

## ПОДХОДЫ К ХАРАКТЕРИЗАЦИИ РАО, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА «ПРОРЫВ»

А. А. Жеребцов<sup>1</sup>, А. П. Варлаков<sup>2</sup>, А. В. Германов<sup>2</sup>, Д. А. Шаров<sup>3</sup>,  
В. Ф. Ельцин<sup>4</sup>, А. К. Чураков<sup>4</sup>, Г. Е. Скакун<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Инновационно-технологический центр «ПРОРЫВ», Москва

<sup>2</sup>АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А. А. Бочвара», Москва

<sup>3</sup>АО «Всероссийской научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций», Москва

<sup>4</sup>ООО Предприятие «Грин Стар Технолоджиз», Москва

Статья поступила в редакцию 21 февраля 2018 г.

*В статье рассмотрены методы определения содержания сложнодетектируемых радионуклидов и делящихся материалов в радиоактивных отходах, которые будут образовываться при эксплуатации Опытного-демонстрационного энергетического комплекса, создаваемого в рамках реализации проекта «Прорыв». С учетом планируемых характеристик РАО предложен состав программно-аппаратного комплекса паспортизации РАО ОДЭК.*

**Ключевые слова:** сложнодетектируемые радионуклиды, делящиеся материалы, радиоактивные отходы, неразрушающий метод контроля, разрушающий метод контроля, расчетный метод, радионуклидный вектор.

### Актуальность задачи

В настоящее время на площадке Сибирского химического комбината в рамках проекта «Прорыв» для демонстрации замыкания ядерного топливного цикла создается опытно-демонстрационный энергокомплекс (ОДЭК), состоящий из реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем БРЕСТ-ОД-300, модуля фабрикации и рефабрикации ядерного топлива для БРЕСТ-ОД-300 и модуля переработки отработавшего ядерного топлива.

Пристанционный ядерный топливный цикл БРЕСТ-ОД-300 позволяет практически неограниченно расширить существующую ресурсную базу атомной энергетики за счет использования U-238 и рециклирования Pu в составе смешанного уран-плутониевого топлива равновесного состава.

Строительство и запуск ОДЭК предполагается осуществить в 4 этапа. На первом этапе в эксплуатацию вводится модуль фабрикации и пусковой комплекс рефабрикации плотного смешанного уран-плутониевого топлива (МФР). На втором этапе предусматривается сооружение и ввод в эксплуатацию энергоблока с реакторной установкой БРЕСТ-ОД-300. На третьем этапе

предусматривается строительство модуля переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) РУ БРЕСТ-ОД-300 с передачей продуктов переработки на МФР, а также объектов обращения с радиоактивными отходами (РАО). На четвертом этапе предусматривается перевод МФР в режим изготовления ядерного топлива из продуктов переработки ОЯТ РУ БРЕСТ-ОД-300.

Одним из важнейших элементов, влияющих на безопасность и экономику функционирования ОДЭК, является обращение с образующимися РАО. С пуском первой очереди ОДЭК начнется процесс образования РАО. При этом специфика ОДЭК как комплекса с реакторной установкой и пристанционным топливным циклом формирует обширную номенклатуру образующихся радиоактивных отходов как по морфологии и физико-химическим свойствам, так и по радионуклидному составу и удельной активности.

По федеральному законодательству [1, 2] образующиеся РАО должны быть приведены в соответствие критериям приемлемости и переданы на захоронение в ФГУП «Национальный оператор по обращению с РАО» (НО РАО). При

этом на передаваемые РАО должен быть составлен паспорт, содержащий основные характеристики отходов, включая радиационные, определяющие класс РАО: радионуклидный состав и уровень удельной активности отходов. Перечень радионуклидов, подлежащих контролю при паспортизации РАО, определяется по согласованию с НО РАО [3]. Хотя порядок определения и согласования с НО РАО перечня указываемых в паспорте радионуклидов не установлен, очевидно, что он должен содержать в себе все важные с точки зрения обеспечения долгосрочной безопасности пункта захоронения радионуклиды, потенциально присутствующие в РАО.

Контроль содержащихся в РАО радионуклидов требует применения различных средств и методов: чем шире перечень контролируемых радионуклидов, тем сложнее может оказаться процедура паспортизации РАО.

