ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 59968— 2021

РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

Определение радиационных характеристик для передачи на захоронение

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2022

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Акционерным обществом «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (АО «ВНИИАЭС»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 322 «Атомная техника»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 декабря 2021 г. № 1866-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Оформление. ФГБУ «РСТ», 2022

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины, определения, сокращения и обозначения 2
3.1 Термины и определения 2
3.2 Сокращения 3
3.3 Обозначения 4
4 Общие положения 4
5 Перечень контролируемых в радиоактивных отходах радионуклидов 5
6 Организация контроля радиационных характеристик радиоактивных отходов атомных станций 7
6.1 Общие требования к организации контроля 7
6.2 Потоки и технологические цепочки обращения с радиоактивными отходами атомных станций . . 8
6.3 Методы радиационного контроля радиоактивных отходов атомных станций 8
6.4 Процедуры радиационного контроля 11
7 Определение категории и класса радиоактивных отходов для передачи на захоронение 14
Приложение А (обязательное) Процедура определения перечня контролируемых радионуклидов . . 16
Приложение Б (обязательное) Потоки радиоактивных отходов атомных станций и производственно-технологические цепочки обращения с ними 23
Приложение В (обязательное) Процедура установления радионуклидного вектора 26
Библиография 34

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

Определение радиационных характеристик для передачи на захоронение

Radiactive waste produced by nuclear power plants. Radiation characteristics determination for transfer to disposal

Дата введения — 2022—03—01

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт распространяется на радиоактивные отходы, образующиеся на атомных станциях с реакторными установками различного типа в условиях их нормальной эксплуатации, отклонений от нормальной эксплуатации, вывода из эксплуатации, и устанавливает принципы, критерии и процедуру определения перечня контролируемых в радиоактивных отходах атомных станций радионуклидов, требования к организации и проведению контроля радиационных характеристик радиоактивных отходов атомных станций для передачи на захоронение, порядок определения категории и класса радиоактивных отходов для передачи на захоронение.

1.2 Настоящий стандарт предназначен для применения эксплуатирующими, проектными, научными организациями, а также специализированными организациями, выполняющими работы и (или) оказывающими услуги эксплуатирующим организациям по обращению с образующимися и накопленными радиоактивными отходами, при определении радиационных характеристик радиоактивных отходов атомных станций для передачи на захоронение национальному оператору по обращению с радиоактивными отходами в соответствии с [1].

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 8.638 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение радиационного контроля. Основные положения

ГОСТ 26874 Спектрометры энергий ионизирующих излучений. Методы измерения основных параметров

ГОСТ 28271 Приборы радиометрические и дозиметрические носимые. Общие технические требования и методы испытаний

ГОСТ Р ИСО 9000 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

Издание официальное

3 Термины, определения, сокращения и обозначения

3.1 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ 8.638, ГОСТ Р ИСО 9000, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1

захоронение радиоактивных отходов: Безопасное размещение радиоактивных отходов в пункте захоронения радиоактивных отходов без намерения их последующего извлечения.

[[2], статья 3, пункт 8]

3.1.2

критерии приемлемости радиоактивных отходов для их захоронения: Требования к физико-химическим свойствам радиоактивных отходов и упаковкам радиоактивных отходов, установленные в целях безопасного захоронения радиоактивных отходов и обязательные для исполнения.

[[2], статья 3, пункт 4]

3.1.3 **контейнеризация радиоактивных отходов:** Размещение радиоактивных отходов в контейнере.

3.1.4

масштабирующий коэффициент: Коэффициент прямой пропорциональной зависимости между удельной активностью сложнодетектируемого радионуклида и удельной активностью реперного радионуклида в радиоактивных отходах.

[[3], приложение 1]

3.1.5

метод радионуклидных отношений (метод радионуклидного вектора): Совокупность подходов к построению функциональной зависимости между активностью сложнодетектируемых радионуклидов и активностью реперных радионуклидов в радиоактивных отходах, основанных на выявлении статистических корреляций между указанными активностями или на физических закономерностях, обуславливающих эту зависимость.

[[3], приложение 1]

3.1.6 **морфология радиоактивных отходов:** Совокупность признаков радиоактивных отходов, отражающих их происхождение, физические и химические свойства.

3.1.7

обращение с радиоактивными отходами: Деятельность по сбору, сортировке, переработке, кондиционированию, перевозке, хранению и захоронению радиоактивных отходов.

[[2], статья 3]

3.1.8

радиоактивные отходы: Не подлежащие дальнейшему использованию материалы и вещества, а также оборудование, изделия (в том числе отработавшие источники ионизирующего излучения), содержание радионуклидов в которых превышает уровни, установленные в соответствии с определенными критериями.

[[4], статья 3]

Примечание — Критерии установлены в соответствии с [5].

3.1.9

паспорт радиоактивных отходов: Основной учетный документ, оформляемый при кондиционировании радиоактивных отходов, содержащий все необходимые учетные данные о радиоактивных отходах, включая данные об их количестве и характеристиках.

[[6], пункт 7]

3.1.10 **паспортизация радиоактивных отходов:** Процедура оформления паспорта радиоактивных отходов.

3.1.11 **потенциальная опасность радиоактивных отходов:** Состояние радиоактивных отходов, при котором удельные активности радионуклидов в них превышают установленные уровни отнесения отходов к радиоактивным.

3.1.12 **потоки радиоактивных отходов:** Группа радиоактивных отходов, выделенная из совокупности всех радиоактивных отходов, образующихся при эксплуатации атомной станции, на основании общих для всех радиоактивных отходов, входящих в группу, характеристик: механизма образования радиоактивных отходов, морфологического и радионуклидного состава, способа переработки и кондиционирования.

3.1.13 **представительная выборка проб (представительные пробы):** Выборка проб, извлеченных из общего объема объекта контроля в соответствии с процедурой отбора проб, предназначенной для обеспечения содержания контролируемых компонентов объекта контроля в тех же пропорциях, в которых они присутствуют в его общем объеме.

3.1.14 **производственно-технологическая цепочка:** Последовательность взаимосвязанных операций по обращению с радиоактивными отходами атомной станции, выполняемых для приведения радиоактивных отходов в соответствие критериям приемлемости и передачи на захоронение.

3.1.15 **радионуклидный вектор:** Установленный расчетным или экспериментальным путем, в том числе по результатам установления масштабирующих коэффициентов или параметров линейной регрессии, для данного потока радиоактивных отходов набор функциональных соотношений между удельными активностями сложнодетектируемых и реперных радионуклидов или относительных вкладов радионуклидов в суммарную удельную активность радиоактивных отходов.

3.1.16

реперный радионуклид: Излучающий фотонное или нейтронное ионизирующие излучение радионуклид, активность которого в радиоактивных отходах статистически коррелирует или связана на основании физической закономерности с активностью сложнодетектируемого радионуклида и при этом может быть измерена в упаковке (партии) этих радиоактивных отходов методами неразрушающего измерений (измерений без осуществления пробоотбора).

[[3], приложение 1]

3.1.17

сложнодетектируемый радионуклид: Радионуклид, активность которого в радиоактивных отходах подлежит контролю в соответствии с нормативными правовыми актами, устанавливающими требования по безопасному обращению с радиоактивными отходами, и активность которого в упаковке (партии) радиоактивных отходов не может быть определена без использования методов разрушающего контроля.

[[3], приложение 1]

3.1.18 **характеризация радиоактивных отходов:** Процесс определения характеристик радиоактивных отходов, требуемых для установления радионуклидного состава, удельной активности радионуклидов, категории и класса радиоактивных отходов с целью подтверждения соблюдения критериев приемлемости радиоактивных отходах для захоронения.

3.2 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

АС — атомная станция;

ВАО — высокоактивные радиоактивные отходы;

ЖРО — жидкие радиоактивные отходы;

МАГАТЭ — Международное агентство по атомной энергии;

МАЭД — мощность амбиентного эквивалента дозы;

НПИ — нижний предел измерений;

ОЗИИИ — отработавшие закрытые источники ионизирующего излучения;

ОИОС — отработанные ионообменные смолы;

ОТВС — отработавшая тепловыделяющая сборка;

ПЗРО — пункт захоронения радиоактивных отходов;

ПЗУА — предельное значение удельной активности;
РАО — радиоактивные отходы;
РВ — радиоактивные вещества;
РК — радиационный контроль;
САО — среднеактивные радиоактивные отходы;
СИ — средство измерений;
СИЗ — средства индивидуальной защиты;
СОБ — счетный образец;
ТРО — твердые радиоактивные отходы;
УГУ — установка глубокого упаривания;
ФИФ ОЕИ — Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений;
ЭВМ — электронная вычислительная машина.

3.3 Обозначения

В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

$A_{i,0}$ — удельная активность i-го радионуклида на момент времени t_0, соответствующий проведению характеризации РАО, Бк/г;

$A_i(t)$ — удельная активность i-го радионуклида на момент времени t, Бк/г;

A_i^j — удельная активность i-го радионуклида в j-й пробе, Бк/г;

A_i^{max} — максимально возможная для данного типа (потока) РАО удельная активность i-го радионуклида или группы радионуклидов, Бк/г;

A_0^{max} — максимальное возможное исходя из технологического процесса образования значение суммарной удельной активности радионуклидов для данного типа (потока) РАО, Бк/г;

$A_{СДР,k}$ — удельная активность k-го сложнодетектируемого радионуклида, Бк/г;

$\overline{v^j}$ ($\overline{v^j} = (v_1^j, \ldots, v_n^j)$) — радионуклидный вектор, представляющий собой вектор из значений относительного вклада отдельных радионуклидов в суммарную удельную активность;

I_i — индекс РАО по i-му радионуклиду, равный отношению удельной активности радионуклида к соответствующему значению ПЗУА для твердых РАО;

$T_{РАО}$ — период времени, в течение которого отходы относятся к радиоактивным в соответствии с установленными критериями, лет;

$t_{ПЗРО}$ — момент времени, соответствующий закрытию ПЗРО;

λ_i — постоянная распада i-го радионуклида в ТРО, год$^{-1}$;

$ПЗУА_i$ — предельное значение удельной активности i-го радионуклида для отнесения к ТРО [5], Бк/г;

K_k — масштабирующий коэффициент, описывающий соотношение между удельной активностью реперного радионуклида и удельной активностью k-го сложнодетектируемого радионуклида в РАО;

a_k, b_k — параметры степенной функции, описывающей соотношение между удельной активностью реперного радионуклида и удельной активностью k-го сложнодетектируемого радионуклида в РАО;

$f_r^D(\dot{D})$ — функция, описывающая соотношение между мощностью дозы гамма-излучения от упаковки с РАО $\dot{D}$, Зв/ч и удельной активностью реперного радионуклида r, Бк/кг, в упаковке;

$f_k^D(\dot{D})$ — функция, описывающая соотношение между мощностью дозы гамма-излучения от упаковки с РАО и удельной активностью сложнодетектируемого радионуклида k в упаковке;

$f_k^{акт}(A_r)$ — функция, описывающая соотношение между удельной активностью реперного радионуклида и удельной активностью k-го радионуклида в ТРО, установленная расчетным способом.

4 Общие положения

4.1 Для определения класса и подтверждения соответствия РАО АС критериям приемлемости для захоронения в ПЗРО необходимо выполнить их характеризацию. Основными характеристиками отходов, определяющими класс РАО АС и их радиологическую опасность, являются радионуклидный состав и удельные активности радионуклидов.

4.2 Средства, методы и объем РК характеристик РАО определяют с учетом:

- характеристик контролируемого потока РАО (физико-химические характеристики, в том числе гомогенность РАО, производственно-технологические цепочки обращения с потоком, включая способы переработки и кондиционирования, уровни удельной активности радионуклидов);
- перечня контролируемых радионуклидов.

4.3 На основе информации о производственно-технологических цепочках обращения с контролируемым потоком РАО определяют этапы обращения, на которых РК является наиболее представительным и требует минимальных затрат. При этом необходимо учитывать все этапы обращения с потоком РАО, включая сбор, сортировку, переработку, кондиционирование и хранение в соответствии с [7], а также процессы образования РАО.

4.4 Определение радиационных характеристик РАО должно быть основано на применении комбинации следующих методов:

- метод неразрушающего контроля на основе применения гамма-спектрометрических установок (паспортизаторов РАО, переносных или мобильных гамма-спектрометров), а также СИ МАЭД гамма-излучения;
- метод разрушающего контроля, включающий отбор представительных проб, подготовку и измерение счетных образцов методами альфа-, бета-радиометрии, альфа-, бета-, гамма-спектрометрии, жидкосцинтилляционной-спектрометрии и масс-спектрометрии;
- расчетный метод;
- метод радионуклидного вектора.

4.5 Для организации и проведения РК РАО должен быть определен перечень контролируемых радионуклидов.

4.6 Перечень контролируемых в РАО радионуклидов должен включать радионуклиды, формирующие значимый вклад в потенциальную опасность РАО, и не должен приводить к необоснованному увеличению объема РК при характеризации РАО.

4.7 Сформированный перечень контролируемых радионуклидов должен позволять получать необходимый и достаточный объем информации:

- для обоснования безопасности при обращении с РАО, передаваемыми на захоронение или хранение Национальному оператору по обращению с РАО;
- обеспечения подтверждения соответствия РАО критериям приемлемости для захоронения, в том числе определения класса РАО для захоронения.

4.8 Перечень радионуклидов устанавливают для отдельных потоков РАО, для блока или АС в целом, для блоков одного типа разных АС исходя из особенностей технологических процессов образования РАО на АС и должен включать две группы радионуклидов:

- радионуклиды, значимые с точки зрения обеспечения долговременной безопасности при захоронении РАО, включаемые в паспорт РАО и учитываемые при определении класса РАО;
- радионуклиды, значимые с точки зрения обеспечения безопасности до закрытия ПЗРО, включаемые в паспорт РАО и не учитываемые при определении класса РАО.

4.9 По результатам РК РАО определяют класс РАО для захоронения. Классификацию РАО АС осуществляют в соответствии с установленными критериями [5].

