

На правах рукописи

Долгих Вероника Павловна

**Разработка технологических подходов
обращения с радиоактивными отходами
в зависимости от периода
потенциальной опасности**

05.17.02 – Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2017 год

Работа выполнена в отделе учета и контроля радиоактивных отходов Опытного завода прикладных радиохимических технологий Федерального государственного унитарного предприятия «Объединенный эколого-технологический и научно-исследовательский центр по обезвреживанию РАО и охране окружающей среды»

**Научный
руководитель:**

доктор биологических наук
Лашенова Татьяна Николаевна
Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Государственный научный центр Российской Федерации –
Федеральный медицинский биофизический центр
имени А.И. Бурназяна» ФМБА России, ведущий научный
сотрудник лаборатории регулирующего надзора за объектами
наследия

**Официальные
оппоненты:**

доктор химических наук
Милютин Виталий Витальевич
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физической химии и электрохимии
им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук, заведующий
лабораторией хроматографии радиоактивных элементов

кандидат технических наук
Шарафутдинов Рашет Борисович
Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический
центр по ядерной и радиационной безопасности», заместитель
директора

**Ведущая
организация:**

Акционерное общество «Ведущий научно-исследовательский
институт химической технологии»

Защита состоится 19 октября 2017 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.204.09 при Российском химико-технологическом университете имени Д.И. Менделеева (125480, г. Москва, ул. Героев Панфиловцев, д.20, корпус 1) в конференц-зале имени академика В.А. Легасова ИМСЭН-ИФХ.

С диссертацией можно ознакомиться в информационно-библиотечном центре Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева и на официальном сайте <http://diss.muctr.ru>.

Автореферат разослан « » _____ 2017 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
Д 212.204.09, кандидат технических наук

Растунова И.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. При эксплуатации и выводе из эксплуатации ядерных и радиационно-опасных объектов встаёт проблема обращения с радиоактивными отходами (РАО), которые неизбежно образуются на всех стадиях жизненного цикла. За 60-летний срок в атомной отрасли и народном хозяйстве накоплено и продолжает образовываться огромное количество РАО, которые необходимо утилизировать. По проблемам иммобилизации и изоляции РАО проводятся работы, направленные на оптимизацию системы обращения.

Технология переработки РАО определяется агрегатным состоянием, удельной активностью и количеством отходов, а также техническими и финансовыми возможностями предприятия. Выбор варианта изоляции зависит от радиационных характеристик отходов и является экономической и социальной задачей, которая решается в зависимости от классификации РАО, основанной на удельной активности отходов. Основным недостатком существующей классификации является то, что она не учитывает период потенциальной опасности отходов, референтным показателем которого является срок сохранения потенциальной опасности РАО ($T_{\text{ппо}} \text{ РАО}$), и его возможное увеличение за счет накопления дочерних радионуклидов. Это приводит к тому, что при размещении РАО в пунктах хранения (ПХ) РАО не учитывается $T_{\text{ппо}} \text{ РАО}$. В результате в ПХ РАО размещены упаковки РАО как с давно истёкшим $T_{\text{ппо}}$, так и РАО, которые ещё продолжительное время будут представлять потенциальную радиационную опасность.

В настоящей работе для этого предложены усовершенствованные технологические подходы к обращению с РАО, которые ориентированы на изоляцию РАО в зависимости от срока сохранения потенциальной опасности РАО. Решение этих вопросов является важной и актуальной задачей.

Целью работы является разработка технологических подходов к обращению с РАО в зависимости от периода потенциальной опасности.

Для достижения этой цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Провести анализ исходных характеристик РАО, определяющих способ утилизации.
2. Определить срок сохранения потенциальной опасности РАО, с учетом вклада дочерних радионуклидов.
3. Уточнить классификацию РАО, с учетом срока сохранения потенциальной опасности РАО, и технологических особенностей обращения с отходами.
4. Усовершенствовать и унифицировать технологические схемы обращения с РАО, в зависимости от срока сохранения потенциальной опасности РАО и морфологического состава отходов.
5. Разработать критерии приемлемости для основных технологических этапов обращения с РАО, в зависимости от способа утилизации.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Детально проанализированы характеристики РАО, поступающих на утилизацию и находящихся в пунктах хранения РАО. Выявлен перечень радионуклидов, которые вносят основной вклад в суммарную активность поступающих на утилизацию РАО.
2. Выявлены особенности характеристики упаковок РАО большого размера при неравномерном распределении радионуклидов в объеме упаковки.

3. Показано, что размещение отходов в пунктах хранения РАО должно происходить в зависимости от срока сохранения потенциальной опасности РАО с учётом прогноза накопления дочерних радионуклидов для определенного перечня материнских радионуклидов.

4. Установлены сроки сохранения потенциальной опасности РАО для основного набора радионуклидов для 2,3,4 классов РАО в зависимости от исходной удельной активности.

5. Разработаны дополнительные группы при классификации РАО по классам, в зависимости от намеченного способа изоляции, которые позволят формировать окончательные упаковки РАО для утилизации с близкими сроками сохранения потенциальной опасности.

6. Усовершенствованы и унифицированы технологические схемы для каждого способа утилизации РАО в зависимости морфологического состава отходов, от радионуклидного состава и исходной удельной активности, срока сохранения потенциальной опасности РАО.

Практическая значимость:

1. Показано, что при определении срока сохранения потенциальной опасности РАО необходимо учитывать накопление дочерних радионуклидов.

2. Показана необходимость использования срока сохранения потенциальной опасности РАО в качестве основного критерия при выборе технологических подходов обращения с РАО.

3. Предложены усовершенствованные унифицированные технологические схемы обращения с РАО, которые базируются на системе классификации РАО, учитывающей срок сохранения потенциальной опасности РАО, и позволят своевременно выводить из-под регулирующего контроля упаковки РАО, не представляющие радиационную опасность для окружающей среды в технологии утилизации радиоактивных элементов.

4. Показано, что применение технологических подходов к обращению с РАО, в зависимости от срока сохранения потенциальной опасности РАО, приводит к существенному снижению затраченных финансовых средств на утилизацию РАО и может достигать ~ 80 %.