До ввода в эксплуатацию ОДЭК и, соответственно, начала процесса образования РАО должна быть создана система паспортизации РАО. Первым этапом работ должно быть определение методов контроля радиационных характеристик радиоактивных отходов и обоснование требований к составу комплекса паспортизации РАО.

### Перечень радионуклидов в РАО ОДЭК

Эксплуатация МФР ядерного топлива, РУ на быстрых нейтронах со свинцовым жидкометаллическим теплоносителем, модуля переработки отработавшего ядерного топлива приведет к образованию различных потоков РАО, включая фрагменты элементов отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС), отходы от пирохимической переработки ОЯТ, остеклованные высокоактивные радиоактивные отходы (ВАО) гидрометаллургии, фильтры системы газоочистки, цементный компаунд от цементирования жидких радиоактивных сред, прессуемые и неперебатываемые твердые радиоактивные отходы (ТРО) и др., относящихся по уровню активности к категориям от очень низкоактивных до высокоактивных РАО.

Ориентировочный перечень радионуклидов, присутствующих в РАО ОДЭК и подлежащих контролю при характеристике, приведен в табл. 1. В перечень включены потенциально присутствующие в потоках РАО ОДЭК радионуклиды с периодом полураспада более 100 дней. Такое пороговое значение обусловлено тем, что за допустимый срок промежуточного хранения ТРО, составляющий 10 лет, активность радионуклидов с периодом полураспада менее 100 дней сокращается более чем в  $10^{11}$  раз, что гарантированно переводит РАО, включая высокоактивные, в категорию нерадиоактивных отходов по содержанию указанных радионуклидов.

Таблица 1. Рекомендуемый перечень радионуклидов для характеристики РАО ОДЭК

№ п/п	Радионуклид	$T_{1/2}$ , лет	Основной вид радиоактивности
1	H-3	12,3	$\beta^-$ ( $E_{\max} = 18,6$ кэВ)
2	C-14	$5,73 \cdot 10^3$	$\beta^-$ ( $E_{\max} = 156$ кэВ)
3	Mn-54	0,85	$\gamma$ (834,8 кэВ)
4	Fe-55	2,7	X (5,9 кэВ), X (6,5 кэВ)
5	Co-60	5,27	$\beta^-$ ( $E_{\max} = 318,2$ кэВ), $\gamma$ (1173,22 кэВ), $\gamma$ (1332,51 кэВ)
6	Ni-59	$7,5 \cdot 10^4$	X (6,93 кэВ), X (7,65 кэВ)
7	Ni-63	100,1	$\beta^-$ ( $E_{\max} = 66,9$ кэВ)
8	Sr-90	28,9	$\beta^-$ ( $E_{\max} = 546$ кэВ)
9	Zr-93	$1,53 \cdot 10^6$	$\beta^-$ ( $E_{\max} = 90$ кэВ)
10	Nb-94	$2,03 \cdot 10^4$	$\gamma$ (702,6 кэВ), $\gamma$ (871,1 кэВ)
11	Tc-99	$2,13 \cdot 10^5$	$\beta^-$ ( $E_{\max} = 293,5$ кэВ)
12	Ru-106	1,01	$\beta^-$ ( $E_{\max} = 39,4$ кэВ), $\gamma$ (511,9 кэВ), $\gamma$ (621,9 кэВ), $\gamma$ (1050,4 кэВ)
13	Ag-110m	0,68	$\beta^-$ ( $E_{\max} = 83,7$ кэВ), $\gamma$ (657,8 кэВ), $\gamma$ (884,7 кэВ), $\gamma$ (937,5 кэВ)
14	Sb-125	2,77	$\gamma$ (427,7 кэВ), $\gamma$ (600,6 кэВ), $\gamma$ (635,9 кэВ)
15	I-129	$1,57 \cdot 10^7$	$\beta^-$ ( $E_{\max} = 149$ кэВ), X (29,8 кэВ), X (29,5 кэВ), X (33,6 кэВ), $\gamma$ (39,6 кэВ)
16	Cs-134	2,06	$\gamma$ (604,7 кэВ), $\gamma$ (795,9 кэВ), $\gamma$ (569,3 кэВ)
17	Cs-135	$2,3 \cdot 10^6$	$\beta^-$ ( $E_{\max} = 209$ кэВ)
18	Cs-137	30,17	$\beta^-$ ( $E_{\max} = 1173$ кэВ), $\gamma$ (661,6 кэВ)
19	Ce-144	0,78	$\gamma$ (133,5 кэВ), $\gamma$ (80,1 кэВ), $\gamma$ (696,5 кэВ), $\gamma$ (2185,7 кэВ)
20	Eu-154	8,8	$\beta^-$ ( $E_{\max} = 1855$ кэВ), $\gamma$ (123,1 кэВ), $\gamma$ (1274,5 кэВ), $\gamma$ (723,3 кэВ)
21	Eu-155	4,96	$\beta^-$ ( $E_{\max} = 147,4$ кэВ), $\gamma$ (86,6 кэВ), $\gamma$ (105,3 кэВ)
22	U-234	$2,5 \cdot 10^5$	$\alpha$
23	U-235	$7,04 \cdot 10^8$	$\alpha$ ; $\gamma$ (143,8 кэВ); $\gamma$ (185,7 кэВ);
24	U-238	$4,47 \cdot 10^9$	$\alpha$ ; $\gamma$
25	Np-237	$2,14 \cdot 10^6$	$\alpha$ ; $\gamma$ (29,4 кэВ); $\gamma$ (86,5 кэВ);
26	Pu-238	87,7	$\alpha$
27	Pu-239	$2,41 \cdot 10^4$	$\alpha$
28	Pu-240	6561	$\alpha$
29	Pu-241	14,29	$\beta^-$ ( $E_{\max} = 20,78$ кэВ)
30	Pu-242	$3,75 \cdot 10^5$	$\alpha$
31	Am-241	432,6	$\alpha$ ; $\gamma$ (59,5 кэВ); $\gamma$ (26,3 кэВ);
32	Cm-242	0,45	$\alpha$
33	Cm-243	29,1	$\alpha$
34	Cm-244	18,1	$\alpha$