5 Перечень контролируемых в радиоактивных отходах радионуклидов

5.1 Перечень контролируемых в РАО АС радионуклидов формируется исходя:

- из возможности присутствия в РАО АС радионуклидов в существенных количествах, обусловленной технологическим процессом, приводящим к образованию РАО АС;
- значимости вклада радионуклидов в потенциальную опасность РАО АС как при текущем обращении до захоронения РАО АС, так и после закрытия ПЗРО.

5.2 Возможность присутствия радионуклида определяют на основе рассмотрения технологических характеристик реакторной установки и особенностей ее эксплуатации с учетом исключения очень короткоживущих радионуклидов с периодом полураспада менее 15 сут.

Примечание — Для исключаемых радионуклидов должен быть выполнен критерий, указанный в 5.2.1. Если в группу радионуклидов, сформированную на основе данного критерия, попадают реперные радионуклиды, то они не подлежат исключению из перечня подлежащих контролю радионуклидов.

5.2.1 Существенность содержания радионуклида в РАО определяют следующим критерием, при выполнении которого группа радионуклидов может быть исключена из перечня подлежащих контролю радионуклидов, указываемых в паспорте РАО:

- сумма отношений максимально возможных для данного типа (потока) РАО удельных активностей группы радионуклидов A_i^{max}, Бк/г, к соответствующим установленным в [5] предельным значениям удельной активности для отнесения к РАО ПЗУА$_i$, Бк/г, не превышает 0,01:

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{A_i^{max}}{\text{ПЗУА}_i} \le 0{,}01, \tag{5.1}$$

где k — число радионуклидов, для которых выполняют оценку соблюдения критерия.

5.2.2 Если предельные значения удельной активности для радионуклида не установлены, вместо ПЗУА$_i$ в формуле (5.1) следует использовать значения:

- 1 Бк/г — для альфа-излучающих радионуклидов;
- 100 Бк/г — для бета-излучающих радионуклидов.

5.2.3 Максимальные возможные значения удельной активности радионуклидов A_i^{max} определяют на основе:

- данных системы учета и контроля РВ и РАО АС;
- результатов экспериментальных и расчетно-теоретических работ по определению/оценке радионуклидного состава и удельных активностей радионуклидов в РАО АС;
- анализа технологического процесса образования и обращения с РАО АС;
- проектной и эксплуатационной документации АС.

5.3 Совокупный вклад радионуклидов в потенциальную опасность РАО считают значимым, если их суммарный вклад в дозу планируемого и потенциального облучения персонала и населения, создаваемую в период времени, в течение которого отходы относятся к радиоактивным, составляет не менее 99 %.

Данный критерий используют для формирования перечня радионуклидов, указываемых в паспорте РАО.

Для практической реализации дозовый критерий формулируют в терминах ПЗУА:

- из перечня контролируемых радионуклидов можно исключить радионуклиды, вклад которых в сумму отношений удельных активностей радионуклидов в РАО к их ПЗУА в период времени, в течение которого отходы относятся к радиоактивным, составляет менее 1 %:

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{A_i(t)}{\text{ПЗУА}_i} < 0{,}01 \cdot \sum_{j=1}^{n} \frac{A_j(t)}{\text{ПЗУА}_j} \text{ в любой момент времени } t \in \left[t_0; t_0 + T_{\text{РАО}}\right], \tag{5.2}$$

где k — число радионуклидов, для которых выполняют оценку соблюдения критерия;

n — число радионуклидов в исходном перечне;

$A_i(t) = A_{i,0} \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t)$ — удельная активность радионуклида в момент времени t (при необходимости учитывают образование радионуклида в процессе распада материнского радионуклида), Бк/г;

$A_{i,0}$ — удельная активность радионуклида в момент времени t_0, Бк/г;

t_0 — момент времени, лет, соответствующий проведению характеризации РАО (t_0 = 0 лет);

λ_i — постоянная распада i-го радионуклида в ТРО, год$^{-1}$;

$T_{\text{РАО}}$ — период времени, в течение которого отходы относят к радиоактивным, лет, определяемый путем решения уравнения:

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{A_i(t_0) \cdot \exp\left(-\lambda_i \cdot T_{\text{РАО}}\right)}{\text{ПЗУА}_i} = 1. \tag{5.3}$$

5.4 Перечень контролируемых в РАО АС радионуклидов устанавливают на основе исходных данных, включающих:

- перечень радионуклидов, определенный в критериях приемлемости РАО АС для захоронения в ПЗРО, в котором планируется захоронение контролируемых РАО АС (при наличии);

- расширенный перечень радионуклидов, потенциально присутствующих в РАО АС и потенциально влияющих на безопасность на всех этапах обращения с РАО АС (см. таблицу А.1 приложения А);
- проектную и эксплуатационную документацию АС;
- перечень типов (потоков) и характеристик РАО, образующихся на АС и передаваемых (планируемых к передаче) на захоронение;
- данные системы учета и контроля РВ и РАО АС;
- результаты экспериментальных и расчетно-теоретических работ по определению/оценке радионуклидного состава и удельных активностей радионуклидов в РАО АС.

5.5 Процедура определения перечня контролируемых радионуклидов изложена в приложении А.

Результатом применения процедуры являются:
- перечень радионуклидов, контролируемых в РАО;
- перечень радионуклидов, учитываемых при определении класса РАО для захоронения.

5.6 Полученные в результате выполнения процедур перечни контролируемых и учитываемых при определении класса РАО радионуклидов оформляются в виде отдельного документа или в составе отчета с его обоснованием и включаются в эксплуатационную и/или проектную документацию АС в соответствии с [1].

5.7 Перечень контролируемых радионуклидов подлежит корректировке при:
- определении ПЗРО, в который будут направлены РАО для захоронения с целью обеспечения соответствия критериям приемлемости РАО для захоронения в ПЗРО либо при внесении изменений в критерии приемлемости определенного ПЗРО, если при этом устанавливают дополнительные требования к перечню радионуклидов;
- изменениях технологических процессов обращения с РАО, включая процессы переработки и кондиционирования РАО, приводящих к изменению радионуклидного состава образующихся РАО;
- изменении режима эксплуатации АС и в случае иных событий, включая аварии, потенциально приводящих к изменению радионуклидного состава РАО.

Корректировку данных выполняют в порядке, аналогичном процедуре установления перечня.

6 Организация контроля радиационных характеристик радиоактивных отходов атомных станций

6.1 Общие требования к организации контроля

6.1.1 РК РАО выполняют в соответствии с регламентом (программой) РК АС на различных этапах обращения с РАО.

6.1.2 РК РАО должен обеспечивать получение информации, необходимой и достаточной для определения класса РАО и подтверждения их соответствия критериям приемлемости для захоронения по радиационному фактору.

6.1.3 Контролируемыми являются следующие радиационные параметры:
- радионуклидный состав содержимого упаковки РАО;
- удельные активности каждого радионуклида из перечня радионуклидов, контролируемых в РАО;
- суммарные удельные активности: долгоживущих радионуклидов, трансурановых радионуклидов, альфа-излучающих радионуклидов (за исключением трансурановых), бета-, гамма-излучающих радионуклидов, трития;
- общая (суммарная) активность упаковки с РАО;
- содержание ядерно-опасных делящихся нуклидов.

6.1.4 Измерения выполняют по аттестованным методикам измерений с применением поверенных СИ утвержденного типа (сведения о поверке должны содержаться в ФИФ ОЕИ).

6.1.5 Организация контроля радиационных характеристик РАО АС должна быть основана на выборе оптимальной комбинации средств, методов контроля и объема инструментального контроля РАО АС с учетом:
- морфологии контролируемых РАО АС на различных этапах производственно-технологической цепочки;
- гомогенности РАО АС;
- возможности применения неразрушающих и разрушающих методов измерений;
- возможности расчетного определения характеристик РАО АС исходя из технологического процесса их образования и обращения с ними;

- технологических характеристик системы обращения с РАО АС;
- перечня контролируемых радионуклидов.

6.1.6 Характеризацию ТРО в форме ОЗИИИ выполняют по фактическому наличию и паспортным данным на источник (радионуклидный состав, активность радионуклидов) с введением поправки на радиоактивный распад с учетом текущей даты.

6.1.7 Для повышения качества характеризации РАО АС при организации контроля рекомендуется предусматривать:

- периодическое проведение сличительных измерений не реже одного раза в два года, в том числе с привлечением независимых лабораторий;
- проведение выборочной оценки удельной активности контролируемых радионуклидов с применением одного и более дополнительного независимого метода;
- выполнение внутреннего контроля качества измерений, в том числе в соответствии с применяемыми аттестованными методиками измерений по 6.1.4.

6.2 Потоки и технологические цепочки обращения с радиоактивными отходами атомных станций

6.2.1 Поток РАО АС выделяется из совокупности отходов, образующихся при эксплуатации АС, на основании общих для всех РАО характеристик:

- источника образования;
- физико-химических характеристик в соответствии с требованиями [7];
- радионуклидного состава в соответствии с требованиями [7];
- гомогенности или гетерогенности;
- способов сбора, хранения, переработки в соответствии с требованиями [7] и кондиционирования.

Номенклатура потоков РАО АС приведена в приложении Б.

6.2.2 В режиме нормальной эксплуатации АС при соблюдении регламентов эксплуатации блоков, технологических регламентов эксплуатации оборудования, регламентов и инструкций по обращению с РАО радионуклидный состав и соотношения между удельными активностями радионуклидов для каждого потока РАО сохраняют значения в пределах стабильных интервалов.

6.2.3 Для определения этапов обращения с РАО, на которых РК является наиболее представительным и наименее затратным, проводят сбор и анализ информации о производственно-технологической цепочке обращения с потоком РАО.

Схемы производственно-технологических цепочек обращения с РАО АС с указанием выполняемого на отдельных этапах РК приведены на рисунках Б.1—Б.5 (приложение Б).

6.3 Методы радиационного контроля радиоактивных отходов атомных станций

Для определения радиационных характеристик РАО АС (удельная активность контролируемых радионуклидов, суммарная активность радионуклидов в упаковке) допускается применение как экспериментальных (инструментальных), так и расчетных методов контроля. Расчетные методы должны быть основаны на результатах предварительных прямых и (или) косвенных измерений значений контролируемых параметров.

Методы контроля радионуклидов в РАО АС разделяют на четыре группы:

- метод неразрушающего контроля;
- метод разрушающего контроля;
- расчетные методы;
- метод радионуклидного вектора.

6.3.1 Метод неразрушающего контроля

6.3.1.1 Метод рассчитан на измерение удельной активности радионуклидов типовых потоках РАО АС, размещенных в контейнерах. Для применения метода РАО АС должны быть предварительно отсортированы по физико-химическому составу и уровню активности и размещены в стандартной измерительной геометрии с распределением плотности и активности по объему контейнера, близким к равномерному. Метод применяют ко всем потокам РАО АС. Метод основан на проведении гамма-спектрометрических измерений и предназначен для определения активности и удельной активности в РАО АС радионуклидов, распад которых сопровождается гамма-излучением, с энергией и интенсивностью достаточными для регистрации энергией и интенсивностью (в частности, радионуклидов ^{60}Co, ^{137}Cs,

^{134}Cs, ^{54}Mn, ^{94}Nb и др.), без вскрытия упаковки и отбора проб. Рекомендации по применению метода гамма-спектрометрии при контроле радиоактивных отходов приведены в [8].

6.3.1.2 К неразрушающему контролю также относят измерение МАЭД гамма-излучения от упаковки с РАО.

6.3.1.3 Измерение МАЭД гамма-излучения от упаковки выполняют для упаковки кондиционированных РАО с целью подтверждения соответствия критериям приемлемости для захоронения. При известных радионуклидном составе РАО и соотношениях между удельными активностями радионуклидов измерение МАЭД гамма-излучения от упаковки с РАО может быть проведено для определения удельных активностей радионуклидов.

6.3.1.4 Применение метода для контроля упаковки с РАО предусматривает:

- сортировку отходов перед их размещением в упаковке по морфологии;
- распределение плотности и активности по объему упаковки, близкое к равномерному;
- знание насыпной плотности и морфологии отходов, размещенных в упаковке;
- фиксацию геометрии измерения.

6.3.1.5 Метод рассчитан на применение гамма-спектрометрического комплекса (гамма-спектрометра) с полупроводниковым или сцинтилляционным блоком детектирования достаточного разрешения (требования к разрешению определяют радионуклидным составом контролируемых отходов) согласно ГОСТ 26874, либо дозиметра гамма-излучения в соответствии с ГОСТ 28271 (при известных радионуклидном составе РАО и соотношениях между удельными активностями радионуклидов).

6.3.2 Метод разрушающего контроля

6.3.2.1 Метод разрушающего контроля основан на отборе и анализе представительных проб контролируемого потока РАО АС с применением различных методов селективного выделения радионуклидов и подготовки счетных образцов, по результатам которого определяют удельные активности радионуклидов в пробах. Требования к счетным образцам и процедуры их подготовки должны быть изложены в применяемых аттестованных методиках измерений удельной активности радионуклидов, что гарантирует получение результатов с установленными значениями показателей точности. Примеры требований к счетным образцам и процедурам их подготовки для измерения активности различных радионуклидов приведены в [9].

6.3.2.2 Разрушающий контроль дает возможность наиболее точно выполнять измерение активностей радионуклидов в РАО АС по более полному по сравнению с неразрушающим методом перечню радионуклидов, включая ^{3}H, ^{14}C, ^{36}Cl, ^{54}Mn, ^{59}Ni, ^{63}Ni, ^{60}Co, ^{90}Sr, ^{94}Nb, ^{99}Tc, ^{59}Ni, ^{129}I, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{94}Nb, ^{110m}Ag, ^{125}Sb, ^{237}Np, ^{241}Am, изотопы U, Pu и др.

6.3.2.3 Детальный анализ радионуклидного состава и удельных активностей радионуклидов в лабораторных условиях на основе разрушающих методов необходим для установления радионуклидных векторов (6.3.4).

6.3.2.4 Разрушающий контроль применяют при характеризации всех потоков РАО (отверждаемые ЖРО, сжигаемые, прессуемые, неперерабатываемые), кроме высокоактивных активированных элементов реакторной установки, характеризацию которых проводят методами, указанными в 6.3.3.