Внедрение результатов:

1. при разработке Технологической инструкции Ти Рад 27-2014 «Контроль и учёт радиоактивных веществ и радиоактивных отходов», Инв. № 0110 от 30.07.2014, которая введена в действие приказом по предприятию в ФГУП «РАДОН» № 622 от 07.08.2014 г.;

2. при разработке ПД Рад 24-2013 «Инструкция по учёту и контролю радиоактивных веществ и радиоактивных отходов ФГУП «РАДОН», Инв. № 1050 от 18.09.2013 г., которая введена в действие приказом по предприятию № 633 от 23.09.2013 г.;

3. при разработке ПКИ Рад 91-2012 «Программа качества измерений радиоактивных веществ и радиоактивных отходов», которая введена в действие приказом по предприятию №737 от 22.11.2012 г.;

4. при разработке Пи Рад 90-2012 (взамен Пи Рад 90-2012) «Программа измерений радиоактивных веществ и радиоактивных отходов», которая введена в действие приказом по предприятию № 737 от 22.11.2012 г.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Перечень радионуклидов, которые вносят основной вклад в суммарную активность РАО, поступающих на утилизацию, и определяют суммарную активность РАО, находящихся в пунктах хранения РАО.

2. При характеристике упаковки РАО большого размера, для уменьшения влияния неравномерного распределения активности на относительную погрешность измерения, необходимо корректировать «шаблон геометрии» при измерении или уменьшать объём упаковки РАО за счет переупаковки.

3. Перечень материнских радионуклидов, для которых необходимо учитывать вклад дочерних радионуклидов в срок сохранения потенциальной опасности радиоактивных отходов, категорирование которых по классам необходимо проводить на стадии сбора и по дочернему радионуклиду.

4. Срок сохранения потенциальной опасности РАО, с учетом прогноза накопления дочерних радионуклидов, который является основным критерием выбора способа утилизации для 2,3,4 классов РАО, в зависимости от исходной удельной активности.

5. Классификация РАО по дополнительным группам внутри классов, в зависимости от намеченного способа изоляции, которые позволят формировать окончательные упаковки РАО для утилизации, с близкими сроками сохранения потенциальной опасности.

6. Усовершенствованные унифицированные технологические схемы обращения с РАО и критерии приемлемости для каждого технологического этапа в зависимости от морфологического состава, радионуклидного состава и исходной удельной активности, срока сохранения потенциальной опасности РАО, которые определяют способ утилизации.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнялась в рамках «Программы совершенствования и повышения качества, безопасности, надежности средств и методов производства при обезвреживании РАО, обеспечения радиационной безопасности населения и охраны окружающей среды» ФГУП «РАДОН» на 2009 – 2014 гг., утвержденной руководителем Департамента жилищно-коммунального хозяйства и благоустройства Правительства Москвы; а также в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы (Шифр темы 2010-1.4-204-001-012).

Методология и методы исследования. В работе приведены результаты исследования характеристик РАО и продуктов их переработки, поступавших в ФГУП «РАДОН» в 2008 – 2014 годы (более 20 тысяч упаковок). Исследования заключались в характеристике РАО, находящихся в обращении в ФГУП «РАДОН», внесение данных в информационно-техническую систему учёта и контроля РАО, анализ массива данных о радионуклидном составе и удельной активности РАО.

Личный вклад автора. При планировании, организации и проведении исследований по всем разделам и этапам работы доля участия автора составила 80 %. Анализ полученных материалов и обобщение результатов исследований полностью проведены автором.

Степень достоверности результатов проведённых исследований подтверждается объёмом экспериментальных исследований, выполненных по аттестованным методикам в аккредитованной аналитической лаборатории ФГУП «РАДОН».

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на II, V, VI международных ядерных форумах (Санкт-Петербург, 2007, 2010, 2011); на международной конференции «Plutonium Futures» (Кембридж, 2012); на V международной научно-технической конференции молодых учёных и специалистов атомной отрасли «Команда-2013» (Санкт-Петербург, 2013); на всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Новоуральск, 2010); на VI, VII российских конференциях по радиохимии «Радиохимия» (Москва, 2009; Димитровград, 2012); на российской научно-технологической конференции с

международным участием (Екатеринбург, 2011); на V молодежной научно-практической конференции «Ядерно-промышленный комплекс Урала: проблемы и перспективы», (Озёрск, 2009); на IV российской школе по радиохимии и ядерным технологиям (Озёрск, 2010); на отраслевой научно-практической конференции «Наука, производство, экологическая безопасность» (Северск, 2010); на X всероссийской выставке научно-технического творчества молодежи (Москва, 2010); на молодежной конференции с элементами научной школы «Современные проблемы радиохимии и радиоэкологии» (Москва, 2011); на I, II, III, IV конференциях молодых учёных, аспирантов и студентов «Обращение с радиоактивными отходами. Проблемы и решения» (Сергиев Посад, 2006, 2008, 2010, 2011).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 26 научных работ, в том числе 2 статьи в журналах рекомендуемых ВАК.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы. Общий объём работы составляет 167 страниц основного текста, включая 41 таблицу и 22 рисунка. Список использованных источников содержит 199 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы основные цели и задачи, показана научная новизна работы и практическая значимость полученных результатов. В **главе 1** представлен литературный обзор, в котором анализируются основные этапы обращения с РАО, нормативно-правовое обеспечение каждого этапа, проанализированы вопросы категорирования источников ионизирующего излучения по степени потенциальной опасности, существующие технологические методы переработки РАО; изучены существующие технологические способы последующего хранения/захоронения. Рассмотрены проблемы государственной системы учёта и контроля радиоактивных веществ (РВ) и РАО и внедрения систем учёта и контроля РВ и РАО на предприятиях. Сформулированы задачи, на решение которых направлено диссертационное исследование.

В **главе 2** представлены методы, методики, средства измерений, показан объём исследования.

В **главе 3** проведен анализ характеристик РАО, поступивших в ФГУП «РАДОН» за период 2012 – 2014 годы, учет которых проводится в информационно-технической системе контроля и учёта РАО (система КиУ РАО), разработанной и внедренной в 2006 году на предприятии при участии автора.

