



УДК 621.039.75

МЕТОД ОЦЕНКИ СОДЕРЖАНИЯ АЛЬФА- И БЕТА- ИЗЛУЧАЮЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ В РАО РАДИОХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ ПО МАТРИЦЕ ПРИСУТСТВУЮЩИХ ГАММА-ИЗЛУЧАЮЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ

Жеребцов А.А., к.т.н. (zhala@proryv2020.ru)
(ИТЦП «ПРОРЫВ»),
Варлаков А.П., д.т.н. (apvarlakov@bochvar.ru),
Германов А.В., к.т.н. (avgermanov@bochvar.ru),
Мельников М.В., к.т.н. (vladmvm@inbox.ru)
(АО «ВНИИНМ»),
Коротков А.С. (korotkov_as@vniiftri.ru)
(ФГУП «ВНИИФТРИ»),
Ельцин В.Ф. (elcin@greenstar.ru),
Чураков А.К., к.ф.-м.н. (drchurakov@mail.ru)
(ООО НИПП «Грин Стар Инструментс»)

Приведен метод оценки содержания сложнодетектируемых радионуклидов в радиоактивных отходах опытно-демонстрационного энергетического комплекса, позволяющий свести к минимуму затраты, связанные с необходимостью представительного отбора, пробоподготовки и анализа проб.

► **Ключевые слова:** радионуклид, радиоактивные отходы, матрица присутствия, радионуклидный вектор, неразрушающий метод контроля, отбор проб.

METHOD FOR ESTIMATING THE CONTENT OF ALPHA- AND BETA-EMITTING RADIONUCLIDES IN RADWASTE OF RADIOCHEMICAL INDUSTRY USING THE MATRIX OF GAMMA-EMITTING RADIONUCLIDES

Zherebtsov A., Ph. D. (ITCP «PRORYV»),
Varlakov A., Ph. D., Germanov A., Ph. D., Melnikov M., Ph. D. (JSC «VNIINM»),
Korotkov A. (FSUE «VNIIFTRI»),
Elcin V., Churakov A., Ph. D. (LLC RPE «Green Star Instruments»)

A method for estimating the content of difficult-to-measure radionuclides in the radioactive waste of a pilot demonstration power complex, which allows minimizing the costs of sampling, sample preparation and analysis, is presented.

► **Key words:** radionuclide, radioactive waste, presence matrix, nuclide vector, non-destructive method, sampling.

Актуальность задачи

В рамках федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010 — 2015 годов и на перспективу до 2020 года» в ближайшие годы планируется ввести в эксплуатацию опытно-демонстрационный энергетический комплекс (ОДЭК), состоящий из энергоблока с реактором на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем и производств замкнутого ядерного топливного цикла, таких как модуль по переработке отработавшего смешанного уран-плутониевого ядерного топлива и модуль по изготовлению ядерного топлива из регенерированных элементов. Замыкание ядерного топливного цикла реактора на быстрых нейтронах позволяет не только решить проблему накопления отработавшего ядерного топлива и исключает колоссальные затраты на обращение с ним, но и позволяет функционировать реактору в режиме топливообеспечения, исключая необходимость добычи и обогащения урана.

Современные условия устойчивого функционирования ядерной энергетики требуют соответствия новых технологий критериям экономической конкурентоспособности.

Одним из направлений повышения конкурентоспособности ОДЭК является снижение издержек на обращение с радиоактивными отходами (РАО), образующимися при работе комплекса. С этой целью разрабатывается программно-аппаратный комплекс характеристики РАО, использующий комплексный метод, основанный на гамма-спектрометрии и определении содержания в РАО сложнодетектируемых альфа- и бета-излучающих радионуклидов, распад которых не сопровождается гамма-излучением достаточной для регистрации неразрушающими методами измерений интенсивности, по матрице присутствующих легко детектируемых гамма-излучающих радионуклидов.

Данный подход позволяет свести к минимуму технические проблемы и затраты, связанные с необходимостью представительного отбора, пробоподготовки и анализа большого количества проб, временного хранения отходов в ожидании принятия решения и образования вторичных отходов. Применение такого метода особенно эффективно при исследовании неомогенных отходов.