6.3.2.5 При разрушающем контроле проводят лабораторный анализ проб РАО с применением радиохимической подготовки, спектрометрических и радиометрических методов измерений активности радионуклидов в соответствии с ГОСТ 26874, ГОСТ 8.638.

6.3.3 Расчетный метод

6.3.3.1 Расчетные методы предполагают определение активности радионуклидов на основе математического моделирования процессов образования и распространения радионуклидов в цепочках технологических процессов до образования конкретных РАО.

6.3.3.2 Метод применяют для расчета:

- радионуклидного состава и активности радионуклидов в РАО, образовавшихся в результате активации материалов в поле нейтронов (рекомендации по проведению расчетов активации для контроля РАО приведены в [10]);
- изменения концентрации радионуклида в РАО в результате технологических операций по их переработке и кондиционированию (например, при сжигании или отверждении) на основе балансовых моделей.

6.3.3.3 Для расчета наведенной активности активированных материалов применяют специализированные программные средства моделирования переноса нейтронов в веществе и их взаимодействия с материалами активной зоны. При этом определяют активности в РАО отдельных радионуклидов —

продуктов активации: ^{51}Cr, ^{54}Mn, ^{55}Fe, ^{59}Fe, ^{57}Co, ^{60}Co, ^{59}Ni, ^{63}Ni, ^{94}Nb и др. Для расчета необходима детальная информация о характеристиках активной зоны, включая элементный состав материалов вплоть до примесных и следовых количеств химических элементов, режимах и истории эксплуатации.

6.3.3.4 Для применения балансовых моделей необходимы исходные данные о концентрации контролируемых радионуклидов в отходах до переработки и параметры технологического процесса, приводящего к изменению концентрации радионуклидов в РАО. Балансовые модели применяют, в частности, для расчета концентрации трития в отверждаемых ЖРО.

6.3.3.5 Расчетный метод полностью не исключает необходимости проведения инструментального РК РАО. Реализация метода требует проведения в ограниченном объеме экспериментальных исследований радионуклидного состава и удельных активностей радионуклидов в контролируемых РАО с целью валидации и верификации полученных данных.

6.3.4 Метод радионуклидного вектора

6.3.4.1 Метод радионуклидного вектора основан на комплексном подходе, при котором по результатам разрушающего контроля РАО и статистической обработки данных определяют закономерности радиационных характеристик РАО, позволяющие в дальнейшем при проведении рутинного контроля ограничиваться неразрушающим измерением активности нескольких реперных радионуклидов, а активности остальных сложнодетектируемых радионуклидов определять расчетным способом. Применение этой методологии требует соблюдения установленных на АС производственно-технологических цепочек, что позволяет ожидать стабильности характеристик РАО в рамках одного потока и установленного периода времени.

6.3.4.2 Для паспортизации контейнеризованных РАО проводят измерение неразрушающим гамма-спектрометрическим методом удельной активности в РАО легкодетектируемых гамма-излучающих радионуклидов из контролируемого перечня, включая реперные радионуклиды, Бк/г, или МАЭД гамма-излучения паспортизуемых РАО, Зв/ч, по аттестованным методикам.

По результатам измерений удельной активности реперных радионуклидов с применением установленных по приложению В масштабирующих коэффициентов или параметров линейной регрессии определяют удельную активность контролируемых сложнодетектируемых радионуклидов $A_{СДР,k}$, Бк/г, по формуле

$$A_{СДР,k} = K_k \cdot A_r \quad (6.1)$$

или

$$A_{СДР,k} = a_k \cdot (A_r)^{b_k}, \quad (6.2)$$

где A_r — удельная активность реперного радионуклида, Бк/г;

K_k, a_k, b_k — масштабирующий коэффициент или параметры степенной функции, описывающей соотношение между удельной активностью реперного радионуклида и удельной активностью k-го сложнодетектируемого радионуклида в РАО, установленные в соответствии с приложением В.

Удельная активность реперных и сложнодетектируемых радионуклидов $A_r \cdot (A_{СДР,k})$ может быть определена по результатам измерений МАЭД гамма-излучения паспортизуемых РАО с применением соответствующих аттестованных методик

$$A_r = f_r^D(\dot{D}), \quad (6.3а)$$

$$A_{СДР,k} = f_k^D(\dot{D}), \quad (6.3б)$$

где $f_r^D(\dot{D})$, $f_k^D(\dot{D})$ — функции, описывающие соотношение между измеренной мощностью дозы гамма-излучения от упаковки с РАО $\dot{D}$, Зв/ч, и удельной активностью реперного радионуклида A_r, Бк/г, или k-го сложнодетектируемого радионуклида $A_{СДР,k}$, Бк/г, в упаковке, определяемая на основе радионуклидного состава, удельных активностей гамма-излучающих радионуклидов, соотношений между реперными и сложнодетектируемыми радионуклидами, физико-химических характеристик упаковки РАО и геометрии измерений.

При наличии в перечне контролируемых радионуклидов, период полураспада которых менее чем в 10 раз превышает время t, прошедшее от установления радионуклидного соотношения до характеризации, при расчете активности радионуклидов следует учитывать поправки на распад.

6.4 Процедуры радиационного контроля

6.4.1 Радиационный контроль отверждаемых жидких радиоактивных отходов

6.4.1.1 Для характеризации отверждаемых ЖРО выполняют РК на этапах до и после отверждения и при паспортизации контейнеризированных отверждаемых ЖРО согласно требованиям [7], как показано на рисунке Б.1 (приложение Б). Кроме того, с целью определения характеристик ЖРО может выполняться исследование содержания радионуклидов в жидких технологических средах, в результате переработки которых образуются контролируемые ЖРО.

Как правило, в ходе эксплуатации систем обращения с ЖРО происходит последовательное заполнение емкостей для хранения ЖРО и их перевод в режим опорожнения на переработку. Такой режим позволяет проводить контроль ЖРО по следующему алгоритму:

а) после заполнения емкость с ЖРО отсекается на прием ЖРО;

б) выполняют гомогенизацию содержимого емкости путем его перемешивания;

в) осуществляют отбор проб с разных глубин емкости: не менее трех проб при высоте заполнения емкости менее 3 м; не менее пяти проб при высоте заполнения емкости 3 м и более; пробы анализируют по установленному перечню радионуклидов с применением аттестованных методик измерений; вычисляют средние значения удельной активности радионуклидов;

г) анализируют гомогенность в соответствии со следующим критерием:

1) к гомогенным РАО относят РАО, в которых относительный разброс содержания радионуклидов с доверительной вероятностью $P = 0,95$ не превышает 30%,

д) если гомогенность не подтверждается, повторяют перемешивание по перечислению б) и операции по перечислениям в), г).

По результатам анализа удельной активности радионуклидов в пробах устанавливают радионуклидный вектор отверждаемых ЖРО по процедуре, приведенной в приложении В. Установленный таким образом радионуклидный вектор распространяется только на ТРО, образовавшие при отверждении ЖРО из контролируемой емкости.

6.4.1.2 При отсутствии возможности обеспечить переработку всего содержимого емкости без поступления в процессе переработки новых ЖРО проводят исследование по установлению радионуклидых векторов для потока ЖРО в целом. Исследование должно включать отбор представительной выборки проб ЖРО из всех эксплуатируемых емкостей, подготовку счетных образцов, анализ удельной активности всего перечня контролируемых радионуклидов в подготовленных СОБ с применением аттестованных методик. По результатам анализа удельной активности радионуклидов в пробах устанавливают радионуклидный вектор для потока ЖРО по процедуре, приведенной в приложении В.

6.4.1.3 В зависимости от применяемого метода переработки варьируются подходы к организации РК ЖРО.

6.4.1.4 Если ЖРО отверждаются с применением методов цементирования и битумирования без предварительного упаривания, в конечном продукте удельные активности всех контролируемых радионуклидов изменяются в одинаковой пропорции, которая определена степенью разбавления добавляемыми связующими веществами. Установленный для исходных ЖРО радионуклидный вектор распространен на кондиционированные РАО. Контроль содержания радионуклидов в отверждаемых ЖРО в этом случае проводят с применением установленного радионуклидного вектора по процедуре 6.3.4.2.

6.4.1.5 Если ЖРО отверждаются с применением методов цементирования и битумирования с предварительным упариванием, возможно перераспределение отдельных радионуклидов в газоаэрозольную фазу, а также концентрирование трития в форме тритиевой воды в процессе упаривания. На каждом этапе обращения с ЖРО и/или жидкими технологическими средами в результате снижения влагосодержания в процессе упаривания и образования сред с повышенным солесодержанием (кубовый остаток, концентрат кубового остатка), а также добавления дополнительных компонентов (цемента, бентонитовой глины, ионообменной смолы и др.) изменяется удельная активность контролируемых радионуклидов. При этом в процессе упаривания удельная активность одних радионуклидов (например, трития в форме тритиевой воды) может снижаться, а других радионуклидов (присутствующих в ЖРО в форме солей и кристаллогидратов) — увеличиваться. В режиме нормальной эксплуатации АС при соблюдении технологических регламентов эксплуатации оборудования, регламентов и инструкций по обращению с РАО коэффициент разбавления радионуклида в процессе переработки ЖРО и их последующего отверждения остается стабильным для каждой из установленных распорядительными документами рецептур отверждения РАО.

Удельную активность радионуклида в отверждаемых ЖРО определяют на основе измерения его удельной активности в исходных ЖРО и/или жидких технологических средах в емкостях перед переработкой и дальнейшего расчета удельной активности в конечном отвержденном продукте с учетом производственно-технологической цепочки переработки (см. приложение Б). При этом для подтверждения перераспределения отдельных радионуклидов в газоаэрозольную фазу при упаривании необходимо проводить измерения их активности в дистилляте.

Измерение удельной активности k-го радионуклида A_k^0, Бк/г, в исходных ЖРО и/или жидких технологических средах выполняют путем отбора, подготовки и анализа проб в соответствии с аттестованными методиками измерений. Удельную активность k-го радионуклида в отверждаемых ЖРО A_k , Бк/г, определяют с использованием результатов измерений его удельной активности в исходном продукте (трапной воде, кубовом остатке или ОИОС) и установленных коэффициентов изменения концентрации в результате переработки с учетом используемой технологии кондиционирования и рецептуры отверждения по формуле

$$A_k = A_k^0 \cdot K_k, \tag{6.4}$$

где A_k^0 — результат измерений удельной активности k-го радионуклида в исходных ЖРО и/или жидких технологических средах, Бк/г;

K_k — коэффициент снижения удельной активности k-го радионуклида, отн. ед., на всей технологической цепочке переработки и отверждения ЖРО и/или жидких технологических средах, устанавливаемый по аттестованным методикам.

Если выполненные указанным способом исследования отверждаемых ЖРО показали, что в конечном продукте удельные активности радионуклидов аналогично 6.4.1.4 изменяются в одинаковой пропорции, то контроль содержания радионуклидов в отверждаемых ЖРО в этом случае проводят с применением установленного радионуклидного вектора по процедуре 6.3.4.2.

Для валидации расчетных процедур необходимо периодически выполнять отбор нескольких проб конечного продукта переработки ЖРО с подготовкой и измерением СОБ и сопоставлением результатов измерений с результатами расчетов.

6.4.1.6 В случае применения установки ионоселективной очистки для определения перехода активности из жидкой фазы в сорбент проводят специальное исследование по установлению коэффициентов распределения радионуклидов между конечными продуктами переработки на установке. Контроль содержания радионуклидов в отвержденных ЖРО в этом случае выполняют с применением установленного радионуклидного вектора с учетом коэффициентов распределения по процедуре 6.3.4.2.

6.4.2 Радиационный контроль сжигаемых твердых радиоактивных отходов

6.4.2.1 Для характеризации сжигаемых ТРО выполняют РК на следующих этапах обращения, как показано на рисунке Б.2 (приложение Б).

6.4.2.2 На этапе сбора и формирования первичных упаковок партию сжигаемых ТРО подвергают РК путем измерений МАЭД гамма-излучения и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов неразрушающим методом (по 6.3.1) с целью сортировки по активности для обеспечения соблюдения требований радиационной защиты персонала и технологии переработки ТРО.

6.4.2.3 На этапах омоноличивания и формирования упаковки с продуктом переработки осуществляют периодический (по мере переработки разных партий ТРО) отбор, подготовку СОБ продукта сжигания (золы) ТРО, а также продукта цементирования (омоноличивания) золы (при наличии соответствующей процедуры) и анализ удельной активности в представительной выборке проб всего перечня контролируемых радионуклидов с применением аттестованных методик. По результатам анализа удельной активности радионуклидов в пробах устанавливают радионуклидный вектор сжигаемых ТРО по процедуре согласно приложению В.

6.4.2.4 Установленный радионуклидный вектор распространяется на кондиционированные РАО — сжигаемые ТРО. На этапе паспортизации контейнеризованных ТРО для паспортизации образовавшихся контейнеризированных РАО выполняют измерение неразрушающим гамма-спектрометрическим методом удельной активности в РАО легкодетектируемых гамма-излучающих радионуклидов из контролируемого перечня, включая реперные радионуклиды, Бк/г, или МАЭД гамма-излучения паспортизуемых РАО, Зв/ч, по аттестованным методикам. По результатам измерений удельной активности реперных радионуклидов устанавливают удельную активность контролируемых сложнодетектируемых радионуклидов $A_{СДР,k}$, Бк/г, с применением метода радионуклидного вектора согласно 6.3.4.

Для повышения точности контроля при наличии технической возможности установление радионуклидного вектора может быть выполнено для отдельной партии сжигаемых РАО, образовавшихся при проведении определенной технологической операции. В этом случае возможен более высокий уровень гомогенности РАО в сравнении с рассмотрением потока сжигаемых РАО как целого.

6.4.3 Радиационный контроль прессуемых твердых радиоактивных отходов

Для характеризации прессуемых ТРО выполняют РК на этапах до и после прессования, при паспортизации контейнеризированных прессуемых ТРО, как показано на рисунке Б.3 (приложение Б).