Требования, предъявляемые к технологии ОДЭК, устанавливают, что наличие в потоках РАО изотопов урана и трансураниевых элементов должно быть минимально. В связи с этим актуальной является задача точного определения содержания в образующихся РАО делящихся материалов наряду с радионуклидами — продуктами активации конструкционных материалов (Fe-55, Co-60, Ni-63, Nb-94 и др.) и продуктами деления ядерного топлива (Sr-90; Tc-99; Ce-144; Cs-134; Cs-137 и др.).

Представленная в табл. 1 информация показывает, что только часть радионуклидов (таких как Mn-54, Co-60, Nb-94, Cs-134, Cs-137) являются гамма-излучателями с энергиями и интенсивностями, достаточными для контроля с помощью неразрушающих методов гамма-спектрометрии, применяемых в стандартных паспортизаторах РАО. Остальные радионуклиды относятся к альфа-, бета-, рентгеновским излучателям, и их распад либо не сопровождается гамма-излучением, либо имеющиеся гамма-линии обладают недостаточной энергией и/или интенсивностью для гарантированной регистрации при неразрушающем контроле РАО на фоне излучения других радионуклидов. Такие радионуклиды в мировой практике получили название сложнодетектируемых. При этом радионуклиды, которые подлежат контролю с помощью неразрушающих методов гамма-спектрометрии, принято называть легкодетектируемыми.

Для контроля обширного перечня радионуклидов, потенциально присутствующих в РАО ОДЭК, требуется применение различных методов, включая инструментальные и расчетные.

### Методы контроля радионуклидов в РАО ОДЭК

Можно выделить три группы методов контроля радионуклидов в РАО:

- методы неразрушающего контроля (гамма-спектрометрия, нейтронные методы, калориметрия);
- методы разрушающего контроля;
- расчетные методы (на основе методологии радионуклидного вектора или методов математического моделирования).

Отечественные нормативные документы предъявляют ряд требований к процедуре определения содержания радионуклидов в РАО. Во-первых, измерения необходимо выполнять с использованием поверенных средств измерения утвержденного типа. Во-вторых, все применяемые методики контроля должны быть аттестованы аккредитованной организацией. В-третьих, допускается применение как экспериментальных (инструментальных), так и расчетных методов контроля. При этом расчетные методы должны быть основаны на результатах предварительных прямых и (или) косвенных измерений значений контролируемых параметров [3, 4].