Методы разрушающего контроля РАО предполагают отбор и анализ проб. Их применение требуется при наличии в отходах альфа- и бета-излучающих радионуклидов, когда невозможно

измерить характеристики излучений неразрушающими методами (например, по гамма-излучению). У этих методов есть существенные недостатки, главными из которых являются высокая стоимость, продолжительное время лабораторных анализов и низкая достоверность результатов измерений в случае неомогенности отходов и/или недостаточного количества проб. Причиной трудностей является сам объект радиационного контроля – непредставительная проба из партии РАО, подлежащая предварительной многостадийной подготовке.

Повышение эффективности характеристики РАО, содержащих альфа- и бета-излучающие радионуклиды, возможно за счет совместного применения разрушающих и неразрушающих методов контроля. При этом отбор, подготовка и анализ проб выполняются в ходе специального исследования для установления корреляций между активностями контролируемых радионуклидов (включая альфа- и бета-излучатели), а текущий контроль РАО выполняется неразрушающими методами с использованием установленных корреляционных соотношений или зависимостей. Этот подход к радиационному контролю РАО получил название «методология радионуклидного вектора» (nuclide-vector) или «метод масштабирующих коэффициентов» (scaling-factor). Методология радионуклидного вектора используется для характеристики РАО в большинстве стран, ведущих в области использования атомной энергии, и описана в документе МАГАТЭ NW-T-1.18 [1] и стандарте ISO 21238:2007 [2].

Методология радионуклидного вектора применительно к оценке содержания сложнодетектируемых радионуклидов в РАО

Основополагающая идея методологии состоит в том, что сложнодетектируемые альфа- и бета-излучающие радионуклиды образуются, перемещаются внутри технологических систем и накапливаются в различных средах и объектах одновременно с легко детектируемыми гамма-излучающими реперными радионуклидами (радионуклидами, альфа- или бета-распаду которых сопутствует гамма-излучение достаточной интенсивности). При этом механизмы образования радионуклидов двух групп (сложнодетектируемых и реперных), их физико-химические свойства и, соответственно, схемы распространения в технологических системах могут быть схожи.

Методология радионуклидного вектора является достаточно общей, применимой к оценке содержания сложнотестируемых радионуклидов не только в РАО, но и в выбросах и сбросах объектов использования атомной энергии, а также в потоках различных технологических сред, используемых в производственном процессе. Однако именно для РАО определение сложнотестируемых радионуклидов по матрице присутствующих гамма-излучающих радионуклидов имеет наибольшее практическое значение, поскольку позволяет относительно легко определять их содержание в РАО по результатам измерений спектров или мощности дозы гамма-излучения вблизи упаковок с РАО (то есть неразрушающими методами).

Например, между активностью сложнотестируемого ^{63}Ni и активностью реперного радионуклида ^{60}Co , который также является продуктом активации и имеет аналогичные физико-химические характеристики, обнаруживается корреляция практически во всех потоках РАО атомных станций. Однако из-за ограниченного количества потенциальных реперных радионуклидов с достаточными интенсивностями гамма-излучения и периодами полураспада (^{60}Co , ^{137}Cs) не всем сложнотестируемым радионуклидам можно сопоставить реперный нуклид, основываясь строго на сходстве механизма образования и физико-химических характеристик. Для поиска корреляций может использоваться эмпирический подход, основанный исключительно на результатах корреляционно-регрессионного анализа измеренных значений активности радионуклидов в РАО. Может наблюдаться корреляция между активностями альфа-излучающего ^{238}Pu и реперного радионуклида ^{60}Co , механизмы образования и физико-химические характеристики которых значительно различаются: ^{238}Pu образуется в результате распада ^{242}Cm , являющегося продуктом реакции радиационного захвата нейтронов ядром ^{238}U в урановом топливе и последующих многократных захватов нейтронов ядрами последовательно образующихся трансурановых элементов, а ^{60}Co – в результате активации конструкционных материалов нейтронами. Это объясняется тем, что основным источником образования радионуклидов в реакторе является нейтронное облучение объектов и количественное соотношение между активностями образующихся радионуклидов остается постоянным при стабильных условиях работы реактора.

В любом случае выбор реперного радионуклида для конкретного сложнотестируемого

радионуклида основан на наличии между их активностями существенной корреляции.