На первом этапе партия прессуемых ТРО подвергают РК путем измерений МАЭД гамма-излучения и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов неразрушающим методом (по 6.3.1) с целью сортировки по активности для выполнения требований радиационной защиты персонала и технологий переработки ТРО, проводят отбор и подготовку проб подлежащих прессованию ТРО и анализ удельной активности в пробах всего перечня контролируемых радионуклидов с применением аттестованных методик. По результатам анализа удельной активности радионуклидов в пробах устанавливают радионуклидный вектор прессуемых ТРО по процедуре согласно приложению В.

На втором этапе для паспортизации образовавшихся прессованных контейнеризированных РАО выполняют измерение неразрушающим гамма-спектрометрическим методом удельной активности в РАО легкодетектируемых гамма-излучающих радионуклидов из контролируемого перечня, включая реперные радионуклиды, Бк/г, или МАЭД гамма-излучения паспортизуемых РАО, Зв/ч, по аттестованным методикам. По результатам измерений удельной активности реперных радионуклидов устанавливают удельную активность контролируемых сложнодетектируемых радионуклидов $A_{СДР,k}$, Бк/г, с применением метода радионуклидного вектора согласно 6.3.4.

6.4.4 Радиационный контроль неперерабатываемых твердых радиоактивных отходов

Для характеризации неперерабатываемых ТРО выполняют РК на этапах до и после кондиционирования, при паспортизации контейнеризированных неперерабатываемых ТРО, как показано на рисунке Б.4 (приложение Б).

На первом этапе партию неперерабатываемых ТРО подвергают РК путем измерений МАЭД гамма-излучения и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов неразрушающим методом (по 6.3.1) с целью сортировки по активности для выполнения требований радиационной защиты персонала и обращения с РАО, а также проводят отбор и подготовку проб неперерабатываемых ТРО и анализ удельной активности в пробах всего перечня контролируемых радионуклидов с применением аттестованных методик. По результатам анализа удельной активности радионуклидов в пробах устанавливают радионуклидный вектор неперерабатываемых ТРО по процедуре согласно приложению В.

На втором этапе для паспортизации контейнеризированных неперерабатываемых ТРО выполняют измерение неразрушающим гамма-спектрометрическим методом удельной активности в РАО легкодетектируемых гамма-излучающих радионуклидов из контролируемого перечня, включая реперные радионуклиды, Бк/г, или МАЭД гамма-излучения паспортизуемых РАО, Зв/ч, по аттестованным методикам. По результатам измерений удельной активности реперных радионуклидов устанавливают удельную активность контролируемых сложнодетектируемых радионуклидов $A_{СДР,k}$, Бк/г, с применением метода радионуклидного вектора согласно 6.3.4.

6.4.5 Радиационный контроль твердых радиоактивных отходов, образовавшихся в результате активации

6.4.5.1 Характеризацию ВАО и САО, образовавшихся в результате активации, выполняется на основе метода радионуклидных векторов. При этом для установления радионуклидного вектора используют расчетный метод, включающий следующие этапы:

- выбор методологии и инструментария расчета в зависимости от наличия исходных данных и требований к неопределенности результата расчета;
- выполнение расчетов, оценка неопределенности, верификация и валидация расчетных моделей и результатов расчетов;
- обработка результатов, выбор реперных радионуклидов и установление соотношений между удельными активностями контролируемых радионуклидов и радионуклидного вектора.

Расчеты рекомендуется выполнять с применением программ для ЭВМ, имеющих действующий аттестационный паспорт, оформленный в соответствии с [11].

6.4.5.2 Результатом расчетов должен быть набор соотношений между удельной активностью сложнодетектируемых и реперных радионуклидов для всего перечня контролируемых в данном потоке РАО радионуклидов (радионуклидный вектор).

6.4.5.3 Для паспортизации контейнеризированных ТРО, образовавшихся в результате активации, выполняют измерение неразрушающим гамма-спектрометрическим методом удельной активности реперных радионуклидов в РАО, Бк/г, либо измерение МАЭД гамма-излучения, Зв/ч, паспортизуемых РАО с применением соответствующих аттестованных методик.

По результатам измерений удельной активности реперных радионуклидов с применением установленного расчетным способом радионуклидного вектора определяется удельная активность контролируемых радионуклидов $A_{СДР,k}$, Бк/г, по формуле

$$A_{СДР,k} = f_k^{акт}(A_r), \quad (6.5)$$

где $f_k^{акт}(A_r)$ — установленная расчетным способом функция, описывающая соотношение между удельной активностью реперного радионуклида и удельной активностью k-го радионуклида в ТРО, которые образовались в результате активации.

При контроле активности радионуклидов по результатам измерений МАЭД гамма-излучения от упаковки с РАО по соответствующей аттестованной методике активность реперного или сложнодетектируемого радионуклида определяют по формулам (6.3а) и (6.3б).

7 Определение категории и класса радиоактивных отходов для передачи на захоронение

7.1 Категорию РАО по уровню удельной активности радионуклидов, периоду полураспада радионуклидов, класс РАО для захоронения определяют путем сопоставления результатов контроля с установленными критериями.

7.2 В зависимости от установленных критериев для категоризации, классификации РАО и подтверждения их соответствия критериям приемлемости для захоронения определяют следующие суммарные удельные активности по группам радионуклидов:

- удельная активность трития, Бк/г;
- суммарная удельная активность бета-излучающих радионуклидов (исключая тритий), Бк/г;
- суммарная удельная активность альфа-излучающих радионуклидов (исключая трансурановые радионуклиды), Бк/г;
- суммарная удельная активность трансурановых радионуклидов, Бк/г;
- суммарная удельная активность бета-излучающих радионуклидов с периодом полураспада более 31 года, Бк/г;
- суммарная удельная активность альфа-излучающих радионуклидов с периодом полураспада более 31 года, Бк/г;
- суммарная удельная активность трансурановых радионуклидов с периодом полураспада более 31 года, Бк/г.

Отнесение РАО к определенной категории (классу) осуществляют путем проверки выполнения критерия для всех предусмотренных категоризацией (классификацией) групп радионуклидов

$$\left(\sum_{j_K=1}^{J_K} A_{j_K} + \sqrt{\sum_{j_K=1}^{J_K} \left(A_{j_K} \cdot U_{j_K} \right)^2} \right) \in L_K^Z, \quad (7.1)$$

где J_K — число контролируемых (учитываемых при определении класса РАО для захоронения) радионуклидов, относящихся к группе K;

A_{j_K} — удельная активность j_K-го контролируемого радионуклида, Бк/г;

U_{j_K} — относительная расширенная неопределенность измерения удельной активности j_K-го контролируемого радионуклида (при коэффициенте охвата 2);

L_K^Z — установленный критерий отнесения РАО к категории (классу) Z по данной группе K радионуклидов в виде интервала $[L_K^{Z,min}; L_K^{Z,max})$, где $L_K^{Z,min}$, $L_K^{Z,max}$ — минимальное и максимальное значения критерия для категории (класса) Z, Бк/г.

РАО относят к определенной категории (классу) если как минимум для одной группы критерий (7.1) выполняется, при этом для остальных групп должен быть соблюден критерий

$$\left(\sum_{j_M=1}^{J_M} A_{j_M} + \sqrt{\sum_{j_M=1}^{J_M} \left(A_{j_M} \cdot U_{j_M} \right)^2} \right) < L_M^{Z,\max} \text{ при } M \neq K. \quad (7.2)$$

Кроме того, РАО должны соответствовать критериям приемлемости для захоронения в ПЗРО данного класса.

7.3 Если при выполнении критерия (7.1) соблюдено условие

$$\sum_{j_K=1}^{J_K} A_{j_K} < L_M^{Z,\min}, \quad (7.3)$$

рекомендуется проанализировать возможность снижения неопределенности измерений отдельных радионуклидов.

Приложение А
(обязательное)

Процедура определения перечня контролируемых радионуклидов

А.1 В качестве первого приближения для установления перечня контролируемых в данном типе (потоке) РАО АС радионуклидов используют расширенный перечень радионуклидов, потенциально присутствующих в РАО АС и потенциально влияющих на безопасность на всех этапах обращения с РАО АС, приведенный в таблице А.1. Данный перечень может быть применен при характеризации всех типов (потоков) РАО всех АС, однако при выполнении процедуры в соответствии с настоящим приложением может быть обоснованно сокращен. Кроме того, перечень должен быть дополнен путем включения в рассмотрение радионуклидов, не указанных в таблице А.1, но выявленных при анализе исходных данных.

Таблица А.1 — Расширенный перечень радионуклидов

Радионуклид	Период полураспада*
^{3}H	12,3 лет
^{7}Be	53,3 сут
^{14}C	$5{,}73 \cdot 10^{3}$ лет
^{22}Na	2,6 лет
^{32}Si	170 лет
^{36}Cl	$3{,}01 \cdot 10^{5}$ лет
^{41}Ca	$9{,}94 \cdot 10^{4}$ лет
^{46}Sc	83,8 сут
^{51}Cr	27,7 сут
^{54}Mn	312 сут
^{55}Fe	2,7 лет
^{59}Fe	44,5 сут
^{57}Co	271 сут
^{58}Co	70,8 сут
^{60}Co	5,27 лет
^{59}Ni	$7{,}5 \cdot 10^{4}$ лет
^{63}Ni	96 лет
^{65}Zn	244 сут
^{79}Se	$3{,}26 \cdot 10^{5}$ лет
^{89}Sr	50,5 сут
^{90}Sr	29,1 лет
^{93}Zr	$1{,}53 \cdot 10^{6}$ лет
^{95}Zr	64 сут
^{93m}Nb	13,6 лет
^{94}Nb	$2{,}03 \cdot 10^{4}$ лет
^{95}Nb	35,1 сут
^{93}Mo	$3{,}5 \cdot 10^{3}$ лет

Продолжение таблицы А.1

Радионуклид	Период полураспада*
^{99}Tc	$2{,}13 \cdot 10^5$ лет
^{103}Ru	39,3 сут
^{106}Ru	1,01 года
^{107}Pd	$6{,}5 \cdot 10^6$ лет
^{108m}Ag	438 лет
^{110m}Ag	250 суток
^{109}Cd	1,27 года
^{113m}Cd	14,1 лет
^{121m}Sn	43,9 лет
^{126}Sn	$2{,}30 \cdot 10^5$ лет
^{124}Sb	60,2 сут
^{125}Sb	2,77 года
^{129}I	$1{,}57 \cdot 10^7$ лет
^{134}Cs	2,06 лет
^{135}Cs	$2{,}3 \cdot 10^6$ лет
^{137}Cs	30,17 лет
^{133}Ba	10,7 лет
^{141}Ce	32,5 сут
^{144}Ce	284 сут
^{147}Pm	2,62 лет
^{151}Sm	90 лет
^{152}Eu	13,3 лет
^{154}Eu	9,32 лет
^{155}Eu	4,96 лет
^{153}Gd	242 суток
^{166m}Ho	$1{,}20 \cdot 10^3$ лет
^{232}U**	72 года
^{233}U**	$1{,}58 \cdot 10^5$ лет
^{234}U**	$2{,}44 \cdot 10^5$ лет
^{235}U**	$7{,}04 \cdot 10^8$ лет
^{236}U**	$2{,}34 \cdot 10^7$ лет
^{238}U**	$4{,}47 \cdot 10^9$ лет
^{237}Np**	$2{,}14 \cdot 10^6$ лет
^{238}Pu**	87,7 лет
^{239}Pu**	$2{,}41 \cdot 10^4$ лет

Окончание таблицы А.1

Радионуклид	Период полураспада*
^{240}Pu**	$6{,}54 \cdot 10^3$ лет
^{241}Pu**	14,4 лет
^{242}Pu**	$3{,}76 \cdot 10^5$ лет
^{241}Am**	432 лет
^{242m}Am**	152 года
^{243}Am**	$7{,}38 \cdot 10^3$ лет
^{242}Cm**	163 сут
^{243}Cm**	28,5 года
^{244}Cm**	18,1 года

* Информация по периоду полураспада приведена в соответствии с данными, представленными в [5], а также (при отсутствии информации в указанном Постановлении) по данным ресурса National Nuclear Data Center Brookhaven National Laboratory.

** Могут быть исключены из перечня контролируемых в случае отсутствия на АС инцидентов, связанных с нарушением целостности топлива и выходом фрагментов топлива в теплоноситель, и результаты измерения суммарной удельной активности альфа-излучающих радионуклидов в данном типе (потоке) РАО АС не превышают 1 Бк/г.

А.2 На основе анализа исходных данных:

- перечень подлежащих контролю радионуклидов по А.1 дополняется радионуклидами, входящими в перечень, установленный в критериях приемлемости РАО АС для захоронения в ПЗРО, в котором планируют захоронение контролируемых РАО АС (при наличии);

- из перечня подлежащих контролю радионуклидов по А.1 исключают радионуклиды, присутствие которых в данном типе (потоке) РАО АС исключено исходя из технологических особенностей процессов образования и обращения с РАО АС, что подтверждается данными системы учета и контроля РВ и РАО АС и результатами экспериментальных и расчетно-теоретических работ по определению радионуклидного состава и удельных активностей радионуклидов в РАО АС.

Если в истории эксплуатации АС отсутствуют инциденты, связанные с нарушением целостности топлива и выходом фрагментов топлива в теплоноситель, и результаты измерения суммарной удельной активности альфа-излучающих радионуклидов в данном типе (потоке) РАО не превышают 1 Бк/г, из перечня радионуклидов по А.1 исключают радионуклиды, обозначенные знаком «**» в таблице А.1 (изотопы урана и трансурановые радионуклиды). При этом контроль содержания альфа-излучающих радионуклидов осуществляют путем определения суммарной удельной активности альфа-излучающих радионуклидов, которое может быть выполнено радиометрическим методом.

А.3 Проводят экспериментальные и/или расчетно-теоретические исследования радионуклидного состава и удельных активностей радионуклидов в данном типе (потоке) РАО АС.

Исходным для исследования является перечень по А.2.

А.3.1 Получение экспериментальных данных об удельной активности радионуклидов в данном типе (потоке) РАО АС рекомендуется выполнять нижеприведенным образом.

А.3.1.1 Разрабатывают программу исследования характеристик данного типа (потока) РАО с обоснованием объема и представительных точек отбора проб.