### Неразрушающие методы контроля радионуклидов

Неразрушающий метод гамма-спектрометрии нашел широкое применение в области паспортизации РАО благодаря своей оперативности и отсутствию необходимости выполнения часто крайне трудозатратных процедур отбора и подготовки проб. Метод, реализованный в виде стандартных паспортизаторов РАО на основе кристаллов из особо чистого германия или сцинтилляционных детекторов, позволяет контролировать в упаковках РАО ОДЭК без их вскрытия такие радионуклиды, как Mn-54, Co-60, Nb-94, Cs-134, Cs-137, Ce-144, Eu-154. Ряд радионуклидов, распад которых сопровождается гамма-излучением недостаточно высокой энергии и/или интенсивности, также могут быть зарегистрированы в определенных потоках РАО.

Как показали результаты математического моделирования гамма-спектров от упаковок ТРО, планируемых к образованию после ввода в эксплуатацию ОДЭК, с помощью специализированного программного обеспечения «Гамма ППД Профессиональная» для части потоков кондиционированных РАО возможно определение содержания в РАО радиоизотопов Np, Am, Pu, Cm с помощью гамма-спектрометрии по характеристическим гамма-линиям. Однако в большинстве случаев из-за наличия других гамма-излучающих радионуклидов и размещения РАО в защитных контейнерах, экранирующих излучение, минимально детектируемые активности делящихся радионуклидов при применении гамма-спектрометрии не позволяют достоверно паспортизовать РАО и определить необходимость доизвлечения делящихся материалов (ДМ) из контролируемого объекта.

Для определения содержания ДМ (изотопы урана, плутония, кюрия и др.) в РАО применяются нейтронные методы, основанные на регистрации нейтронов, испускаемых при спонтанном делении, делении, вызванном внешним источником нейтронов или в ходе реакции захвата альфа-частиц ( $\alpha, n$ ).

Нейтронные методы делятся на пассивные, активные и активно-пассивные. Пассивные методы основаны на регистрации нейтронов спонтанного деления. Поэтому они позволяют контролировать только радионуклиды, подверженные спонтанному делению. Спонтанное деление характерно в основном для четных изотопов плутония Pu-238, Pu-240, Pu-242. Для большинства практических измерений интенсивности спонтанного деления U-235, U-238 и нечетных изотопов Pu слишком низкие. Пассивные методы широко применяются для контроля четных изотопов плутония в образцах различной геометрии и размеров. Однако для интерпретации результата таких измерений необходима априорная информация о радионуклидном

составе и соотношениях между содержанием делящихся радионуклидов в РАО, поскольку методы не позволяют различать вклады отдельных радиоизотопов.

Активные нейтронные методы основываются на облучении контролируемого объекта нейтронами внешнего источника. Внешние нейтроны вызывают вынужденное деления ядер делящихся материалов, которое регистрируется путем счета нейтронных совпадений. Вынужденное деление под действием внешних нейтронов может использоваться для контроля изотопа U-235 и нечетных изотопов плутония (Pu-239, Pu-241). Для этого может применяться источник нейтронов с энергией ниже порогов деления четных изотопов (U-238, Pu-240).

В ходе проведения исследований выполнена экспериментальная проверка возможности контроля содержания делящихся материалов в РАО ОДЭК. Для этого сформированы имитанты РАО, представляющие из себя отходы различной, характерной для ОДЭК, морфологии (металлических отходы, ветошь, битое стекло, бетонная крошка, кирпичная кладка), затаренные в стандартные 200-литровые бочки и содержащие радионуклидные источники урана, кюрия и плутония. Контроль делящихся материалов выполнялся на основе модернизированного пассивного метода быстрых совпадений нейтронов с анализом временного спектра.