Практическая реализация методологии включает установление корреляционных связей, включая функциональные зависимости, между удельными активностями радионуклидов для различных РАО. Для поиска корреляций между удельными активностями радионуклидов выполняется специальное исследование РАО, для чего отходы классифицируются на виды (потоки) по источнику образования, химическим и физическим свойствам входящих в них радионуклидов, технологиям переработки. Таким образом, для каждого из потоков РАО характерен определенный радионуклидный состав и реперные радионуклиды. Характерные для каждого потока радионуклиды разделяются на группы с одинаковым механизмом происхождения (продукты коррозии, продукты деления). По результатам проведенного анализа выполняется экспериментальное исследование радионуклидного состава каждого потока РАО, включая отбор представительного количества проб и анализ их радионуклидного состава. Полученные экспериментальные данные заносятся в базу данных для последующей обработки и хранения.

По результатам статистического анализа полученных экспериментальных данных устанавливаются корреляции между удельными активностями радионуклидов в пределах каждой группы. Средствами специального математического аппарата выполняется корреляционно-регрессионный анализ массива экспериментальных данных (результатов измерений активностей радионуклидов в пробах), устанавливается вид функции, описывающей корреляционную связь (линейная или нелинейная), и коэффициенты корреляции между активностями сложнотестируемого радионуклида и каждого из сопоставляемых ему реперных радионуклидов.

Реперный радионуклид для каждого из сложнотестируемых радионуклидов назначается исходя из степени распространенности в РАО, доступности контроля, значения коэффициента корреляции и вида функции, описывающей корреляцию. При отсутствии корреляции (коэффициент корреляции R меньше критерияльного значения) радионуклид исключается из числа реперных для данного сложнотестируемого радионуклида. В случае линейных функциональных соотношений между активностями в каждой паре радионуклидов (соотношение описывается одним коэффициентом – «коэффициент масштабирования») реперный

радионуклид назначается исходя из наименьшей неопределенности коэффициента. В случае различных функциональных соотношений между активностями сложнодетектируемого и потенциальных реперных радионуклидов реперным назначается радионуклид, для которого справедливо линейное соотношение.

Для реализации рассмотренной методологии используется общий алгоритм обработки данных о радионуклидном составе и активностях радионуклидов в РАО, позволяющий выявить корреляции и установить описывающие их функции и/или коэффициенты. Необходимо отметить, что изложенный подход в целом применим для анализа как экспериментальных, так и расчетно-теоретических данных об активностях радионуклидов в РАО. Однако при использовании расчетно-теоретических данных необходимо последующее экспериментальное подтверждение полученных соотношений и/или зависимостей путем анализа образцов реальных РАО, статистически корректной оценки значений соответствующих коэффициентов корреляции и их сопоставления с критериальным значением.

Обработка полученных экспериментальных или расчетно-теоретических данных и установление соотношений/функциональных зависимостей между активностями радионуклидов в РАО включают выполнение следующих операций.

- Определение возможности описания корреляции между активностями реперного и сложнодетектируемого радионуклидов линейной функцией:

- установление коэффициента корреляции и его сопоставление с критериальным значением (только по экспериментальным данным);

- определение параметров линейной функции, необходимых для вычислений и построения графиков зависимостей.

- Определение возможности описания корреляции между активностями реперного и сложнодетектируемого радионуклидов нелинейной функцией:

- установление коэффициента корреляции и его сопоставление с критериальным значением;

- определение параметров нелинейной функции, необходимых для вычислений и построения графиков зависимостей.

- Выполнение консервативной оценки в случае отсутствия как линейной, так и нелинейной зависимостей.

Поиск линейной зависимости осуществляется на основании предположения, что между значениями удельной активности существует прямо про-

порциональная зависимость:

$$A_{DTM} = a \cdot A_{KN}, \quad (1)$$

где A_{DTM} и A_{KN} – активности сложнодетектируемого и соответствующего ему реперного радионуклидов в рассматриваемом потоке. В этом случае справедливо соотношение:

$$\ln(A_{DTM}) = \ln(a) + \ln(A_{KN}). \quad (1a)$$

Для статистически обоснованной оценки значения искомого коэффициента пропорциональности a по экспериментальным данным, представляющим собой представительную выборку из генеральной совокупности, можно определять среднее значение этого коэффициента по средним значениям A_{DTM} и A_{KN} (так называемое арифметическое среднее) согласно (1), или среднее значение логарифма этого коэффициента по средним значениям логарифмов A_{DTM} и A_{KN} (так называемое геометрическое среднее) согласно (1a). При большом разбросе значений экспериментальных данных (несколько порядков), что характерно для результатов радиохимического анализа радионуклидного содержимого в пробах материала реальных РАО, плотность распределения которых в представительной выборке из генеральной совокупности соответствует логнормальному распределению, использование арифметических средних значений даст завышенную (консервативную) оценку фактического значения искомого коэффициента пропорциональности, использование геометрических средних значений – реалистичную.