Количество отбираемых для данного типа (потока) РАО АС проб, необходимое для проведения анализа, определяют в ходе выполнения работ с учетом наличия исходного материала, пригодного для отбора, из характеристик типа (потока), но не менее 30 проб, что соответствует рекомендациям МАГАТЭ по определению и применению методологии радионуклидных векторов для установления радиационных характеристик РАО АС (см. [12]). При выполнении работ по извлечению РАО АС из исторических хранилищ, а также по выводу из эксплуатации блоков АС для анализа может потребоваться существенно большее количество проб.

Если единый перечень радионуклидов установлен для нескольких типов (потоков) РАО АС, например для блока или АС в целом, при отборе проб необходимо обеспечить попадание в выборку проб РАО АС различных типов (потоков) пропорционально их объему образования на АС.

А.3.1.2 В соответствии с программой выполняют экспериментальное исследование РАО, включающее:

- отбор и подготовку проб;

- измерение в пробах РАО АС удельной активности радионуклидов по перечню согласно А.2, откорректированному по результатам расчетно-теоретических оценок, с оценкой неопределенности;

- определение для достоверно необнаруженных в пробах радионуклидов нижних пределов диапазона измерений удельной активности.

Отбор проб необходимо осуществлять таким образом, чтобы диапазоны удельных активностей радионуклидов в пробах охватывали диапазоны, характерные для РАО, установленные по данным системы учета и контроля РВ и РАО АС и предыдущим исследованиям с учетом технологических характеристик системы обращения с РАО АС.

Измерения выполняют по аттестованным методикам с применением поверенных средств измерений утвержденного типа (сведения о поверке должны содержаться в ФИФ ОЕИ).

Нижние пределы диапазона измерений применяемых методов измерений удельной активности радионуклидов не должны превышать 0,001 от соответствующего значения ПЗУА.

Применяемые средства и методики измерений должны обеспечивать измерение удельной активности радионуклидов с относительной расширенной неопределенностью с коэффициентом охвата 2 не более 60 % (P = 0,95).

А.3.1.3 Результаты измерений удельной активности радионуклидов фиксируют в установленном на предприятии и в методиках измерений порядке и заносят в базу данных отобранных проб РАО АС.

В результате исследований должны быть определены:

- удельные активности A_i^j, Бк/г, каждого i-го радионуклида по А.2 в j-й пробе для всех проб данного типа (потока) РАО АС на момент выполнения измерений с относительной стандартной неопределенностью $u_{A_i^j}$, %;

- диапазон (максимальное A_i^{max} и минимальное значение A_i^{min} удельной активности A_i, Бк/г, каждого радионуклида по п. А.2 в данном типе (потоке) РАО АС.

Для радионуклидов, не обнаруживаемых в пробах РАО АС с заданной неопределенностью, удельной активности следует приписывать значение НПИ.

А.3.2 Оценка удельной активности радионуклидов либо соотношений между удельными активностями отдельных радионуклидов может быть выполнена путем расчетно-теоретических исследований на основе:

- цепочек радиоактивного распада;

- балансовых моделей технологических процессов образования и обращения с РАО АС;

- радионуклидного состава ядерного топлива либо конструкционных материалов активной зоны и технологических сред реакторной установки с учетом процессов взаимодействия нейтронов с веществом и радиоактивного распада.

Выполнение расчетов должно сопровождаться оценкой неопределенности и валидацией на основе сопоставления с экспериментальными данными.

А.4 На основе анализа результатов измерений по А.3 с учетом данных системы учета и контроля РВ и РАО АС, а также результатов расчетно-теоретических работ (при наличии) определяют радионуклиды, содержание которых в РАО АС несущественно и которые, следовательно, можно исключить из перечня.

Анализ выполняют по А.4.1, А.4.2.

А.4.1 Для каждого радионуклида исходя из результатов экспериментальных и расчетно-теоретических работ по определению/оценке радионуклидного состава и удельных активностей радионуклидов в РАО АС, данных по учету и контролю РВ и РАО АС с учетом проектных данных устанавливают максимально возможное в данном типе (потоке) РАО АС значение удельной активности A_i^{max}, Бк/г.

Величины отношений значений A_i^{max} к соответствующим предельным значениям удельной активности ПЗУА$_i$ (i = 1 … n), Бк/г, сортируют по возрастанию:

$$\frac{A_1^{max}}{ПЗУА_1} \le \frac{A_2^{max}}{ПЗУА_2} \le \ldots \le \frac{A_n^{max}}{ПЗУА_n}. \quad (А.1)$$

А.4.2 Последовательно включая радионуклиды (увеличивая верхний предел индекса суммирования k) в рассмотрение, выполняют оценку соблюдения критерия

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{A_i^{max}}{ПЗУА_i} < 0{,}01. \quad (А.2)$$

Значение k, начиная с которого критерий нарушается, фиксируют. Из перечня контролируемых радионуклидов исключают радионуклиды с 1-го по (k – 1)-й; перечень сокращается до (n – k) радионуклидов.

А.5 Дальнейшая оптимизация перечня, сокращенного с учетом А.4, на основе дозового критерия по 5.3 может быть выполнена по А.5.1—А.5.5.

А.5.1 Для каждой j-й из Z исследованных проб определяют радионуклидный вектор $\overline{v}^j$ ($\overline{v}^j = (v_1^j, \ldots, v_n^j)$), представляющий собой вектор из значений относительного вклада отдельных радионуклидов в суммарную удельную активность пробы $A^j = \sum_{i=1}^{n} A_i^j$:

$$v_i^j = \frac{A_i^j}{A^j}; \quad 0 \le v_i^j \le 1; \quad \sum_{i=1}^{n} v_i^j = 1. \tag{А.3}$$

Если в *j*-й пробе *i*-й радионуклид не обнаружен, в расчетах используют соответствующее значение НПИ. Для относительной стандартной неопределенности измерений $u_{A_i^j}$ при этом принимают значение 30 %.

А.5.2 Для всех радионуклидов в перечне рассчитывают среднее взвешенное по всем *Z* исследованным пробам значение относительного вклада радионуклида в удельную активность пробы по формуле

$$v_i = \sum_{j=1}^{Z}\left(v_i^j \cdot \left(\frac{1}{u_{v_i^j}}\right)^2\right) \Bigg/ \sum_{j=1}^{Z}\left(\frac{1}{u_{v_i^j}}\right)^2, \tag{А.4}$$

где $u_{v_i^j}$ — относительная стандартная неопределенность результата расчета вклада *i*-го радионуклида в суммарную удельную активность *j*-й пробы, вычисляемая по формуле

$$u_{v_i^j} = \sqrt{\left(u_{A_i^j}\right)^2 + \sum_{i=1}^{n}\left(u_{A_i^j} \cdot A_i^j\right)^2 \Big/ (A^j)^2}. \tag{А.5}$$

Значения v_i формируют радионуклидный вектор данного типа (потока) РАО $\overline{v} = (v_1, \ldots, v_n)$.

А.5.3 Определяют период времени, в течение которого данный тип (поток) отходов является радиоактивным $T_{РАО}$ лет, путем численного решения уравнения:

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{v_i \cdot A_0^{max} \cdot \exp\left(-\lambda_i \cdot T_{РАО}\right)}{ПЗУА_i} = 1, \tag{А.6}$$

где A_0^{max} — максимальное возможное исходя из технологического процесса образования значение суммарной удельной активности радионуклидов для данного типа (потока) РАО, Бк/г;

λ_i — постоянная распада радионуклида *i* в ТРО, год$^{-1}$;

$ПЗУА_i$ — предельное значение удельной активности радионуклида *i*, Бк/г.

При необходимости значения вкладов радионуклидов v_i должны быть откорректированы с учетом образования радионуклидов за счет распада материнских радионуклидов.

Значение A_0^{max} может быть определено исходя из установленной для данного типа (потока) РАО наибольшей допустимой категории по удельной активности в соответствии с алгоритмом по А.5.3.1—А.5.3.4.

А.5.3.1 На основе радионуклидного вектора определяют значения вклада групп радионуклидов в суммарную удельную активность V_i, отн. ед.:

$V_1 = v_{тритий}$ — вклад трития,

$V_2 = \sum_{j=1}^{n_\beta} v_j$ — вклад бета-излучающих радионуклидов [суммирование выполняют по n_β бета-излучающих (исключая тритий) радионуклидов];

$V_3 = \sum_{j=1}^{n_\alpha} v_j$ — вклад альфа-излучающих радионуклидов [суммирование выполняют по n_α альфа-излучающих (исключая трансурановые) радионуклидов];

$V_4 = \sum_{j=1}^{n_{тр}} v_j$ — вклад трансурановых радионуклидов (суммирование выполняют по $n_{тр}$ трансурановых радионуклидов).

А.5.3.2 Исходя из установленных для рассматриваемых РАО максимальных граничных значений по удельной активности следующих групп радионуклидов:

- тритий $A_1^{гр}$, Бк/г,
- бета-излучающие (исключая тритий) $A_2^{гр}$, Бк/г,
- альфа-излучающий (исключая трансурановые) $A_3^{гр}$, Бк/г,
- трансурановые радионуклиды $A_4^{гр}$, Бк/г,

определяется набор параметров $\alpha_i^{гр}$ [i = 1…4, индекс 1 соответствует тритию; 2 — бета-излучающим (исключая тритий); 3 — альфа-излучающим (исключая трансурановые); 4 — трансурановым радионуклидам] по следующей формуле:

$$\alpha_i^{гр} = \frac{V_i}{V_4} \cdot \frac{1}{\frac{A_i^{гр}}{A_4^{гр}}}. \quad (A.7)$$

.

А.5.3.3 Определяют индекс группы радионуклидов z_{max}, соответствующий максимальному значению параметра $\alpha_i^{гр}$ по формуле:

$$z_{max} = j: (j \in (1..4) \mid \alpha_j^{гр} = \max_{i=1..4} \alpha_i^{гр}). \quad (A.8)$$

А.5.3.4 Рассчитывают максимальное возможное значение суммарной удельной активности радионуклидов для данного типа (потока) РАО A_0^{max}, Бк/г, по формуле

$$A_0^{max} = \sum_{i=1}^{4} \frac{A_{z_{max}}^{гр}}{V_{z_{max}}} \cdot V_i, \quad (A.9)$$

где $A_{z_{max}}^{гр}$ и $V_{z_{max}}$ — максимальное граничное значение удельной активности и вклад радионуклидов для группы радионуклидов с максимальным значением параметра $\alpha_i^{гр}$.

А.5.4 Выполняют оценку соблюдения дозового критерия в период времени, в течение которого данный тип (поток) отходов является радиоактивным ($[t_0; t_0 + T_{РАО}]$, где t_0 — момент времени, лет, соответствующий проведению характеризации РАО ($t_0 = 0$ лет).

А.5.4.1 Для этого в периоде времени $[t_0; t_0 + T_{РАО}]$ выделяют ($\tau + 1$) последовательных момента времени, лет:

$$t = \begin{cases} t_0, l = 0 \\ t_0 + 10^{l \cdot \frac{\mathrm{Log}_{10}(T_{РАО})}{\tau}}, l = 1..\tau \end{cases}. \quad (A.10)$$

Для расчетов рекомендуется применять значение τ не менее 30.

А.5.4.2 Для каждого момента времени t, лет, (при $l = 0 \ldots \tau$) проводят процедуру по А.5.4.2.1, А.5.4.2.2.

А.5.4.2.1 Для каждого i-го радионуклида рассчитывают отношения удельной активности, Бк/г, в момент времени t, лет, к соответствующему значению ПЗУА, Бк/г (индекс РАО по i-му радионуклиду в момент t) по формуле

$$I_i = \frac{v_i \cdot A_0^{max} \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t)}{ПЗУА_i} \text{ при } t \in [t_0; t_0 + T_{РАО}]. \quad (A.11)$$

Значения I_i ($i = 1 \ldots m$) сортируют по возрастанию:

$$I_1 \le I_2 \le .... \le I_m. \quad (A.12)$$

А.5.4.2.2 Последовательно включая радионуклиды (увеличивая верхний предел индекса суммирования k) в рассмотрение, выполняют оценку соблюдения критерия

$$\sum_{i=1}^{k} I_i \Big/ \sum_{j=1}^{n} I_j < 0{,}01. \quad (A.13)$$

Значение k, начиная с которого критерий нарушается, фиксируют. В результате для момента времени t из перечня контролируемых радионуклидов могут быть исключены радионуклиды с 1 по ($k - 1$).

А.5.4.3 В результате выполнения процедуры получают ($\tau + 1$) набор радионуклидов $\{R_l\}$, которые в отдельные моменты времени соответствуют критерию для исключения из перечня контролируемых. Список радионуклидов $\{R_{искл}\}$, исключаемых из перечня контролируемых, формируют из радионуклидов, для которых критерий выполняют во все моменты времени, т. е. как пересечение множеств $\{R_l\}$:

$$\{R_{искл}\} = \bigcap_{l=0}^{\tau} \{R_l\} = \{r \mid \forall l \in (0, \tau), r \in \{R_l\}\}. \quad (A.14)$$

А.5.5 Итоговый перечень получают путем исключения из перечня по А.4 радионуклидов, определенных по А.5.4.3. Перечень включает все радионуклиды, значимые для обеспечения безопасности при обращении с данным типом (потоком) РАО, подлежащие контролю при характеризации РАО и указываемые в паспорте РАО.

А.6 В целях определения класса РАО перечень по А.5 может быть сокращен путем исключения z радионуклидов, не являющихся представительными с точки зрения долговременной безопасности и не дающих существенный вклад в дозу после закрытия ПЗРО, для которых выполняют критерий

$$\sum_{i=1}^{z} \frac{A_i(t)}{\text{ПЗУА}_i} \Big/ \sum_{j=1}^{n} \frac{A_j(t)}{\text{ПЗУА}_j} < 0{,}01 \text{ в любой момент времени } t \in \left[t_{\text{ПЗРО}}; t_0 + T_{\text{РАО}}\right]. \quad \text{(А.15)}$$

где $t_{\text{ПЗРО}}$ — момент времени, соответствующий закрытию ПЗРО (в случае, если ПЗРО для данных РАО не определено, либо не определен период до его закрытия в качестве $t_{\text{ПЗРО}}$, рекомендуется использовать значение (t_0 + 100) лет).