В ходе исследований достигнуты значения минимально детектируемой массы плутония 200–300 мг, урана 1–2 г и кюрия 0,5 мкг на 200-литровую бочку с ТРО. Полученные значения соответствуют имеющимся в литературе значениям, которые, как правило, лежат в интервале от 0,1 г до нескольких сотен грамм. В работе [5] ФГУП «ВНИИА» получено, что активный метод контроля количества ДМ позволяет с высокой чувствительностью определять отклики ДМ, находящихся в замкнутых контейнерах без их вскрытия. Так, за 8–15 мин измерений в 70-литровом контейнере с различными матричными наполнителями плотностью от 0,32 до 1,6 г/см<sup>3</sup> при потоке нейтронов генератора около 5·10<sup>8</sup> нейтрон/с установлены минимально детектируемые массы U-235: (3±1) мг при использовании графитовых матриц и (32±11) мг в случае железных матриц.

Для дальнейших научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по формированию программно-аппаратного комплекса для обнаружения ДМ при паспортизации РАО ОДЭК предполагается использовать активные нейтронные методы и регистрацию запаздывающих нейтронов. Предлагается включить в комплекс нейтронный генератор на основе d-t реакции с выходом нейтронов не менее 10<sup>9</sup> с<sup>-1</sup> и детекторы нейтронов на основе He-3. Обнаружение делящихся материалов при этом основывается на регистрации запаздывающих

нейтронов за однократный или повторяющийся интервал времени 10 секунд после облучения контролируемого объекта быстрыми и тепловыми нейтронами в течение 20–40 секунд.

Для пассивного неразрушающего анализа ядерных материалов активно применяются калориметрические методы. Метод калориметрии заключается в оценке активности объекта на основе измерения тепла, генерируемого в процессе радиоактивного распада радионуклидов.

Преимущества калориметрии состоят в том, что результаты измерений не зависят от геометрии и морфологии образцов, от распределения делящихся материалов внутри образца. Однако без априорной информации о радионуклидном составе и соотношениях между удельными активностями радионуклидов в РАО метод калориметрии не может дать информацию об активности образца. Поэтому этот метод при паспортизации РАО ОДЭК со сложным радионуклидным составом можно рекомендовать только как элемент дополнительного контроля корректности измерений и расчетов.

Существуют альтернативные неразрушающие методы, пока не нашедшие широкого практического применения, например, метод, основанный на облучении контролируемых объектов интенсивными потоками высокоэнергичных гамма-квантов, вызывающих процессы фотоделения ядер, с последующей регистрацией нейтронов деления нейтронными методами.

### Разрушающие методы контроля радионуклидов

Методы разрушающего контроля основываются на отборе проб в виде необходимого представительного количества материала от контролируемой партии РАО, подготовке счетных образцов с применением различных методов разделения радионуклидов и измерении удельных активностей радионуклидов в пробах.

Разрушающий контроль дает возможность наиболее точно выполнять измерение активностей радионуклидов в РАО. Однако сложность и длительность процедур разрушающего контроля не позволяют рекомендовать их для применения при паспортизации РАО в промышленном масштабе. Область применения разрушающих методов:

- технологический контроль различных сред при эксплуатации ОДЭК, включая переработку ОЯТ и рефабрикацию топлива,
- детальный выборочный анализ радионуклидного состава и удельных активностей радионуклидов в потоках РАО с целью установления устойчивых или консервативных соотношений между активностями радионуклидов (радионуклидных векторов) и последующего их применения в составе методологии радионуклидного вектора при паспортизации РАО.

В ОДЭК может быть реализована схема, при которой установленные по результатам исследования РАО радионуклидные векторы будут постоянно уточняться, актуализироваться с использованием результатов промежуточного разрушающего контроля технологических сред и использоваться для расчета активности сложнодетектируемых радионуклидов в паспортизируемых кондиционированных РАО по результатам их гамма-спектрометрии.

Для разрушающего контроля радионуклидов в РАО ОДЭК необходимо применение методов альфа-спектрометрии (для контроля Np-237, U-235, U-238, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Am-241, Cm-243, Cm-244), бета-радиометрии (для контроля Sr-90, Tc-99 и др.), гамма- и рентгеновской спектрометрии (для контроля Ni-59, Co-60, Nb-94, I-129, Cs-137, U-235, Np-237, Am-241 и др.), жидкосцинтилляционной спектрометрии (для контроля H-3, C-14, Cl-36, Ni-63, Sr-90, Tc-99, Pu-241 и др.). Также может найти применение масс-спектрометрия (для контроля Tc-99, I-129, U-235, U-238 и др.).