Степень корреляции между значениями удельной активности двух радионуклидов выражается через коэффициент корреляции r . Коэффициент корреляции равен:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i) \cdot (\sum_{i=1}^n y_i)}{n}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}) \cdot (\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n})}}, \quad (2)$$

где:

$x_i = A_{KNi}$, $y_i = A_{DTMi}$ – при выполнении консервативной оценки или $x_i = \ln(A_{KNi})$, $y_i = \ln(A_{DTMi})$ – при выполнении реалистичной оценки; n – количество подвергнутых анализу проб, в которых определены активности исследуемой пары радионуклидов

(сложнодетектируемый и сопоставленный ему реперный); i – номер пробы.

Критерий наличия достаточной корреляции определяется выражением [1, 2]:

$$r \geq 0,7. \quad (3)$$

В случае выполнения критерия (3) между удельными активностями радионуклидов и их логарифмами существует статистически обоснованная линейная зависимость, для нахождения которой можно использовать метод наименьших квадратов (применяя его к соответствующим величинам).

Если критерий (3) не выполняется, оценивается наличие статистически обоснованной нелинейной зависимости между активностями сложнодетектируемого и реперного радионуклидов в виде:

$$A_{DTM} = a \cdot (A_{KN})^b, \quad (4)$$

где a и b являются константами.

Выражение (4) может быть записано в форме:

$$\ln(A_{DTM}) = \ln(a) + b \cdot \ln(A_{KN}). \quad (4a)$$

Выражение (4a) для i -ой пробы записывается в виде:

$$y_i = \ln(a) + b \cdot x_p, \quad (5)$$

где $x_i = \ln(A_{KNi})$, $y_i = \ln(A_{DTMi})$, как это определено выше для реалистичной оценки.

По результатам выполнения регрессионного анализа полученных экспериментальных или расчетно-теоретических данных обобщенным методом наименьших квадратов, получают численные коэффициенты и их неопределенности; подбираются наиболее оптимальные нелинейные характеристики (имеющие наименьшую неопределенность) для конкретной задачи.

Установленные коэффициенты и/или функции впоследствии используются при характеристике РАО. Набор коэффициентов и функций, описывающих корреляционные связи между активностями сложнодетектируемых и реперных радионуклидов в рассматриваемом потоке РАО, называют радионуклидным вектором. Радионуклидный вектор позволяет с установленной степенью достоверности оценивать активности сложнодетектируемых радионуклидов в РАО через измеренные активности реперных легкодетектируемых радионуклидов.

Результаты исследования радионуклидного состава РАО ОДЭК

На основе методологии радионуклидного вектора разработан метод оценки содержания сложнодетектируемых альфа- и бета-излучающих радионуклидов в РАО ОДЭК. Из проектного перечня РАО ОДЭК, планируемых к образованию при эксплуатации ОДЭК, выделены отходы с известным радионуклидным составом, для которых на стадии проектирования возможно обоснование процедуры паспортизации с использованием технологии радионуклидного вектора. В проектный перечень РАО ОДЭК входят технологические и нетехнологические РАО, представленные в виде конструкционных материалов отработавших тепло-выделяющих сборок (ОТВС) и твэлов отработавших фильтров операций очистки технологических сред, ионообменных смол, экстрагентов, дезактивирующих растворов, трапных вод, средств индивидуальной защиты и т.д. Можно условно выделить следующие проектные источники/процессы образования указанных РАО:

- демонтаж металлических внутриреакторных элементов;
- отработавшие фильтры и кондиционированные загрязненные технологические среды после переработки топлива в модуле фабрикации/рефабрикации (МФР);
- твердые радиоактивные отходы (ТРО) МФР после извлечения ценных компонентов;
- переработка нетехнологических РАО;
- цементирование жидких радиоактивных отходов (ЖРО).

Исследуемые РАО можно классифицировать по физико-химическому составу следующим образом:

- металлические РАО;
- остеклованные ЖРО с матрицей из боросиликатного или борофосфатного стекла;
- цементированные ЖРО;
- стекловолокно;
- керамические РАО;
- РАО смешанного состава.