Применение критерия выполняется аналогично А.5.4, А.5.5. В результате формируют перечень радионуклидов, учитываемых при определении класса РАО для захоронения.

Приложение Б
(обязательное)

Потоки радиоактивных отходов атомных станций и производственно-технологические цепочки обращения с ними

Б.1 По способу переработки, морфологии, а также механизмам образования можно выделить следующие потоки удаляемых РАО АС:

- сжигаемые ТРО;
- прессуемые ТРО;
- измельчаемые ТРО;
- переплавляемые ТРО (на установках плавления и плазменной переработки);
- неперерабатываемые ТРО;
- отверждаемые ЖРО (основные применяемые на АС методы переработки ЖРО: глубокое упаривание, цементирование, битумирование, ионоселективная очистка, осушение);
- РАО АС, образовавшиеся в результате активации материалов (фрагменты ОТВС, внутрикорпусные устройства, каналы нейтронных измерений и др.);
- РАО АС в виде ОЗИИИ.

Б.2 На рисунках Б.1—Б.5 приведены схемы производственно-технологических цепочек обращения с типовыми потоками РАО АС с указанием этапов проведения РК. Требования к процедурам проведения РК на определенных этапах обращения для каждого потока РАО АС приведены в разделе 6.

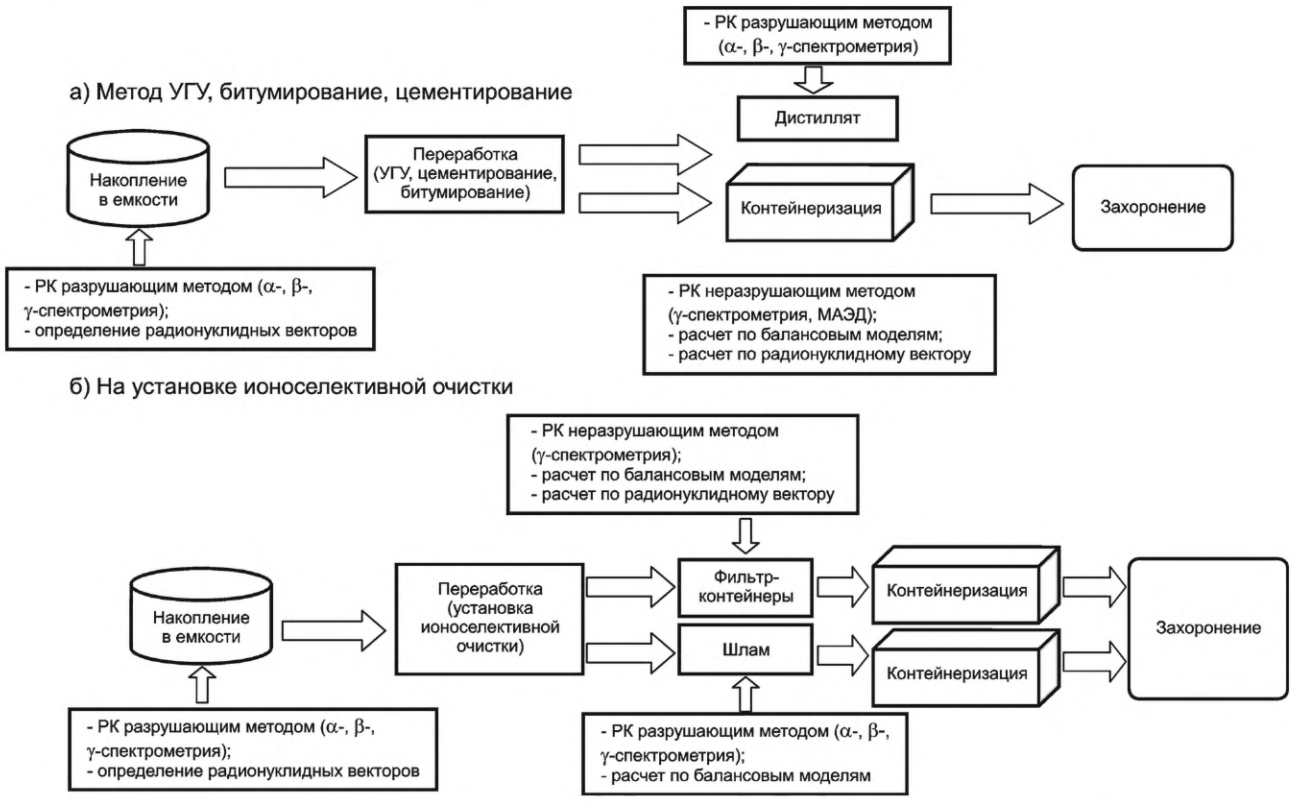


Рисунок Б.1 — Производственно-технологическая цепочка обращения с отверждаемыми ЖРО с указанием этапов проведения РК

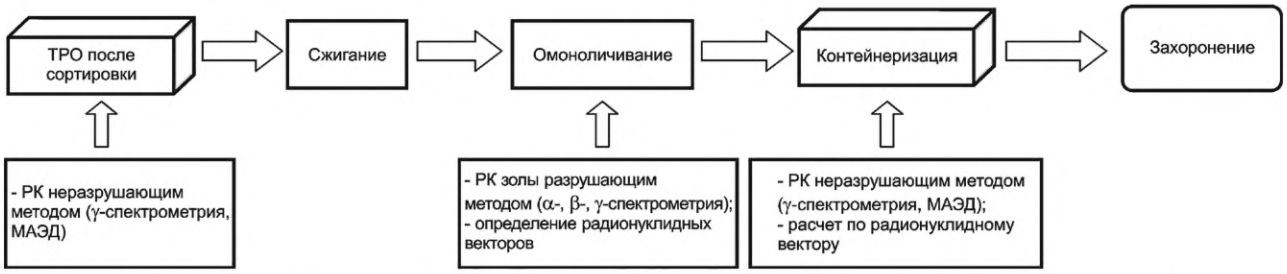


Рисунок Б.2 — Производственно-технологическая цепочка обращения с сжигаемыми РАО АС с указанием этапов проведения РК

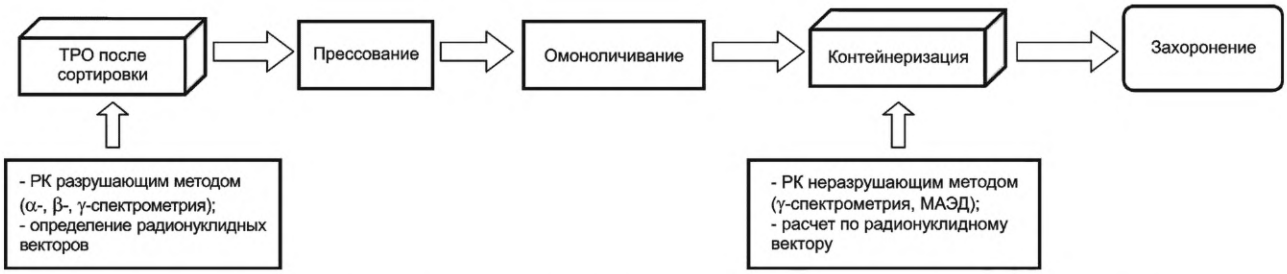


Рисунок Б.3 — Производственно-технологическая цепочка обращения с прессуемыми РАО АС с указанием этапов проведения РК

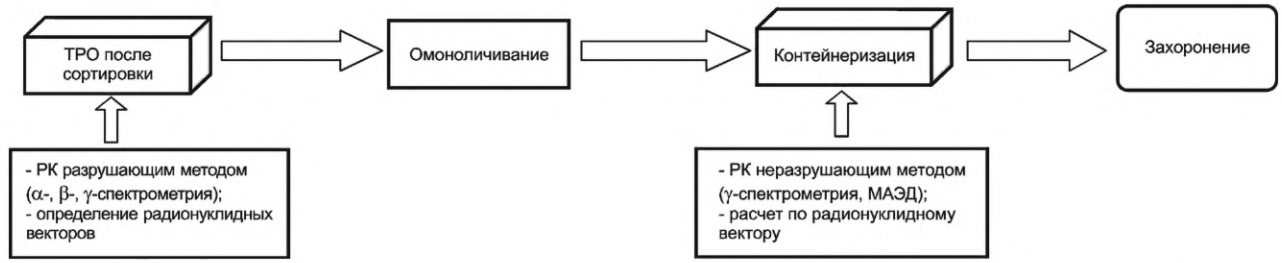


Рисунок Б.4 — Производственно-технологическая цепочка обращения с неперерабатываемыми РАО АС с указанием этапов проведения РК

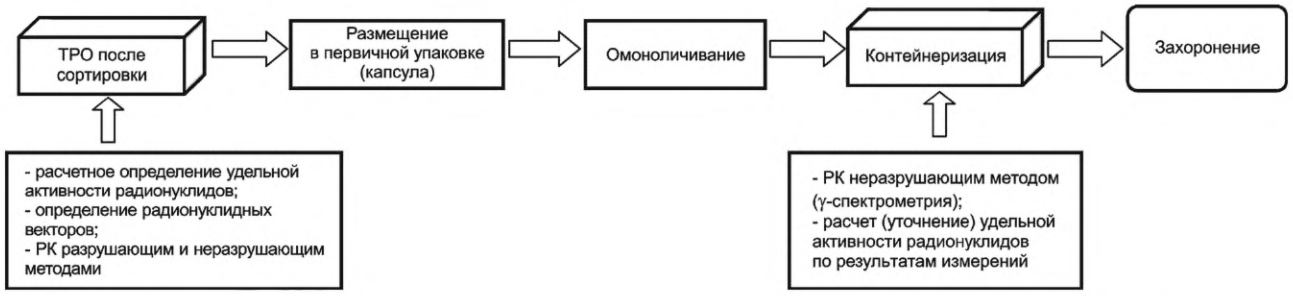


Рисунок Б.5 — Производственно-технологическая цепочка обращения с твердыми ВАО и САО, образовавшимися на АС в результате активации, с указанием этапов проведения РК

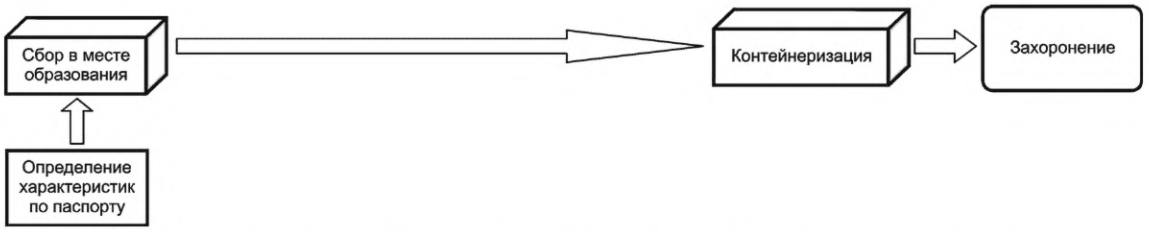


Рисунок Б.6 — Производственно-технологическая цепочка обращения с ОЗИИИ

Приложение В
(обязательное)

Процедура установления радионуклидного вектора

В.1 Порядок выполнения работ

В.1.1 С целью получения исходных данных, необходимых для установления радионуклидного вектора рассматриваемого потока РАО АС, следует выполнить нижеприведенные процедуры:

а) определение перечня контролируемых в РАО АС радионуклидов в соответствии с приложением А;

б) сбор и анализ накопленных данных учета и контроля, а также результатов исследований рассматриваемого потока РАО АС, оценка необходимого объема проведения экспериментальных и/или расчетно-теоретических работ;

в) экспериментальные исследования, включая:

1) определение сети точек отбора проб рассматриваемого типа (потока) РАО АС,

2) выполнение отбора представительной выборки проб РАО АС в назначенной сети точек пробоотбора,

3) приготовление из отобранных проб РАО АС счетных образцов,

4) измерение удельной активности радионуклидов в СО,

5) оформление результатов измерений удельной активности всего перечня исследуемых радионуклидов в РАО АС (с указанием неопределенностей при $P = 0,95$);

г) при проведении расчетно-теоретических работ по установлению радионуклидного вектора следует руководствоваться рекомендациями В.5.

Экспериментальные работы для определения перечня радионуклидов в соответствии с приложением А и установления радионуклидного вектора для потока РАО могут быть выполнены в рамках одного исследования.

В.1.2 Для установления радионуклидных векторов по результатам анализа проб РАО АС используют общий подход, изложенный в [3], [12], [13] и включающий:

- отбор и спектрометрический анализ (в отношении предварительно установленного перечня радионуклидов) представительного количества проб из исследуемого потока РАО АС;

- регрессионно-корреляционный анализ полученного набора значений удельной активности радионуклидов для каждой пары (сложнодетектируемый радионуклид, реперный радионуклид) и установление наличия связи и вида (линейная, нелинейная) функции, описывающей соотношение между ними;

- установление параметров линейной или степенной (для нелинейной зависимости) функции с оцененными неопределенностями;

- установление в случае отсутствия значимой корреляции согласно В.4.2.2 консервативного соотношения между удельными активностями радионуклидов;

- выбор реперного радионуклида (как правило, ^{60}Co или ^{137}Cs).

В.2 Объем контроля

В.2.1 Количество отбираемых из каждого исследуемого потока РАО АС проб, необходимое для первичного определения радионуклидных векторов, устанавливают в ходе выполнения работ исходя из характеристик потока и требований к репрезентативности выборки по каждому потоку РАО АС.

При определении количества проб рекомендуется руководствоваться принципом: количество проб достаточное, если дополнительный отбор и анализ проб не приводят к существенному снижению статистической неопределенности. При этом следует учитывать, к каким отходам относят исследуемый поток РАО АС — гомогенным (в которых распределение физико-химических свойств и активности по объему близко к равномерному) или гетерогенным (негомогенным) (критерий гомогенности приведен в 6.4.1.1). К гомогенным отходам могут быть отнесены ЖРО АС в виде концентратов с выпарных аппаратов, отработавшие ионообменные смолы, отверждаемые ЖРО. Для определения радионуклидного вектора гомогенных отходов может быть достаточно отбора и анализа небольшого количества образцов. К гетерогенным РАО АС относятся загрязненные специальная одежда, СИЗ, ветошь, теплоизоляцию, резинотехнические изделия, пластикаты, полимерные материалы, отработавшее загрязненное оборудование (в том числе кассетные фильтры), металлические отходы и др.