Номенклатура РАО, поступающих в ФГУП «РАДОН», представлена самыми разными отходами. Отходы поступают из организаций и предприятий контура «Росатома», исследовательских институтов, медицинских и других учреждений. Несмотря на разнообразие их радионуклидного состава (более 100), можно выделить радионуклиды, которые вносят основной вклад в суммарную активность поступающих РАО: ^3H , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{125}I , ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{241}Am , ^{239}Pu , ^{238}Pu , ^{192}Ir . Периоды полураспада этих радионуклидов варьируются от 60 дней до $2,4 \times 10^4$ года и определяют срок сохранения потенциальной радиационной опасности.

Детальный анализ характеристик позволил выявить среднегодовые объёмы поступающих РАО, которые распределяются следующим образом. Почти 88 % от общего объёма РАО относится к 4 классу удаляемых РАО, из них 79 % – очень низкоактивные РАО (ОНАО) и 9 % – низкоактивные РАО (НАО), которые загрязнены радионуклидами с периодом полураспада меньше 31 год. К 3 классу по объёму относятся 11% РАО, из них 8% НАО загрязнены

радионуклидами с периодом полураспада больше 31 год и 3 % среднеактивные РАО (САО) с периодом полураспада меньше 31 год.

Определение достоверной удельной и суммарной активности радионуклидов является важной характеристикой, которая определяет срок сохранения потенциальной опасности радионуклида. При определении характеристик РАО, поступающих на предприятие, существуют проблемы, связанные с их измерением, особенно для больших упаковок с неизвестным распределением радионуклидов по их объёму. Для этого в рамках данной работы провели исследование влияния неравномерного распределения активности в объёме упаковки на точность измерения. Исследование провели для контейнера большого объёма КРАД-1,36. Для этого имитировали разные матрицы наполнения (воздух, вода, целлюлоза), имеющие разную плотность, и гетерогенное и гомогенное распределение радионуклидов по объёму контейнера. В качестве источников излучения использовали эталонные источники ОМАСН в количестве 18 штук, которые располагали следующим образом: равномерно, неравномерно с точкой в центре, неравномерно с плоскостью с лицевой стороны. Источники располагали таким образом для того, чтобы выявить зависимость полноты регистрации гамма-квантов при прохождении через матрицу до детектора при разном распределении радионуклидов. Активность одного источника (на 28.08.2012 год) составляла: $^{152}\text{Eu} - 1,71 \times 10^5$ Бк; $^{137}\text{Cs} - 1,27 \times 10^5$ Бк с заявленной погрешностью аттестации 6 % ($P = 0,95$). Измерение активности контейнера провели со всех сторон в течение 1800 секунд на многоканальном гамма спектрометре ISOCS.

Результаты расчёта полученных спектров позволили провести корректную интерпретацию данных, провести расчёт относительной погрешности. В результате установлено, что при равномерном размещении источников – отклонение измеренной активности от активности эталонных источников составило 6 – 12 %; а для источников, помещённых в центре КРАД-1,36 составило 66 – 99 %.

Для исключения погрешности в измерении предложили для корректировки толщины поглотителя при создании шаблона геометрии определить «тест отношений» к ключевой линии. «Тест отношений» к ключевой линии – отношение активности каждой из линий к активности, рассчитанной по ключевой линии. Для этого строили графическую зависимость: по оси абсцисс откладывали – энергию гамма кванта, по оси ординат – отношение площади пика выхода гамма кванта с этой же энергией. Положительный наклон указывает на толщину поглотителя при создании шаблона меньшую, чем при измерении образца. Отрицательный наклон говорит о том, что при создании шаблона использована толщина большая, чем при измерении образца. Если наклон приближения равен нулю, шаблон измерений составлен корректно.

Показано, что после корректировки шаблона геометрий, при помощи построения теста отношений, существенно снизили относительную погрешность. При определении ^{137}Cs (геометрия: неравномерно, точка в центре, вода) относительная погрешность равна 99 %. После корректировки шаблона для данной геометрии относительная погрешность составила уже 10%. Однако, если отходы, загрязнены одним радионуклидом, который испускает один тип гамма квантов, построение теста отношений по одной точке не возможно. К таким радионуклидам относятся: ^{241}Am , ^{137}Cs (по $^{137\text{m}}\text{Ba}$), ^{40}K , ^{54}Mn , ^{144}Ce , ^{89}Sr . Для исключения влияние неравномерного распределения радионуклидов в объёме упаковки в этом случае требуется переупаковка РАО в упаковки небольшого объёма. Проведение такой операции позволяет уточнить учетную удельную активность РАО, а, следовательно, и $T_{\text{пю}}$ РАО упаковки.

В процессе хранения суммарная активность РАО меняется. На основе исходных учетных данных в системе КиУ РАО на дату их размещения, рассчитали суммарную активность РАО в двух «исторических» ПХ РАО на 2012 год, через 100 и 300 лет (X1 с 1990 – 1991 годы, X2 с 2006 – 2008 годы). Провели прогноз изменения суммарной активности от момента размещения соответственно на 2012, 2112 и 2312 годы, который представили на рисунке 1.

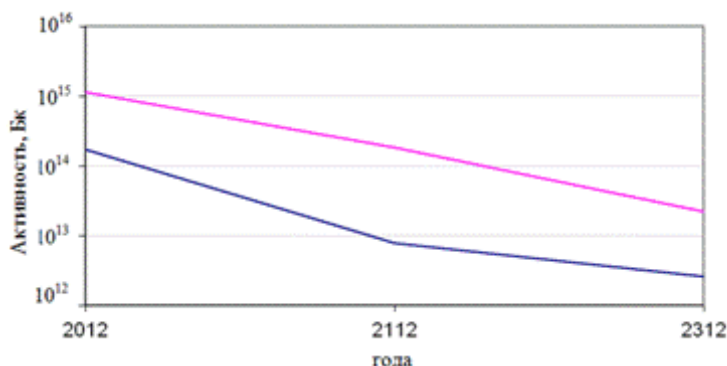


Рис. 1. Изменение суммарной активности в ПХ РАО X1 и X2 в процессе хранения через 100 и 300 лет
 — Синяя линия – суммарная активность X1;
 — Розовая линия – суммарная активность X2.

от момента размещения соответственно на 2012, 2112 и 2312 годы, который представили на рисунке 1. Анализ рисунка 1 показывает, что в ПХ РАО X1 в сравнении с X2 происходит снижение суммарной активности быстрее. Расчет показывает, что к 2112 году она уменьшится в 21 раз, в 2312 в 62 раза, а в ПХ РАО X2 соответственно в 6 и 52 раза.