Радионуклиды, определяющие активность РАО ОДЭК, могут быть разделены на три группы:

- продукты активации конструкционных материалов (^{55}Fe ; ^{60}Co ; ^{63}Ni ; ^{94}Nb и др.);
- продукты деления (в том числе активированные) ядерного топлива (^{90}Sr ; ^{99}Tc ; ^{144}Ce ; ^{134}Cs ; ^{137}Cs и др.);
- уран и трансураниевые радионуклиды.

Из указанных радионуклидов могут быть выделены очень короткоживущие (согласно классификации МАГАТЭ [4] период полураспада не более 100 дней), активность которых за время хранения должна снизиться до значений, меньших уровня отнесения отходов к РАО: ^{59}Fe ; ^{58}Co ; ^{95}Zr ; ^{95}Nb ; ^{99}Mo ; ^{103}Ru ; ^{124}Sb ; ^{239}Np ; ^{242}Am и др. Эти радионуклиды не представляют интереса для паспортизации РАО в целях захоронения, но гамма-излучатели могут быть использованы в качестве реперных для характеристики образующихся РАО с использованием технологии радионуклидного вектора.

Из приведенного перечня следует также выделить сложнодетектируемые радионуклиды, активность которых в РАО не может быть напрямую измерена неразрушающим гамма-спектрометрическим методом с использованием гамма-спектрометрической системы, входящей в состав программно-аппаратного комплекса характеристики РАО ОДЭК: ^{55}Fe ; ^{63}Ni ; ^{59}Ni ; ^{90}Sr ; ^{99}Tc ; ^{144}Pr , изотопы урана, юрия, плутония, америция и др.

Путем группировки РАО по источнику образования, физико-химическому и радионуклидному составу получено 9 потоков РАО, перечисленных в таблице. Для потоков РАО ОДЭК проектные радионуклидные векторы представляют наборы численных отношений удельных активностей радионуклидов к удельной активности реперного радионуклида в РАО. Предполагаемые радионуклидные векторы для 9 потоков РАО на момент их образования, оцененные как элементы проектной матрицы присутствия радионуклидов в РАО, также приведены в таблице.

Исследуемые твердые РАО сортируются согласно требованиям СПОРО-2002 [3] по физико-химическому составу и активности радионуклидов в 100-литровые (бидон) и 200-литровые (бочка) емкости. Исключением является размещаемый в контейнере НЗК цементный компаунд, равномерность активности и физико-химического состава которого обеспечивается на стадии перемешивания ЖРО с вяжущим материалом в смесителе.

Эти процедуры и способы размещения РАО обеспечивают снижение до приемлемого уровня неравномерности активности и физико-химического состава РАО, возможность применения неразрушающего гамма-спектрометрического метода для контроля активностей реперных гамма-излучающих радионуклидов и, как следствие, возможность применения технологии радиону-

клидного вектора для контроля активностей сложнодетектируемых радионуклидов.

Заключение

Выполнено исследование, основанное на проектных характеристиках РАО ОДЭК и демонстрирующее принципиальную возможность применения методологии радионуклидного вектора [1, 2] при характеристике реально образующихся потоков РАО ОДЭК, то есть оценке содержания сложнодетектируемых альфа- и бета-излучающих радионуклидов в РАО по матрице присутствующих гамма-излучающих радионуклидов с использованием рекомендованных в [1, 2] методов статистической обработки экспериментальных данных о радионуклидном составе и удельных активностях радионуклидов в РАО.

По проектным данным установлены элементы матрицы присутствия радионуклидов в РАО и предполагаемые радионуклидные векторы для 9 потоков РАО ОДЭК. Исходя из модельного и экспериментального подтверждения возможности регистрации радионуклида в спектре гамма-излучения РАО, назначены реперные радионуклиды: ^{60}Co , ^{95}Zr , ^{137}Cs , ^{154}Eu , ^{241}Am .

Методология радионуклидного вектора включает исследование радионуклидного состава образцов РАО и установление корреляционных связей между удельными активностями радионуклидов для различных потоков РАО, а также описывающих их функций и/или коэффициентов. Ее применение позволяет выполнить требования [5] и других нормативных документов по контролю полного перечня радиологически значимых радионуклидов в РАО при многократном сокращении затрат на их характеристику.