В таблице В.1 приведена оценка минимального количества проб для определения радионуклидных векторов [3]. Оценка выполнена на основе анализа накопленной выборки данных путем рассмотрения зависимости коэффициента корреляции между активностями радионуклидов от количества анализируемых проб.

Таблица В.1 — Минимальное количество проб для определения радионуклидных векторов

Коэффициент корреляции	0,6	0,7	0,8
Необходимое и достаточное количество точек	40	35	30

Минимальным для проведения достоверного статистического анализа является отбор от 20 до 40 проб на поток, что соответствует рекомендациям МАГАТЭ по определению и применению методологии радионуклидных векторов для определения радиационных характеристик РАО АС [12]. При проведении анализа экспериментальных данных в случае недостатка статистической информации по активностям отдельных радионуклидов и превышения стандартной статистической неопределенностью определяемых соотношений между удельными активностями радионуклидов 50 % рекомендуется увеличить экспериментальную выборку путем дополнительного отбора проб в исследуемом потоке РАО.

Для отверждаемых ЖРО радионуклидный вектор может быть определен как для потока ЖРО в целом, так и для отдельных емкостей, содержимое которых направляют на переработку. Устанавливать радионуклидный вектор для потока ЖРО в целом рекомендуется в том случае, если соблюдается критерий гомогенности для множества партий ЖРО из потока в соответствии с 6.4.1.1. Если критерий не соблюден, то радионуклидный вектор целесообразно определять для каждой партии (емкости с ЖРО), отправляемой на переработку.

В.2.2 Рекомендуется периодически (один раз в два года) проводить подтверждающий контроль установленного радионуклидного вектора на основе ограниченного отбора и спектрометрического анализа проб потока РАО АС. Результаты измерений могут быть использованы для валидации и/или актуализации радионуклидного вектора с целью повышения точности получаемых с его помощью результатов расчета активности и проверки соблюдения критерия по В.6.3. Объем дополнительной выборки может варьироваться в зависимости от неопределенности установленных для потоков РАО АС радионуклидных векторов, технических возможностей исполнителя, наличия исходных материалов, пригодных для отбора, но должен составлять не менее 5 % от количества проб, отобранных при первоначальном установлении радионуклидного вектора.

В случае изменения водно-химического режима на АС, технологий обращения с РАО, а также после инцидентов на АС, связанных с нарушением целостности защитных барьеров, следует выполнять внеочередной подтверждающий контроль с отбором проб потоков РАО в объеме не менее 30 % от первоначальной выборки. Если по результатам анализа для потока РАО не будет подтвержден радионуклидный вектор и/или критерий точности по В.6.3 не будет выполнен, то процедуру установления радионуклидного вектора для данного потока следует проводить заново, исключив из рассмотрения пробы, отобранные до ключевого события.

В.3 Требования к измерениям

В.3.1 Порядок радиационного контроля РАО АС, выполняемого при установлении радионуклидных векторов АС или сторонней организации, включает нижепречисленное.

В.3.1.1 Отбор проб РАО АС.

В.3.1.2 Приготовление СОБ из каждой пробы РАО АС.

В.3.1.3 Выполнение радиометрического и/или спектрометрического анализов приготовленных СОБ с определением активности радионуклидов из установленного для АС перечня, распад которых сопровождается γ-, β- и α-излучением.

В.3.2 Приготовление и измерение СОБ выполняют в соответствии с аттестованными методиками. Нижние пределы диапазонов измерений применяемых методик измерений удельной активности радионуклидов не должны превышать 0,1 % от соответствующего ПЗУА.

В.3.3 Применяемые СИ и методики измерений должны обеспечивать измерение удельной активности реперных гамма-излучающих радионуклидов с относительной расширенной неопределенностью не более 30 % (P = 0,95) и измерения удельной активности сложнодетектируемых радионуклидов с относительной расширенной неопределенностью не более 50 % (P = 0,95).

В.4 Обработка результатов измерений для установления радионуклидных векторов

В.4.1 Для обработки полученных экспериментальных данных и установления соотношений/функциональных зависимостей между активностями радионуклидов в РАО применяют алгоритм, включающий выполнение операций по В.4.1.1—В.4.1.5.

В.4.1.1 Определение линейного соотношения между удельными активностями пары сложнодетектируемый радионуклид — реперный радионуклид по В.4.2.

В.4.1.2 В случае отсутствия значимой корреляции между значениями удельных активностей радионуклидов осуществляют поиск связи между логарифмами удельных активностей реперного и сложнодетектируемого радионуклидов (нелинейное соотношение).

В.4.1.3 В случае отсутствия значимой корреляции между удельными активностями и логарифмами удельных активностей реперного и сложнодетектируемого радионуклидов выполняют поиск другого реперного радионуклида или устанавливают консервативное соотношение по В.4.4.

В.4.1.4 Для проведения статистического анализа с целью установления радионуклидного вектора рассматриваемого потока РАО необходимо, чтобы по каждой паре сложнодетектируемый радионуклид — реперный радионуклид, включаемой в вектор, были доступны результаты контроля не менее чем пяти проб, в которых достоверно обнаружены как реперный, так сложнодетектируемый радионуклиды.

При отсутствии достаточной информации для проведения анализа в соответствии с В.4.1, может быть принято решение с соответствующим обоснованием об объединении потоков РАО, о проведении дополнительного отбора проб либо об использовании консервативных соотношений. Допускается для увеличения объема статисти-

ческой информации включать в анализ результаты измерения содержания радионуклидов со значениями меньше НПИ. При этом в качестве удельной активности радионуклидов используют значения НПИ, а для стандартной неопределенности измерений принимают значение 30 %.

В.4.1.5 Алгоритм обработки результатов РК реализуют путем выполнения вычислений по пп.В.4.2—В.4.4 и может быть установлен в виде программного средства.

В.4.2 Определение соотношений между удельными активностями пары сложнодетектируемый радионуклид — реперный радионуклид осуществляют по В.4.2.1—В.4.2.7.

В.4.2.1 Рассчитывают коэффициент корреляции между значениями удельной активности *i*-го сложнодетектируемого и реперного радионуклидов R_A по формуле

$$R_A = \frac{\sum_{k=1}^{n} A_{r,k} \cdot A_{i,k} - \left(\sum_{k=1}^{n} A_{r,k}\right) \cdot \left(\sum_{k=1}^{n} A_{i,k}\right) \Big/ n}{\sqrt{\left[\sum_{k=1}^{n} A_{r,k}^2 - \left(\sum_{k=1}^{n} A_{r,k}\right)^2 \Big/ n\right]\left[\sum_{k=1}^{n} A_{i,k}^2 - \left(\sum_{k=1}^{n} A_{i,k}^2\right)^2 \Big/ n\right]}}, \quad \text{(В.1)}$$

где $A_{i,k}$ — удельная активность *i*-го сложнодетектируемого радионуклида в *k*-й пробе, Бк/г;

$A_{r,k}$ — удельная активность реперного радионуклида в *k*-й пробе;

n — число проб.

В.4.2.2 В качестве критерия наличия корреляции, как правило, используют следующее условие:

$$R_A \geq 0{,}7. \quad \text{(В.2)}$$

В.4.2.3 Если полученный коэффициент корреляции удовлетворяет условию (В.2), то определяют линейное соотношение между удельными активностями сложнодетектируемого и реперного радионуклидов по п. В.4.2.4—В.4.2.7. Если условие (В.2) не выполнено, то дальнейший анализ осуществляют по В.4.3.

В.4.2.4 Рассчитывают значение соотношения для *i*-го радионуклида и реперного радионуклида в *k*-й пробе $K_{i,k}$ по формуле

$$K_{i,k} = \frac{A_{i,k}}{A_{r,k}}. \quad \text{(В.3)}$$

В.4.2.5 Относительную стандартную неопределенность результата расчета соотношения для *i*-го радионуклида в *k*-й пробе определяют с помощью выражения

$$u_{K_{I,k}} = \sqrt{u_{A_{I,k}}^2 + u_{A_{r,k}}^2}, \quad \text{(В.4)}$$

где $u_{A_{i,k}}$ — относительная стандартная неопределенность измерения удельной активности *i*-го сложнодетектируемого радионуклида в *k*-й пробе $A_{i,k}$;

$u_{A_{r,k}}$ — относительная стандартная неопределенность измерения удельной активности реперного радионуклида в *k*-й пробе $A_{r,k}$.

Абсолютное значение неопределенности соотношения вычисляют по формуле

$$\Delta K_{I,k} = u_{K_{I,k}} \cdot K_{i,k}. \quad \text{(В.5)}$$

В.4.2.6 Численное значение соотношения между удельными активностями сложнодетектируемого и реперного радионуклидов в контролируемом потоке РАО оценивают как среднее взвешенное геометрическое. В качестве весов используются абсолютные значения неопределенности соотношения для *k*-й пробы.

Для *i*-го радионуклида среднее взвешенное геометрическое значение соотношения K_i определено выражением

$$\overline{K_i} = \exp\left(\sum_{k=1}^{n} \frac{\ln\left(K_{i,k}\right)}{\left(u_{K_{i,k}}\right)^2} \Big/ \sum_{k=1}^{n} \left(\frac{1}{u_{K_{i,k}}}\right)^2\right), \quad \text{(В.6)}$$

где *n* — количество проб.

Если неопределенности измерения удельной активности радионуклидов близки, соотношения между удельными активностями сложнодетектируемого и реперного радионуклидов K_i в контролируемом потоке РАО может быть вычислено как среднее геометрическое

$$\overline{K_i} = \exp\left(\sum_{k=1}^{n} \frac{\ln\left(K_{i,k}\right)}{n}\right). \quad \text{(В.7)}$$

В.4.2.7 Относительную стандартную неопределенность результата расчета соотношения u_{K_i} между удельными активностями сложнодетектируемого и реперного радионуклидов вычисляют по формуле

$$u_{K_i} = \sqrt{\sigma_i^2 + \max_{k=1..n}\left(u_{K_{i,k}}^2\right)}, \tag{В.8}$$

где σ_i —относительное стандартное отклонение среднего геометрического, вычисляемое по выражению

$$\sigma_i = \sqrt{\exp\left(\sum_{k=1}^{n}\left(\ln\left(K_{i,k}\right) - \ln\left(\overline{K_i}\right)\right)^2 \Big/ \left(n(n-1)\right)\right) - 1}. \tag{В.9}$$

В.4.3 В случае отсутствия значимой корреляции между удельными активностями i-го сложнодетектируемого и реперного радионуклидов в контролируемом потоке РАО [несоблюдения условия (В.2)] осуществляют поиск соотношения между логарифмами удельных активностей сложнодетектируемого и реперного радионуклидов. При этом соотношение между удельными активностями i-го сложнодетектируемого и реперного радионуклидов $A_{СДР}$, Бк/г, и A_r, Бк/г, соответственно в рассматриваемом потоке РАО описывают степенной функцией вида:

$$A_{СДР} = a \cdot (A_r)^b, \tag{В.10}$$

где a и b — константы.

Выражение (В.10) можно переписать через логарифмы в виде

$$\ln(A_{СДР}) = \ln(a) + b \cdot \ln(A_r) \tag{В.11}$$

или

$$y_k = \ln(a) + b \cdot x_k, \tag{В.12}$$

где введены следующие обозначения:

$$x_k = \ln(A_{r\,k});\ y_k = \ln(A_{СДР,k}).$$

В.4.3.1 Рассчитывают коэффициент корреляции между значениями логарифмов удельных активностей i-го сложнодетектируемого и реперного радионуклидов $R_{\ln A}$ по формуле

$$R_{\ln A} = \frac{\sum_{k=1}^{n} x_k \cdot y_k - \left(\sum_{k=1}^{n} x_k\right)\cdot\left(\sum_{k=1}^{n} y_k\right)\Big/ n}{\sqrt{\left[\sum_{k=1}^{n} x_k^2 - \left(\sum_{k=1}^{n} x_k\right)^2 \Big/ n\right]\cdot\left[\sum_{k=1}^{n} y_k^2 - \left(\sum_{k=1}^{n} y_k^2\right)^2 \Big/ n\right]}}. \tag{В.13}$$

В.4.3.2 Уровень корреляции между логарифмами удельных активностей радионуклидов считают значимым, если для коэффициента корреляции выполнено условие

$$R_{\ln A} \geq 0{,}5. \tag{В.14}$$

В.4.3.3 Если полученный коэффициент корреляции $R_{\ln A}$ удовлетворяет условию (В.14), то проводят оценку параметров функционального соотношения (В.12) между логарифмами удельных активностей сложнодетектируемого и реперного радионуклидов по В.4.3.4—В.4.3.6. Если условие (В.14) не выполнено, то дальнейший анализ осуществляют по В.4.4.

В.4.3.4 Для нахождения параметров функционального соотношения (В.12) используется метод наименьших квадратов. Коэффициент b является угловым коэффициентом (тангенс угла наклона), $\ln(a)$ — линейным коэффициентом прямой (В.12).

В.4.3.5 Для каждого i-го радионуклида из перечня контролируемых радионуклидов вычисляют методом наименьших квадратов по формуле

$$\begin{bmatrix}\ln(a)\\ b\end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta}\cdot\begin{bmatrix}\sum_{k=1}^{n}\frac{x_k^2}{\delta_k^2} & -\sum_{k=1}^{n}\frac{x_k}{\delta_k^2}\\ -\sum_{k=1}^{n}\frac{x_k}{\delta_k^2} & \sum_{k=1}^{n}\frac{1}{\delta_k^2}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\sum_{k=1}^{n}\frac{y_k}{\delta_k^2}\\ \sum_{k=1}^{n}\frac{x_k\cdot y_k}{\delta_k^2}\end{bmatrix}, \tag{В.15}$$

где

$$\Delta = \left[\sum_{k=1}^{n}\frac{1}{\delta_k^2}\right]\cdot\left[\sum_{k=1}^{n}\frac{x_k^2}{\delta_k^2}\right] - \left[\sum_{k=1}^{n}\frac{x_k}{\delta_k^2}\right]^2, \tag{В.16}$$

$$\delta_k = \frac{\Delta A_{i,k}}{A_{i,k}}, \tag{В.17}$$

где $\Delta A_{i,k}$ — абсолютная неопределенность измерений удельной активности $A_{i,k}$, Бк/г.