В качестве примера на рисунке 2 показано изменение радионуклидного состава и суммарной активности для основных радионуклидов в

ПХ РАО X1 и X2 через 100 и 300 лет.

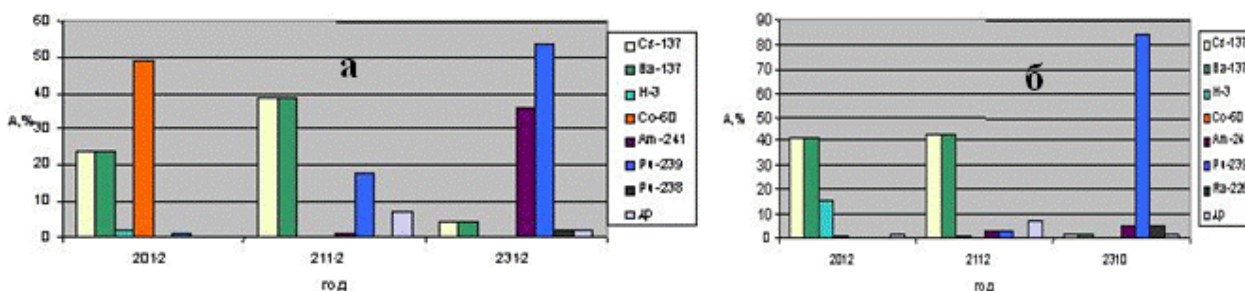


Рис. 2. Прогноз изменения суммарной активности для основных радионуклидов для двух приповерхностных ПХ РАО X1 (а) и ПХ РАО X2 (б)

Расчет показал, что в X1 в 2012 год суммарная активность по радионуклидному составу распределялась так: ⁶⁰Co – 49 %, ¹³⁷Cs – 24 %, дочерний радионуклид ¹³⁷Cs – ^{137m}Ba – 24 %, ³H – 2 % и другие – 1 %, в том числе ²³⁹Pu. Через 100 лет до 78 % суммарную активность будет определять ¹³⁷Cs и его дочерний радионуклид ^{137m}Ba в равных долях, и до 14 % возрастет суммарная активность ²³⁹Pu, через 300 лет она будет определяться ²³⁹Pu на 52 % и на 36 % ²⁴¹Am. Анализ данных по хранилищу X2 показал, что в 2012 год суммарная активность определялась следующими радионуклидами: ¹³⁷Cs с ^{137m}Ba – 41%, ³H – 15% и ⁶⁰Co – 1%. К 2112 году суммарная активность до 86 % будет определяться ¹³⁷Cs и ^{137m}Ba в равных долях, содержание ²³⁹Pu и ²⁴¹Am не превысит 3%, ³H – 1 %. А к 2312 году суммарная активность на 84 % будет определяться ²³⁹Pu и на 10 % ²²⁶Ra и ²⁴¹Am.

Проведенный прогноз изменения суммарной активности радионуклидов показывает, что радионуклиды ²³⁹Pu, ²⁴¹Am, которые имеют большой период полураспада, но их содержание при размещении на хранение не вносили существенного вклада в суммарную активность, со временем будут определять срок сохранения T_{ппо} РАО, находящихся в ПХ РАО. Исходя из этого, размещение отходов в ПХ РАО должно происходить с учётом прогноза из-

менения $T_{\text{ппо}}$ РАО за счет накопления дочерних радионуклидов, и этот показатель должен стать основным критерием для выбора способа утилизации РАО.

В главе 4 разработаны подходы к определению $T_{\text{ппо}}$ РАО. В процессе хранения РАО происходит изменение радионуклидного состава вследствие накопления дочерних радионуклидов. Исходя из этого, при размещении упаковок РАО в ПХ РАО, необходимо учитывать не только потенциальную опасность на момент размещения, но и изменение потенциальной опасности со временем.

В работе предлагается ввести этот критерий – $T_{\text{ппо}}$ упаковки РАО, как основной, который определяет технологические особенности обращения с РАО на всех этапах, в том числе и способ изоляции. Разработан подход, позволяющий прогнозировать изменение характеристик РАО для каждой учетной единицы от начала хранения до этапа освобождения от контроля. Для упаковки РАО, загрязненной несколькими радионуклидами, необходимо определить $T_{\text{ппо}}$ каждого радионуклида, как материнского, так и дочернего. Наиболее продолжительный $T_{\text{ппо}}$ радионуклида будет определять $T_{\text{ппо}}$ упаковки РАО.

При определении $T_{\text{ппо}}$ радионуклида, а точнее $T_{\text{ппо}}$ радиационного ряда, необходимо учитывать начальную активность материнского радионуклида (A_0), и соотношение $T_{1/2}$ материнского радионуклида ($T_{1/2\text{м}}$), и дочернего радионуклида ($T_{1/2\text{д}}$). В зависимости от соотношения периодов полураспада материнского и дочернего радионуклидов встречается 3 варианта скорости изменения суммарной и удельной активности: период полураспада материнского радионуклида несравнимо больше дочернего ($T_{1/2\text{д}} \ll T_{1/2\text{м}}$); период полураспада материнского радионуклида соизмерим или несколько больше периода полураспада дочернего $T_{1/2\text{д}} \leq T_{1/2\text{м}}$; период полураспада материнского радионуклида $T_{1/2\text{м}}$ меньше, чем у дочернего радионуклида $T_{1/2\text{м}} < T_{1/2\text{д}}$

Вариант 1 (вековое равновесие). В случае если в результате распада материнского радионуклида образуется дочерний, который имеет значительно меньший $T_{1/2\text{д}}$, чем материнский $T_{1/2\text{м}}$, то $T_{\text{ппо}}$ упаковки РАО определяет материнский радионуклид. Такие цепочки радиоактивных превращений для следующих радионуклидов: $^{243}\text{Am} \rightarrow ^{239}\text{Np}$, $^{137}\text{Cs} \rightarrow ^{137\text{м}}\text{Ba}$, $^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{214}\text{Pb} \rightarrow ^{214}\text{Bi}$, $^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{Pa}$, $^{106}\text{Ru} \rightarrow ^{106}\text{Rh}$, $^{228}\text{Th} \rightarrow ^{212}\text{Pb}$, $^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{Th}$, и др.