Для определения содержания в контролируемых РАО альфа-излучающих радионуклидов после радиохимических выделений традиционно используют альфа-спектрометрические методы, основанные на применении полупроводникового ионно-имплантированного детектора. Недостатком этого метода является трудоемкость и длительность подготовки счетных образцов.

Для определения содержания в пробах бета-излучающих радионуклидов после их радиохимического выделения могут применяться стандартные пропорциональные счетчики.

Альфа-спектрометрию и бета-радиометрию можно заменить жидкосцинтилляционной спектрометрией (ЖСС). Жидкосцинтилляционный метод детектирования характеризуется высокой эффективностью регистрации практически всех видов радиоактивного излучения и, в сочетании с относительной простотой и быстротой приготовления счетного образца и теоретической возможностью одновременного определения в сложных смесях альфа-, бета- и гамма-излучающих радионуклидов, может стать незаменимым при решении разнообразных радиоаналитических задач. Недостатком метода ЖСС является низкое разрешение, не позволяющее разделять альфа-излучатели с близкими энергиями.

Жидкосцинтилляционные счетчики, оснащенные специализированным программным обеспечением расшифровки непрерывных спектров, могут работать в режиме спектрометра, что дает возможность в ряде случаев получать полную информацию о радионуклидном составе проб или, по крайней мере, надежно определять превышение каких-либо контрольных уровней на определенные радионуклиды [6].

### Расчетные методы контроля радионуклидов

Расчетные методы заключаются в определении активности радионуклидов на основе математического моделирования процессов образования и распространения радионуклидов в цепочках технологических процессов до формирования конкретных РАО. Метод математического моделирования можно рекомендовать для отходов в виде элементов активной зоны, загрязненных радионуклидами под действием нейтронного потока, таких как фрагменты ОТВС, внутрикорпусные устройства, каналы нейтронных измерений и др. Метод моделирования крайне требователен к качеству исходных данных, используемых в качестве параметров модели, и полностью не исключает необходимости проведения инструментального радиационного контроля РАО.

Метод может быть использован для определения соотношений между удельными активностями сложнодетектируемых и легкодетектируемых радионуклидов (радионуклидных векторов).

Для определения содержания в РАО сложнодетектируемых радионуклидов можно применять подход с использованием методологии радионуклидного вектора. Методология широко применяется в международной практике характеристики РАО [7, 8]. На основе методологии радионуклидных векторов определение содержания сложнодетектируемых радионуклидов при паспортизации РАО осуществляется расчетным методом с использованием определенных радионуклидных векторов и измеренных значений активности реперных легкодетектируемых радионуклидов.

### Требования к составу комплекса паспортизации РАО ОДЭК

Очевидно, что выполнение паспортизации партий РАО на основе разрушающих методов контроля нецелесообразно, поскольку требует значительных временных и финансовых затрат. Непосредственно процедура контроля при паспортизации кондиционированных РАО должна выполняться с применением гамма-спектрометрических комплексов, предназначенных для характеристики РАО, размещенных в стандартных контейнерах. По результатам гамма-спектрометрии расчетным методом радионуклидных векторов должно определяться содержание в контролируемой партии РАО сложнодетектируемых радионуклидов, включая ДМ. Подтверждающий контроль содержания ДМ должен выполняться на основе нейтронных методов.

Для реализации методологии радионуклидных векторов необходимо проведение детального спектрометрического исследования потоков РАО с применением разрушающих методов

альфа-, жидкосцинтилляционной, рентгеновской и гамма-спектрометрии. Исследование может быть проведено как сторонней компетентной лабораторией, так и собственной лабораторией, обладающей необходимым оборудованием и методическим обеспечением.

## Выводы

В статье рассмотрены характеристики РАО ОДЭК. На основе информации о РАО сформирован рекомендуемый перечень радионуклидов, подлежащих контролю при паспортизации РАО ОДЭК. Для указанного перечня рассмотрены возможные методы контроля радионуклидов при паспортизации РАО.

Показано, что для решения задачи достоверного контроля и паспортизации программно-аппаратный комплекс паспортизации РАО ОДЭК должен включать:

- паспортизаторы РАО на основе гамма-спектрометров;
- систему для нейтронных измерений.