Неопределенности коэффициентов b и $\ln(a)$ вычисляют по формулам:

$$\delta_{\ln(a)} = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} \frac{x_k^2}{\delta_k^2}} / \Delta, \tag{В.18}$$

$$\delta_b = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} \frac{1}{\delta_k^2}} / \Delta. \tag{В.19}$$

В.4.3.6 Результатом контроля являются функциональные соотношения вида (В.12) с определенными параметрами b и $\ln(a)$ и их неопределенностями для каждого i-го сложнодетектируемого радионуклида с соответствующим реперным радионуклидом.

В.4.3.7 Для повышения достоверности можно применять обобщенный метод наименьших квадратов, который в отличие от стандартного метода наименьших квадратов позволяет учитывать неопределенности контроля как сложнодетектируемых, так и реперных радионуклидов, однако сложнее в реализации и применении.

Применение обобщенного метода наименьших квадратов для определения параметров соотношения между активностями радионуклидов вида

$$\ln(A_{СДР}) = \ln(a) + b \cdot \ln(A_r) \tag{В.20}$$

основано на минимизации обобщенной суммы квадратов

$$S(a,b) = \sum_{i=1}^{n} w_i z_i^2, \tag{В.21}$$

где величины z_i, w_i определяются выражениями

$$z_i = \ln(A_{СДР})_i - (\ln(a) + b \cdot \ln(A_r)_i),$$

$$w_i = 1/s_i^2,$$

а величина s_i^2

$$s_i^2 = s_{\ln(A_{СДР})_i}^2 + \left(b \cdot s_{\ln(A_r)_i}\right)^2.$$

Канонические уравнения метода наименьших квадратов в данном случае имеют вид

$$\begin{cases} \dfrac{\partial S}{\partial \ln a} = 0; & \text{(В.22)} \\ \dfrac{\partial S}{\partial b} = 0. & \text{(В.23)} \end{cases}$$

Обозначив решение уравнений (В.22, В.23) через $\ln \hat{a}, \hat{b}$, из уравнения (В.20) находят

$$\ln \hat{a} = \bar{y} - \hat{b} \cdot \bar{x}, \tag{В.24}$$

где

$$\bar{y} = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot y_i,$$

$$\bar{x} = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot x_i,$$

$$W = \sum_{i=1}^{n} w_i.$$

Подстановка формулы (В.24) в уравнение (В.23) дает для нахождения $\hat{b}$ уравнение

$$F(b)=\sum_{i=1}^{n} w_i^2\left[b\cdot\left(q_i^2/u_i-p_i^2/v_i\right)+\left(1/v_i-b^2/u_i\right)\cdot q_i\cdot p_i\right]=0. \quad (В.25)$$

где

$$p_i = x_i - \overline{x},$$

$$q_i = y_i - \overline{y},$$

$$u_i = 1/s_{x_i}^2,$$

$$v_i = 1/s_{y_i}^2,$$

$$w_i = 1/v_i + b^2/u_i.$$

Для численного решения уравнения (В.25) методом Ньютона—Рафсона требуется вычислить производную $F'(b) = C(b)$. Дифференцируя уравнение (В.25), находят

$$C(b)=\sum_{i=1}^{n} w_i^2\left\{\left(1-4\cdot b^2\cdot w_i/u_i\right)\cdot\left(q_i^2/u_i-p_i^2/v_i\right)+\left[1+2\cdot w_i\cdot\left(1/v_i-b^2/u_i\right)\right]\cdot q_i\cdot p_i/u_i\right\}+4\cdot b^2\cdot\left(Q-b\cdot P\right)^2/W, \quad (В.26)$$

где

$$Q=\sum_{i=1}^{n} w_i^2\cdot q_i/u_i, \quad (В.27)$$

$$P=\sum_{i=1}^{n} w_i^2\cdot p_i/v_i. \quad (В.28)$$

После нахождения $C(b)$ проводят итерации по формуле

$$b_{m+1}=b_m+\frac{F(b_m)}{C(b_m)},\ m=0,1,....,M \quad (В.29)$$

до прекращения выполнения условия

$$|b_M - b_{M-1}| > õ, \quad (В.30)$$

где õ — бесконечно мало.

Тогда

$$\hat{b}=b_M, \ln\hat{a}=\overline{y}-b_M\cdot\overline{x}. \quad (В.31)$$

Для вычисления неопределенности коэффициента b исходя из уравнения (В.25) обозначают через Δb, Δa, Δx_i, Δy_i малые вариации соответствующих величин, после чего находят

$$\Delta b=-C^{-1}\sum_{i=1}^{n}\left(A_i\cdot\Delta x_i+B_i\cdot\Delta y_i\right), \quad (В.32)$$

где $C = C(b)$ — производная функции $F(b)$ в соответствии с формулой (В.21);

$$\begin{cases} A_i=\dfrac{\partial F}{\partial x_i}=-w_i^2\left[2\cdot b\cdot\dfrac{p_i}{v_i}+\left(\dfrac{b^2}{u_i}-\dfrac{1}{v_i}\right)\cdot q_i\right]+\dfrac{2\cdot b^2\cdot w_i\left(Q-b\cdot P\right)}{W}; \\ B_i=\dfrac{\partial F}{\partial y_i}=-w_i^2\left[\left(\dfrac{b^2}{u_i}-\dfrac{1}{v_i}\right)\cdot p_i-2\cdot b\cdot\dfrac{p_i}{u_i}\right]-\dfrac{2\cdot b\cdot w_i\left(Q-b\cdot P\right)}{W}. \end{cases}$$

Предполагается, что случайные величины Δx_i, Δy_i статистически взаимно независимы и их средние значения равны нулю. Тогда из уравнения (В.32) следует, что неопределенность коэффициента b вычисляют по формуле

$$s_b = C^{-2}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{A_i^2}{u_i}+\frac{B_i^2}{v_i}\right). \quad (B.33)$$

При вычислении неопределенности коэффициента ln*a* исходят из уравнений (В.24) и (В.32):

$$\Delta \ln a = \sum_{i=1}^{n}\left(E_i \cdot \Delta x_i + H_i \cdot \Delta y_i\right),$$

где

$$E_i = R \cdot \frac{A_i}{C} - b \cdot \frac{w_i}{W},$$

$$H_i = R \cdot \frac{B_i}{C} + \frac{w_i}{W},$$

$$R = \overline{x} + 2 \cdot b\,(Q - b \cdot P)/W.$$

Таким образом получают неопределенность коэффициента ln*a по формуле:*

$$s_{\ln a} = \left(R \cdot s_b\right)^2 + \frac{1}{W} - 2 \cdot R \cdot b\left(C \cdot W\right)^{-1} \cdot \left(Q - b \cdot P\right). \quad (B.34)$$

В.4.4 В случае невозможности установления соотношений между удельными активностями и логарифмами удельных активностей радионуклидов [радионуклид достоверно не обнаруживается в ходе экспериментального исследования, либо одновременно не выполняются требования (В.2) и (В.14)] в качестве консервативной оценки содержания в потоках РАО сложнодетектируемого радионуклидов принимается максимальное значение по полученным экспериментальным данным.

Для получения нормированных значений рекомендуется осуществить выбор другого реперного радионуклида или отбор дополнительных проб РАО и повторение анализа по алгоритму, приведенному в В.4.1.

В.5 Расчетный метод установления радионуклидного вектора

Для установления радионуклидного вектора потока ТРО, представляющих собой активированные в нейтронных полях реактора материалы и изделия, используют расчетный метод.

Расчет радионуклидного состава РАО и соотношений между удельными активностями радионуклидов выполняют с помощью моделирования нейтронных полей и процесса активации нейтронами материалов активной зоны.

Для вычисления нейтронных полей и расчета наведенной активности применяют специализированные программные средства моделирования распространения нейтронов и их взаимодействия с материалами. При этом определяют активности ряда продуктов активации: ^{51}Cr, ^{54}Mn, ^{55}Fe, ^{59}Fe, ^{57}Co, ^{60}Co, ^{59}Ni, ^{63}Ni, ^{94}Nb. Метод моделирования активации нейтронами крайне требователен к качеству исходных данных, используемых в качестве параметров модели. Для его применения необходима детальная информация о характеристиках активной зоны, включая элементный состав материалов вплоть до примесных и следовых количеств химических элементов, режимах и истории эксплуатации.

Требования к порядку применения расчетного метода установления радионуклидных соотношений изложены в [10]. Реализация метода требует проведения в ограниченном объеме экспериментальных исследований радионуклидного состава и удельных активностей радионуклидов в контролируемых РАО с целью валидации и верификации. Результаты расчета соотношений должны быть валидированы с экспериментальными данными, полученными либо путем отбора проб и анализа содержания в них отдельных радионуклидов из перечня контролируемых, либо путем неразрушающих γ-спектрометрических измерений удельной активности отдельных γ-излучающих радионуклидов в РАО.

В.6 Оформление результатов

В.6.1 Результаты установления радионуклидного вектора для рассматриваемого потока РАО АС оформляют протоколом, в котором указывают:

- вид соотношения (линейное, нелинейное, консервативное);
- соответствующий коэффициент корреляции (для консервативного соотношения не заполняется);
- параметры соотношения [для линейного соотношения по В.4.2 параметр K_i с неопределенностью; для нелинейного соотношения по В.4.3 коэффициенты *b* и ln(*a*) с неопределенностями].

В.6.2 Относительная суммарная стандартная неопределенность измерений удельной активности *i*-го сложнодетектируемого радионуклида $A_{СДР,i}$, Бк/г, в случае линейного соотношения [формула (В.3)] определена выражением

$$u_{A_{СДР,i}} = \sqrt{(u_r^{уд})^2 + u_{K_i}^2}, \quad (В.35)$$

где u_{K_i} — относительная стандартная неопределенность измерений параметра радионуклидного вектора K_i;

u_{A_r} — относительная суммарная стандартная неопределенность измерений удельной активности реперного радионуклида A_r, Бк/г, в контейнере с РАО.

Для нелинейного соотношения [формула (В.10)] относительная суммарная стандартная неопределенность измерений удельной активности сложнодетектируемого радионуклида вычисляют по формуле

$$u_{A_{СДР,i}} = \sqrt{\left(\delta_{\ln(a_i)}\right)^2 + \left(\delta_{b_i}\right)^2 \cdot \left(\ln\left(A_r\right)\right)^2 + \left(u_{A_r}\right)^2 \cdot b_i^2}, \quad (В.36)$$

где $\delta_{\ln(a_i)}$ и δ_{b_i} — относительные неопределенности параметров радионуклидного вектора a_i и b_i, соответственно.

В.6.3 Точность расчета удельной активности сложнодетектируемых радионуклидов в упаковке (партии) РАО АС оценивают путем сопоставления рассчитанных значений с результатами измерений с применением методов разрушающего контроля. Отклонение расчетного значения от определяемого методами разрушающего контроля не должно превышать один порядок величины.

В.6.4 Установленные радионуклидные векторы должны быть утверждены в составе инструкции по обращению с РАО АС или в другом документе, принятом на АС для характеризации РАО.

Библиография

[1] Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии НП-093-14 — Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения

[2] Федеральный закон от 11 июля 2011 № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты»

[3] РБ-154-19 Руководство по безопасности — Рекомендации по применению метода радионуклидных соотношений для определения содержания сложнодетектируемых радионуклидов в радиоактивных отходах предприятий ядерного топливного цикла

[4] Федеральный закон от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии»

[5] Постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов»

[6] Постановление Правительства РФ от 15 июня 2016 г. № 542 «Положение об организации системы государственного учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов»

[7] Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии НП-002-15 — «Правила безопасности при обращении с радиоактивными отходами атомных станций»

[8] ИСО 19017—2015 — Отходы радиоактивные. Руководство по измерению методом гамма-спектрометрии

(ISO 19017—2015) — (Guidance for gamma spectrometry measurement of radioactive waste)

[9] МАГАТЭ Технический документ-1092 — Руководство по мониторингу при ядерных или радиационных авариях

(IAEA-TECDOC-1092) — (Generic procedures for monitoring in a nuclear or radiological emergency. IAEA, Vienna, Austria, 1999)

[10] ИСО 16966—2013 — Ядерная энергия. Технология ядерного топлива. Теоретический метод расчета активации для оценки радиоактивности активированных отходов, генерируемых в ядерных реакторах

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

[11] Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 30 июля 2018 г. № 325 «Об утверждении Порядка проведения экспертизы программ для электронных вычислительных машин, используемых в целях построения расчетных моделей процессов, влияющих на безопасность объектов использования атомной энергии и (или) видов деятельности в области использования атомной энергии»

[12] Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии № NW-T-1.18 — Определение и использование масштабных коэффициентов для характеризации отходов на атомных электростанциях

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

[13] ИСО 21238—2007 — Ядерная энергия. Технология ядерного топлива. Метод с применением масштабного коэффициента для определения радиоактивности пакетов радиоактивных отходов низкого и среднего уровня, полученных на ядерных электростанциях

(ISO 21238:2007) — (Nuclear energy- Nuclear fuel technology-Scaling factor method to determine the radioactivity of low- and intermediate-level radioactive waste packages generated at nuclear power plants)

УДК 621.039.75:006.354

ОКС 13.030.30
27.120.20

Ключевые слова: радиоактивные отходы, классификация РАО, критерии приемлемости, захоронение, атомная станция

Редактор *Л.С. Зимилова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *С.В. Смирнова*
Компьютерная верстка *Л.А. Круговой*

Сдано в набор 29.12.2021. Подписано в печать 01.02.2022. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 4,65. Уч.-изд. л. 4,24.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «РСТ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru