activity, Radionuclide Composition of Radioactive Waste in the NZK type Containers Using the «Satellite» Software

Povarov Vladimir, Meremianin Andrey, Stepin Nickolay, Rosnovsky Sergey, Melnikov Eduard, Bulka Svetlana, Yurchenko Evgeny (Rosenergoatom, Joint-Stock Company (REA JSC) Novovoronezh Nuclear Power Plant (Novovoronezh NPP), Novovoronezh, Russia);

Ivanov Evgeny, Sharov Dmitrii, Korotkov Alexey (Joint stock company «All-Russian Research Institute» for Nuclear Power Plants Operation» (VNIIAES), Moscow, Russia).

Abstract. The article analyses the results of application of the radioactive waste activity measurement method based on measuring the energy distribution of gamma radiation near the container at the Novovoronezh NPP. The proposed method is applied to homogeneous radioactive waste and provides a reduction of the characterization costs. The results of an experimental study of the method and proposals for its improvement are presented.

Key words: radioactive waste, radionuclide, container, gamma-spectrometer, measurement uncertainty, software, energy distribution of gamma radiation, confirmatory measurements.

В.П.Поваров (д.т.н., директор), А.Ю.Меремьянин (зам.гл.инж.), Н.В.Степин (зам. гл.инж.), С.В.Росновский (зам.гл.инж.), Э.С.Мельников (нач.цеха), С.К.Булка, Е.И.Юрченко (инж.) – Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская АЭС», г. Нововоронеж).

Е.А.Иванов (к.т.н., с.н.с., зам.директора), Д.А.Шаров (к.ф.-м.н., рук.департ.), А.С.Коротков (н.с., зам.рук.департ., нач.лаб.) – АО «ВНИИАЭС», г. Москва.

Контакты: +7 (495) 376-15-86; e-mail: askorotkov@vniiaes.ru.