Контроль сложнодетектируемых радионуклидов рекомендуется осуществлять на основе методологии радионуклидного вектора.

## Литература

1. Федеральный закон от 11.07.2011 № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

2. Постановление Правительства РФ от 19.10.2012 № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериям отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов».

3. НП-093-14 «Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения».

4. НП-067-16 «Основные правила учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов в организации».

5. Бармаков Ю. Н., Батяев В. Ф., Боголюбов Е. П., Бочкарев О. В., Юрков Д. И. Применение импульсных нейтронных генераторов для контроля ядерных материалов // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2012. № 3.

6. Практическое применение жидкосцинтилляционной спектрометрии / Малиновский С. В., Ермаков А. И., Каширин И. А., Тихомиров В. А., Соболев А. И. // Сборник материалов IX ежегодного семинара «Спектрометрический анализ. Аппаратура и обработка данных на ПЭВМ». — Обнинск: ГЦИПК, 2003.

7. ISO 16966-2013 Nuclear-energy – Nuclear fuel technology — Theoretical activation calculation method to evaluate the radioactivity of activated waste generated at nuclear reactors.

8. IAEA Nuclear Energy Series NW-T-1.18. Determination and use of scaling factors for waste characterization in NPP. IAEA, Vienna, Austria, 2009.

---

## Информация об авторах

*Жеребцов Александр Анатольевич*, кандидат технических наук, начальник отдела, ИТЦП «ПРОРЫВ» (107140, г. Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, стр. 4), e-mail: zhala@proryv2020.ru.

*Варлаков Андрей Петрович*, доктор технических наук, директор отделения, АО «ВНИИНМ» (123098, г. Москва, ул. Рогова, д. 5а), e-mail: APVarlakov@bochvar.ru.

*Германов Александр Владимирович*, кандидат технических наук, начальник отдела, АО «ВНИИНМ» (123098, г. Москва, ул. Рогова, д. 5а), e-mail: AVGermanov@bochvar.ru.

*Шаров Дмитрий Александрович*, кандидат физико-математических наук, руководитель департамента, АО «ВНИИАЭС» (109507, г. Москва, ул. Ферганская, д. 25), e-mail: DASHarov@vniiaes.ru.

*Ельцин Владимир Федорович*, заместитель генерального директора, ООО Предприятие «Грин Стар Технолоджиз» (123060, г. Москва, ул. Расплетина, д. 5, стр. 1), e-mail: elcin@greenstar.ru.

*Чураков Антон Константинович*, кандидат физико-математических наук, главный специалист, ООО Предприятие «Грин Стар Технолоджиз» (123060, г. Москва, ул. Расплетина, д. 5, стр. 1), e-mail: churakov@greenstar.ru.

*Скакун Геннадий Евгеньевич*, генеральный директор, ООО Предприятие «Грин Стар Технолоджиз» (123060, г. Москва, ул. Расплетина, д. 5, стр. 1), e-mail: info@greenstar.ru.

## Библиографическое описание данной статьи

Жеребцов А. А., Варлаков А. П., Германов А. В., Шаров Д. А., Ельцин В. Ф., Чураков А. К., Скакун Г. Е. Подходы к характеристике РАО, образующихся при реализации проекта «ПРОРЫВ» // Радиоактивные отходы. — 2018. — № 2 (3). — С. 88-94

APPROACHES TO THE CHARACTERIZATION OF RW GENERATED DURING IMPLEMENTATION OF THE PROJECT «PRORYV»

Zherebtsov A. A.<sup>1</sup>, Varlakov A. P.<sup>2</sup>, Germanov A. V.<sup>2</sup>, Sharov D. A.<sup>3</sup>,  
Eltsin V. F.<sup>4</sup>, Churakov A. K.<sup>4</sup>, Skakun G.E.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Innovation and Technology Center of the Project «PRORYV», Moscow, Russia

<sup>2</sup>JCS «High-technology scientific research institute of inorganic materials named after A. A. Bochvar», Moscow, Russia

<sup>3</sup>Stock Company «All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation», Moscow, Russia