Перспективное направление дальнейших исследований состоит в разработке методик и технического обеспечения экспериментального исследования радионуклидного состава РАО ОДЭК, включающего отбор и подготовку проб для измерения активностей сложнодетектируемых радионуклидов, установление радионуклидных векторов, апробацию разработанных методик и технического обеспечения на макетных образцах РАО. Для подтверждения радионуклидных векторов и практического использования методологии радионуклидного вектора необходимо проведение экспериментального исследования радионуклидного состава и активностей радионуклидов в натурных образцах РАО ОДЭК.

Проектные радионуклидные векторы РАО ОДЭЖ на момент образования РАО

Номер, описание потока РАО и относительное содержание радионуклида
(содержание реперного радионуклида принято за единицу)

1. Металлические внутриреакторные элементы		2. Отрабатывшие фильтры операции фильтрации технологических сред		3. Остеклованный солевой слиток		4. Остеклованный кубовый раствор ЖРО		5. ТРО МФР	
нуклид	содержание, отн.ед.	нуклид	содержание, отн.ед.	нуклид	содержание, отн.ед.	нуклид	содержание, отн.ед.	нуклид	содержание, отн.ед.
⁵⁴ Mn	1,18E+01	⁹⁹ Tc	4,00E-05	⁸⁹ Sr	7,84E-02	¹⁴¹ Ce	1,67E-01	²³⁸ Pu	5,99E+02
⁵⁵ Fe	1,72E+01	^{99m} Tc	5,18E-03	⁹⁰ Sr	9,22E-01	¹⁵⁴ Eu*	1,00E+00	²³⁹ Pu	1,24E+02
⁵⁹ Fe	3,80E-03	⁹⁹ Mo	5,33E-03	¹²⁵ Sb	1,74E+00	¹⁵⁵ Eu	2,92E+00	²⁴⁰ Pu	1,54E+02
⁵⁸ Co	1,00E-01	¹⁰³ Ru	6,67E-02	¹²⁷ Sb	1,23E-03	¹⁴⁰ La	1,67E-01	²⁴¹ Pu	9,04E+03
⁶⁰ Co*	1,00E+00	¹⁰⁶ Ru	1,00E+00	¹²⁷ Te	7,80E-04	²⁴¹ Pu	8,33E-02	²⁴² Pu	4,82E-01
⁵⁹ Ni	7,69E-05	¹⁰⁶ Rh* (в равновесии с ¹⁰⁶ Ru)	1,00E+00	¹⁴¹ Ce	2,95E-01	²⁴¹ Am	8,33E-02	²⁴¹ Am*	1,00E+00
⁶³ Ni	2,02E-03	^{110m} Ag	1,88E-03	¹⁴⁴ Ce	1,19E+01			²³⁸ U	9,82E-04
⁹¹ Y	1,30E-05	²³⁹ Np	1,42E-04	¹⁵⁴ Eu	2,83E-01			²³⁵ U	1,26E-05
⁹⁵ Zr	7,18E-06	²⁴² Cm	2,95E-05	¹⁵⁵ Eu	7,31E-01			²³⁴ U	1,28E-04
^{93m} Nb	2,59E-01	²⁴¹ Pu	3,78E-04	¹⁴⁰ La	5,94E-02				
⁹⁴ Nb	2,57E-03			¹⁴⁴ Pr	1,19E+01				
⁹⁵ Nb	2,68E-03			¹³⁴ Cs	1,03E+00				
⁹³ Mo	9,97E-04			¹³⁷ Cs	1,06E+00				
⁹⁹ Tc	4,80E-06			^{137m} Ba* (в равновесии с ¹³⁷ Cs)	1,00E+00				
				¹⁴⁰ Ba	2,07E-02				

* Радионуклид, рекомендуемый в качестве реперного.



**Номер, описание потока РАО и относительное содержание радионуклида
(содержание реперного радионуклида принято за единицу)**

6. Керамические фильтры из системы газоочистки		7. Металлотканевые и ячейковые складчатые фильтры		8. Прессуемые и неперерабатываемые нетехнологические РАО		9. Цементный компаунд после отверждения ЖРО, трапных вод	
нуклид	содержание, отн.ед.	нуклид	содержание, отн.ед.	нуклид	содержание, отн.ед.	нуклид	содержание, отн.ед.
⁸⁶ Rb	8,23E+00	¹⁰⁶ Ru	2,00E+00	⁹⁵ Zr	4,02E-01	⁶⁰ Co*	1,00E+00
¹²⁴ Sb	6,99E+03	¹⁰⁶ Rh	8,67E+00	⁹⁵ Nb	6,00E-01	⁹⁵ Nb	2,20E-01
¹²⁵ Sb	1,33E+02	¹²⁵ Sb	2,88E+02	⁸⁹ Sr	1,18E-01	¹⁰⁶ Ru	2,40E+00
¹²⁷ Sb	7,04E+02	¹²⁷ Sb	4,33E+00	⁹⁰ Sr	3,72E-01	¹⁰⁶ Rh	2,40E+00
¹²⁷ Te	2,55E+03	¹²⁷ Te	2,87E+01	^{99m} Tc	2,82E-02	¹²⁵ Sb	1,30E-01
¹³¹ I	9,46E+02	¹⁴⁴ Ce	4,17E+00	⁹⁹ Mo	2,93E-02	¹⁴⁴ Ce	1,70E+00
¹³² I	3,43E+01	¹⁵⁴ Eu*	1,00E+00	¹⁰³ Ru	3,60E-01	¹⁵⁴ Eu	4,80E-02
¹³³ I	1,92E+04	¹⁵⁵ Eu	3,83E+00	¹⁰⁶ Ru	3,37E+00	¹⁵⁵ Eu	1,00E-01
¹³⁴ Cs	3,88E+04	¹⁴⁴ Pr	8,00E+00	¹⁰⁶ Rh	3,37E+00	¹⁴⁴ Pr	1,70E+00
¹³⁷ Cs	1,06E+00	²⁴¹ Pu	1,00E+00	^{110m} Ag	3,99E-03	¹³⁴ Cs	4,90E-01
^{137m} Ba* (в равновесии с ¹³⁷ Cs)	1,00E+00			¹²⁵ Sb	1,85E-01	¹³⁷ Cs	8,70E-01
				¹²⁷ Sb	5,60E-03		
				¹²⁷ Te	2,15E-02		
				¹⁴⁴ Ce	2,49E+00		
				¹⁵⁴ Eu	3,72E-02		
				¹⁴⁰ La	2,22E-01		
				¹⁴⁴ Pr	2,49E+00		
				¹³¹ I	1,06E-01		
				¹³² I	3,93E-02		
				¹³⁴ Cs	3,32E-01		
				¹³⁷ Cs	1,06E+00		
				^{137m} Ba* (в равновесии с ¹³⁷ Cs)	1,00E+00		
				¹⁴⁰ Ba	1,93E-01		
				²³⁹ Np	1,47E+00		
				²⁴² Cm	2,66E-01		
				²⁴⁴ Cm	3,37E-02		
				²³⁸ Pu	1,58E-01		
				²³⁹ Pu	4,35E-02		
				²⁴⁰ Pu	5,63E-02		
				²⁴¹ Pu	3,09E+00		
				²⁴¹ Am	2,45E-02		
				²⁴² Am	2,63E-03		
				^{242m} Am	2,63E-03		

* Радионуклид, рекомендуемый в качестве реперного.

Список литературы

1. IAEA Nuclear Energy Series NW-T-1.18. Determination and use of scaling factors for waste characterization in NPP. IAEA, Vienna, Austria, 2009.
2. ISO 21238-2007. Scaling factor method to determine the radioactivity of low- and intermediate-level radioactive waste packages generated at nuclear power plants.
3. СП 2.6.6.1168-02. Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами (СПОРО-2002).
4. Классификация радиоактивных отходов. Руководство по безопасности № GSG-1. МАГАТЭ, Вена, Австрия, 2014.
5. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения. НП-093-14: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2014 г. № 572.

References

1. IAEA Nuclear Energy Series NW-T-1.18. Determination and Use of Scaling Factors for Waste Characterization in NPP. IAEA, Vienna, Austria, 2009.
2. ISO 21238-2007. Scaling Factor Method to Determine the Radioactivity of Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste Packages Generated at Nuclear Power Plants.
3. SP 2.6.6.1168-02. Sanitary Rules for Radioactive Waste Management (SPORO-2002).
4. Classification of Radioactive Waste. Safety Standards Series No.GSG-1. IAEA, Vienna, Austria, 2014.
5. Federal Regulations and Rules in the Field of Atomic Energy Use. Criteria for Accepting Radioactive Waste for Disposal. NP-093-14: approved by the Order of the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of Russia No. 572 of December 15, 2014.