<sup>4</sup>LLC RPE «Green Star Instruments», Moscow, Russia

Article received 21 February 2018

*Methods of determining the content of difficult to measure radionuclides and fissile materials in radioactive waste that will be formed during the operation of the Pilot Demonstration Energy Complex (PDEC) created within the framework of the «Proryv» project are considered. Taking into account the planned characteristics of PDEC radioactive waste, the composition of the software and hardware complex for the PDEC radioactive waste characterization is proposed.*

**Keywords:** *difficult to measure radionuclides, fissile materials, radioactive waste, non-destructive method, destructive method, computational method, nuclide vector.*

## References

1. Federal'nyj zakon ot 11.07.2011 no 190-FZ "Ob obrashchenii s radioaktivnymi othodami i vnesenii izmenenij v otдел'nye zakonodatел'nye akty Rossijskoj Federacii".
2. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 19.10.2012 no 1069 "O kriteriyah otneseniya tverdyh, zhidkih i gazoobraznyh othodov k radioaktivnym othodam, kriteriyam otneseniya radioaktivnyh othodov k osobym radioaktivnym othodam i k udalyaemym radioaktivnym othodam i kriteriyah klassifikacii udalyaemyh radioaktivnyh othodov".
3. NP-093-14 "Kriterii priemlemosti radioaktivnyh othodov dlya zahoroneniya".
4. NP-067-16 "Osnovnye pravila ucheta i kontrolya radioaktivnyh veshchestv i radioaktivnyh othodov v organizacii".
5. Barmakov Yu. N., Batyaev V. F., Bogolyubov E. P., Bochkarev O. V., Yurkov D. I. Primenenie impul'snyh nejtronnyh generatorov dlya kontrolya yadernyh materialov. *Bezopasnost' yadernyh tekhnologij i okruzhayushchej sredy*, 2012, no 3.
6. Malinovskij S. V., Ermakov A. I., Kashirin I. A., Tihomirov V. A., Sobolev A. I. Prakticheskoe primeneniye zhidkoscintillyacionnoj spektrometrii. Sbornik materialov IX ezhegodnogo seminaru "Spektrometricheskij analiz. Apparatura i obrabotka dannyh na PEHVM". — Obninsk: GCIPK, 2003.
7. ISO 16966-2013 Nuclear-energy — Nuclear fuel technology — Theoretical activation calculation method to evaluate the radioactivity of activated waste generated at nuclear reactors.
8. IAEA Nuclear Energy Series NW-T-1.18. Determination and use of scaling factors for waste characterization in NPP. IAEA, Vienna, Austria, 2009.

## Information about the authors

Zherebtsov Alexander Anatolevich, PhD, Head of Department, ITCP "PRORYV" (p. 4, 2/8, Malaya Krasnoselskaya Str., Moscow, 107140, Russia), e-mail: zhala@proryv2020.ru.

Varlakov Andrey Petrovich, Doctor of Science, Director of Department, JCS "VNIINM" (5a, Rogova St., Moscow, 123098, Russia), e-mail: APVarlakov@bochvar.ru.

Germanov Alexander Vladimirovich, PhD, Head of Department, JCS "VNIINM" (5a, Rogova St., Moscow, 123098, Russia), e-mail: AVGermanov@bochvar.ru.

Sharov Dmitry Alexandrovich, PhD, Head of Department, JSC "VNIIAES" (2, Ferganskaya Street, Moscow, 109507, Russia), e-mail: DASHarov@vniiaes.ru.

Eltsin Vladimir Fedorovich, Deputy General Director, LLC RPE "Green Star Instruments" (p. 1, 5, Raspletin str., Moscow, 123060, Russia), e-mail: elcin@greenstar.ru.

Churakov Anton Konstantinovich, PhD, Main Specialist, LLC RPE "Green Star Instruments" (p. 1, 5, Raspletin str., Moscow, 123060, Russia), e-mail: churakov@greenstar.ru.

Skakun Gennady Evgenievich, General Director, LLC RPE "Green Star Instruments" (p. 1, 5, Raspletin str., Moscow, 123060, Russia), e-mail: info@greenstar.ru.

## Bibliographic description

Zherebtsov A. A., Varlakov A. P., Germanov A. V., Sharov D. A., Eltsin V.F., Churakov A. K., Skakun G. E. Approaches to the characterization of RW generated during implementation of the project "PRORYV". *Radioactive Waste*, 2018, no 2 (3), pp. 88–94. (In Russian).