Вариант 2 (подвижное равновесие). Если период полураспада материнского радионуклида соизмерим или несколько больше периода полураспада дочернего, то с течением времени активность дочернего возрастёт до состояния подвижного равновесия с материнским радионуклидом. Затем радионуклиды начинают распадаться примерно с одинаковой скоростью. Но если минимально значимая удельная активность материнского радионуклида ($MЗУA_{\text{м}}$) больше, чем минимально значимая активность дочернего радионуклида ($MЗУA_{\text{д}}$) ($MЗУA_{\text{д}} < MЗУA_{\text{м}}$), то $T_{\text{ппо}}$ упаковки РАО, в этом случае, определяет $T_{\text{ппо}}$ дочернего радионуклида. К таким цепочкам можно отнести $^{234}\text{U} \rightarrow ^{230}\text{Th}$ и $^{228}\text{Ra} \rightarrow ^{228}\text{Th}$.

Вариант 3 (равновесие не наступает). В этом варианте период полураспада материнского радионуклида меньше, чем у дочернего: материнский радионуклид распадается быстрее, чем дочерний. Максимальная накопленная удельная активность дочернего радионуклида значительно меньше, чем начальная удельная активность материнского радионуклида. Скорость распада дочернего радионуклида существенно ниже, чем у материнского. Время, за которое удельная активность дочернего радионуклида достигнет величины $MЗУA_{\text{д}}$ существенно больше, чем у материнского. Это время определяет $T_{\text{ппо}}$ радионуклида ряда и увеличи-

вается пропорционально исходной удельной активности материнского радионуклида.

Ниже приведены материнские радионуклиды, для которых необходимо учитывать вклад дочерних радионуклидов в $T_{\text{ппо}}$ упаковки РАО: $^{147}\text{Pm} \rightarrow ^{147}\text{Sm}$; $^{152}\text{Eu} \rightarrow ^{152}\text{Gd}$; $^{204}\text{Tl} \rightarrow ^{204}\text{Pb}$; $^{236}\text{Pu} \rightarrow ^{232}\text{U}$; $^{241}\text{Pu} \rightarrow ^{241}\text{Am}$; $^{238}\text{Pu} \rightarrow ^{234}\text{U}$; $^{244}\text{Cm} \rightarrow ^{240}\text{Pu}$.

В работе провели оценку вклада дочерних радионуклидов в срок сохранения $T_{\text{ппо}}$ РАО. На рисунке 3 представлены примеры изменения удельных активностей материнского и дочернего радионуклидов для 2-го и 3-го вариантов распада. Анализ рисунка 3а (подвижное равновесие) в цепочке $^{228}\text{Ra} \rightarrow ^{228}\text{Th}$ показывает, что если материнский радионуклид ^{228}Ra на-

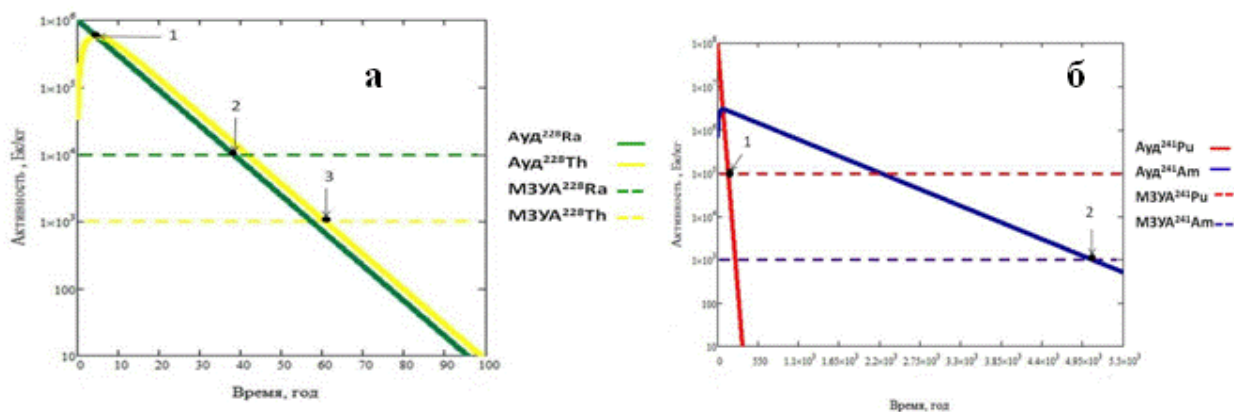


Рис. 3. Изменение удельной активности материнского и дочернего радионуклидов в процессе хранения в цепочках распада $^{228}\text{Ra} \rightarrow ^{228}\text{Th}$ (а), $^{241}\text{Pu} \rightarrow ^{241}\text{Am}$ (б)

чинает распад с исходной удельной активностью $1,0 \times 10^6$ Бк/кг, то через 4,5 года устанавливается равновесие между дочерним и материнским радионуклидом (точка 1). Затем их практически равные между собой удельные активности уменьшаются с одинаковой скоростью. Через 38 лет (точка 2), активность ^{228}Ra достигает МЗУА ^{228}Ra ($1,0 \times 10^4$ Бк/кг). Через 60 лет (точка 3), активность ^{228}Th достигает МЗУА ^{228}Th ($1,0 \times 10^3$ Бк/кг). Из вышесказанного следует, что для упаковки РАО, радиоактивность которой определяется радионуклидом ^{228}Ra , срок сохранения $T_{\text{ппо}}$ упаковки РАО увеличится с 38 лет до 60 лет за счет накопления дочернего ^{228}Th , и будет определяться сроком сохранения $T_{\text{ппо}}$ дочернего радионуклида ^{228}Th .

На рисунке 3б показана цепочка $^{241}\text{Pu} \rightarrow ^{241}\text{Am}$, пример распада по варианту 3, когда равновесие не наступает. У материнского радионуклида ^{241}Pu , с исходной удельной активностью 1×10^8 Бк/кг, через 143 года удельная активность снизится до МЗУА ^{241}Pu (точка 1), которая составляет $1,0 \times 10^5$ Бк/кг. За это время накопится дочерний радионуклид ^{241}Am с удельной активностью $2,7 \times 10^6$ Бк/кг, превышающей МЗУА ^{241}Am , более чем на 3 порядка. Удельная активность ^{241}Am снизится до своей МЗУА, которая равна $1,0 \times 10^3$ Бк/кг, только через $4,9 \times 10^3$ лет. Следовательно, $T_{\text{ппо}}$ упаковки РАО увеличится с 143 лет до $4,9 \times 10^3$ лет.

В процессе хранения класс таких РАО при хранении поменяется с 3 на 2. Исходя из этого, получается, что при содержании в упаковке ^{241}Pu , изначально необходимо определять $T_{\text{ппо}}$ упаковки РАО на стадии формирования по содержанию дочернего ^{241}Am , и классифицировать по дочернему радионуклиду.

Необходимо обратить внимание на то, что отходы, содержащие ^{241}Pu с начальной удельной активностью ^{241}Pu меньше МЗУА равное $1,0 \times 10^5$ Бк/кг (точка 1), условно не являются РАО в начальный момент, могут стать отходами за счет накопления дочернего радионуклида. Такая зависимость изменения соотношения удельной активности ^{241}Pu и ^{241}Am представлена на рисунке 4.

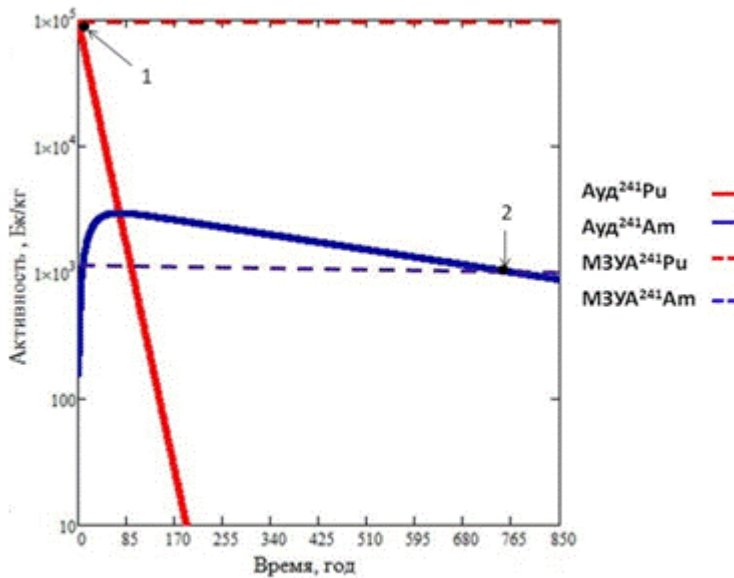


Рис. 4. Изменение удельных активностей радионуклидов в цепочке $^{241}\text{Pu} \rightarrow ^{241}\text{Am}$ в процессе хранения, с исходной активностью ^{241}Pu $1,0 \times 10^5$ Бк/кг

накопления дочернего радионуклида на стадии сбора.

Вклад дочерних радионуклидов в $T_{\text{ппо}}$ упаковки РАО по варианту 3 зависит от начальной удельной активности материнского радионуклида, при этом может происходить изменение категории отходов в процессе хранения. На рисунке 5 показана зависимость накопления дочернего радионуклида ^{232}U от исходной удельной активности материнского радионуклида ^{236}Pu в цепочке $^{236}\text{Pu} \rightarrow ^{232}\text{U}$. На рисунке 5а видно, что отходы категории ОНАО 4 класса по ^{236}Pu с удельной активностью $1,0 \times 10^5$ Бк/кг снизят активность до уровня МЗУА ^{236}Pu через 9,5 лет (точка 1). К этому моменту накопится ^{232}U с удельной активностью $3,49 \times 10^3$ Бк/кг,

При распаде ^{241}Pu через 8 лет накапливается такое количество дочернего радионуклида ^{241}Am , что отходы переходят в категорию РАО. Через 65 лет удельная активность ^{241}Am достигает своего максимума $1,4 \times 10^3$ Бк/кг будет превышать и величину своего МЗУА ^{241}Am в 1,4 раза. Снижение активности ^{241}Am до МЗУА наступит только через 771 год (точка 2). Поэтому отходы, загрязненные ^{241}Pu , с удельной активностью в интервале от $3,3 \times 10^4$ до $1,0 \times 10^5$ Бк/кг можно отнести к 4 классу и к категории ОНАО за счет накопле-

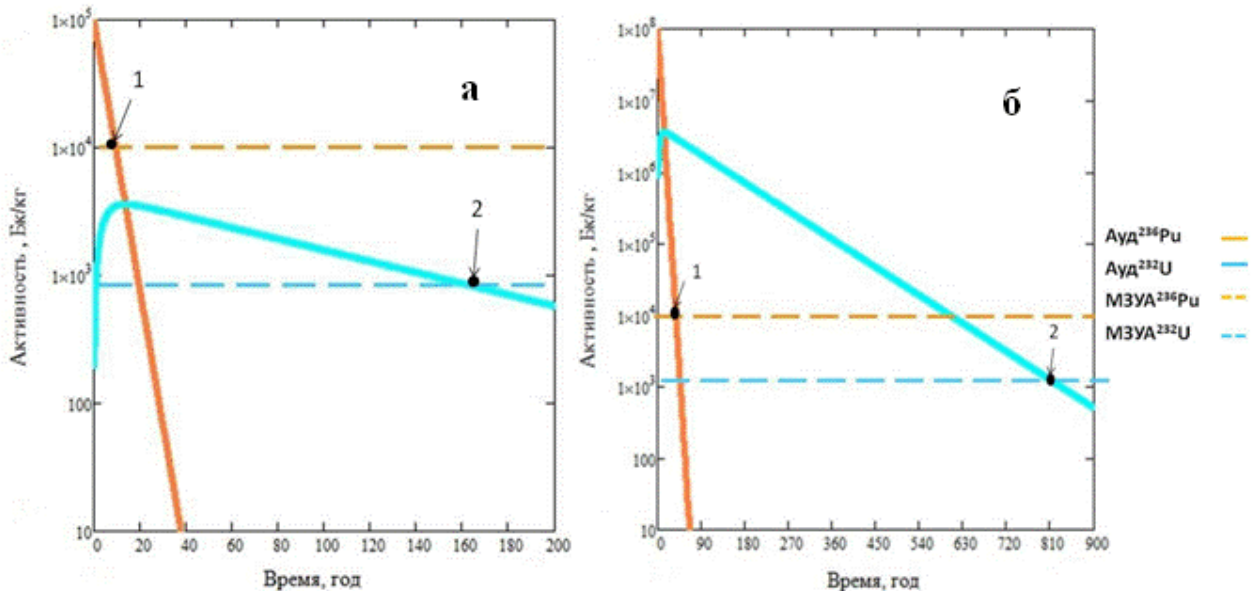


Рис. 5. Изменение удельной активности радионуклидов в цепочке $^{236}\text{Pu} \rightarrow ^{232}\text{U}$, в процессе хранения в зависимости от исходной удельной активностью ^{236}Pu : $1,0 \times 10^5$ Бк/кг (а); $1,0 \times 10^8$ Бк/кг (б)

у которого активность снизится до показателя МЗУА ^{232}U через 150 лет (точка 2). $T_{\text{ппо}}$ упаковки РАО увеличится с 9,5 лет до 150 лет, но категория отходов и класс в этом случае не поменяется. Но в случае, если исходная удельная активность ^{236}Pu будет $1,0 \times 10^8$ Бк/кг, то

класс отходов изменится с 3 на 2. Объяснение представлено на рисунке 5б, где показано, что за счет накопления дочернего радионуклида ^{232}U $T_{\text{ппо}}$ упаковки РАО увеличится с 38 лет до 830 лет.

Активность ^{232}U будет соответствовать САО (для альфа-излучающие менее 10^6 Бк/кг) с $T_{1/2} > 31$ год. И отходы на стадии сбора должны сразу категорироваться 2 классом по дочернему радионуклиду.

Анализ таблицы 1 показал, что для НАО 3 и 4 класса, содержащих ^{241}Pu , которые распадаются по цепочке $^{241}\text{Pu} \rightarrow ^{241}\text{Am}$ и условно не являются РАО в начальный момент, за счет накопления дочернего радионуклида являются РАО 3 класса и будут потенциально опасными в течение 771 года.

По предложенному подходу установили $T_{\text{ппо}}$ для основного набора радионуклидов для всех классов РАО по ПП № 1069 в зависимости от исходной удельной активности (ОНАО, НАО, САО). Полученные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1

Периоды потенциальной опасности $T_{\text{ппо}}$ РАО в зависимости от класса по ПП № 1069

Радионуклид			ОНАО			НАО			САО		
Символ	$T_{1/2}$, лет	МЗУА, Бк/кг	Класс	А, Бк/кг	$T_{\text{ппо}}$, лет	Класс	А, Бк/кг	$T_{\text{ппо}}$, лет	Класс	А, Бк/кг	$T_{\text{ппо}}$, лет
^{60}Co	5,27	10^4	4	10^6	35	4	10^7	53	3	10^{10}	105
^{252}Cf	2,64	10^4	–	10^4	–	4	10^5	8,8	3	10^8	35 ↓
^{248}Cm	$3,4 \times 10^5$	10^3	–	10^4	–	–	10^5	–	4	10^8	$5,4 \times 10^3$
^{137}Cs	30,1	10^4	4	10^6	200	4	10^7	300	3	10^{10}	600
^{236}Pu	2,85	10^4	–	10^4	–	4	10^5	9,5 ↓	3	10^8	38 ↓
^{232}U	68,5	10^3	–	10^5	–	4	10^6	150 ↓	2 ↓	10^9	830 ↓
^3H	12,2	10^9	4	10^{10}	41	4	10^{11}	81	3	10^{14}	203
^{238}Pu	87,7	10^3	4	10^4	291	3	10^5	583 ↓	2 ↓	10^8	$1,5 \times 10^3$
^{234}U	$2,4 \times 10^5$	10^4	–	10^5	–	–	10^6	–	2	10^9	7×10^3 ↓
^{239}Pu	$2,4 \times 10^4$	10^3	4	10^4	$8,0 \times 10^4$	3	10^5	$1,6 \times 10^5$	2	10^8	$4,0 \times 10^5$
^{226}Ra	$1,6 \times 10^3$	10^4	4	10^5	$5,3 \times 10^3$	3	10^6	$1,1 \times 10^4$	2	10^9	$2,7 \times 10^4$
^{228}Ra	5,75	10^4	4	10^5	19 ↓	4	10^6	38 ↓	3 ↓	10^9	95 ↓
^{228}Th	1,91	10^3	4	10^5	41 ↓	4	10^6	60 ↓	3 ↓	10^9	117 ↓
^{90}Sr	28,6	10^5	4	10^6	95	4	10^7	190	3	10^{10}	475
^{192}Ir	0,20	10^4	4	10^6	1,33	4	10^7	2	3	10^{10}	4
^{125}I	0,16	10^4	4	10^6	1,10	4	10^7	1,6	3	10^{10}	3,30
^{241}Pu	14,4	10^5	–	10^4	–	* ↓	10^5	*	3 ↓	10^8	143 ↓
^{241}Am	$4,3 \times 10^2$	10^3	–	10^4	–	4 ↓	10^5	771 ↓	2 ↓	10^8	$4,9 \times 10^3$ ↓

* – не являются РАО, но затем переходят в категории РАО за счет накопления дочернего радионуклида;
Прочерк – не являются РАО.

Для САО при распаде ^{241}Pu и ^{252}Cf срок сохранения $T_{\text{ппо}}$ увеличивается с $1,4 \times 10^2$ до $4,9 \times 10^3$ и с 35 до $5,4 \times 10^3$ лет соответственно. В процессе хранения САО для материнских радионуклидов ^{241}Pu , ^{252}Cf , ^{236}Pu класс отходов увеличивается с 3 на 2. Из этого следует, что класс отходов с течением времени может меняться и это необходимо учитывать на стадии сбора и далее до этапа утилизации.

В главе 5 предложили группировку РАО зависимости от намерения дальнейшей утилизации. Существующая система классификации твёрдых отходов на 4 класса нуждается в уточнении, поскольку позволяет формировать упаковки, содержащие радионуклиды с $T_{\text{ппо}}$, отличающимся до 5 порядков внутри одного класса. В таблице 1 показано, что $T_{\text{ппо}}$ меняется для ОНАО в интервале от 1,1 года до $8,0 \times 10^4$ лет, для НАО от 1,6 до $1,6 \times 10^5$ лет, для САО от

3,3 до $4,0 \times 10^5$ лет. В работе предложили ввести дополнительные группы внутри классов, которые позволят группировать отходы с близкими $T_{\text{пто}}$.

Разработку этих групп провели на примере отходов, поступающих в ФГУП «РАДОН» в период с 2012 по 2014 год. Для этого в системе КиУ РАО при участии автора разработали и внедрили модуль по расчёту $T_{\text{пто}}$ упаковки РАО, и провели определение этого параметра для 20512 исходных учетных упаковок РАО. Затем разделили все учетные данные для РАО в зависимости от $T_{\text{пто}}$ упаковки РАО со следующим шагом: менее ста лет анализировали через 5 лет, более 100 лет с шагом 50 лет, РАО с $T_{\text{пто}}$ более 300 лет объединили в одну группу.

Провели анализ по двум параметрам, $T_{\text{пто}}$ радионуклидов и учетные объёмы РАО, поступающие на предприятие, и выявили закономерности, которые позволили предложить следующую градацию для формирования групп в зависимости от $T_{\text{пто}}$ РАО: 5, 35, 50, 95, 105, 190, 300 и более лет, которая представлена в таблице 2.

Таблица 2

Классификация РАО по группам в зависимости от срока сохранения $T_{\text{пто}}$ РАО и класса РАО по ПП № 1069

$T_{\text{пто}}$ РАО, лет	Класс РАО	Средне-годовой объём, %	Группа $T_{\text{пто}}$ РАО, лет	Способ изоляции, тип размещения и контейнеризации
300 и больше	3 и 4	25	1	Окончательная изоляция РАО. Размещение в пунктах глубинного захоронения. Контейнеры типа НЗК.
От 190 до 300	3 и 4	6	2	Долговременное хранение от 190 до 300 лет. Размещение на глубине до 100 метров. Контейнеры типа НЗК.
От 105 до 190	4	13	3	Долговременное хранение от 105 до 190 лет. Размещение на одном уровне с поверхностью земли. Контейнеры типа НЗК.
От 95 до 105	3 и 4	6	4	Долговременное хранение от 95 до 105 лет. Размещение на глубине до 100 метров. Контейнеры типа НЗК.
От 50 до 95	3 и 4	10	5	Долговременное хранение от 50 до 95 лет. Размещение на глубине до 100 метров. Контейнеры типа НЗК.
От 35 до 50	4	6	6	Временное хранение от 35 до 50 лет. Размещение на одном уровне с поверхностью земли. Контейнеры типа КМЗ и КРАД.
От 5 до 35	4	9	7	Временное хранение от 5 до 35 лет. Размещение на одном уровне с поверхностью земли. Контейнеры типа КМЗ и КРАД.
Меньше 5	3 и 4	25	8	Промежуточное хранение до 5 лет в месте образования или уполномоченной организации. Выводом из-под регулирующего контроля через 5 лет. Любые упаковки и контейнеры типа КМГ.

Анализ таблицы 2 показывает, что до 25 % образуется РАО, относящихся к 8 и 1 группе. Остальные 50 % распределяются между остальными классами. Объём остальных РАО, выходящих за пределы этих групп, несущественный для выделения их в отдельные группы. Предложенная группировка отходов позволит сократить объём отходов, размещаемых на утилизацию. Можно выделить до 25 % объёма отходов, относящихся к 8 группе (отходы 3 и 4 класса) с $T_{\text{пто}}$ менее 5 лет на промежуточное хранение, с последующим выводом из-под регулирующего контроля. Для окончательного захоронения объём отходов составляет до 25 %, и выделен в группу 1. Остальные отходы предназначены для временного или долговременного хранения в ПХ РАО, которые можно извлекать по окончании срока сохранения $T_{\text{пто}}$ РАО в зависимости от группы.

Для промежуточного хранения подходят любые упаковки, в частности КМГ. Упаковки КРАД и КМЗ обеспечивают необходимый уровень безопасности на протяжении 50 лет и предназначены для временного хранения. В них можно размещать отходы без иммобилизации, за исключением легковоспламеняющихся и гниющих РАО. Для долговременного хранения подходит контейнер НЗК, который может сохранять свои изолирующие свойства на весь срок хранения до 300 лет. На окончательное захоронение кондиционированные РАО размещаются в контейнер НЗК.

В главе 6 разработаны технологические подходы обращения с РАО, в зависимости от $T_{\text{ппо}}$ РАО. Для этого разработали унифицированные технологические схемы обращения с РАО в зависимости срока необходимой изоляции РАО, который определяет способ утилизации. В зависимости от срока изоляции все ПХ РАО делятся на: промежуточное хранение РАО до 5 лет; временное хранение РАО от 5 до 50 лет; долговременное хранения РАО от 50 до 300 лет, порядок вывода из эксплуатации которого не предусмотрен; захоронение РАО – безопасное размещение РАО без намерения последующего извлечения с обеспечением радиационной безопасности ПХ РАО, населения и окружающей среды. Способов захоронения РАО может быть несколько: приповерхностное (наземное, заглубленное) и глубинное захоронение РАО.

В работе разработали основные критерии приемлемости для определения способа кондиционирования РАО. Эти критерии ориентированы на окончательный способ утилизации и зависят от: срока сохранения потенциальной радиационной опасности РАО, референтным показателем которого является $T_{\text{ппо}}$ РАО; морфологического состава; физико-химические свойств РАО и удельной активности. Критерии приемлемости для каждой технологической стадии и полученные технологические схемы приведены на рисунке 4.

На схеме все потоки с отходами разделили на четыре группы: зелёный цвет – РАО с удельной активностью радионуклидов для промежуточного хранения, желтый цвет – для временного хранения, красный цвет – для долговременного хранения, синий цвет – для окончательного захоронения.

Размещение в ПХ РАО кондиционированных форм РАО для каждого способа утилизации происходит в соответствии с удельной активностью. Поскольку на всех технологических стадиях иммобилизации, таких как прессование, сжигание, остекловывание, холодное и горячее прессование, переплавка металла и остальных происходит изменение массы и удельной активности, в работе провели их расчет на входе и после. Расчет провели на примере наиболее часто встречающихся радионуклидов на примере РАО ФГУП «РАДОН».

Определили изменения массы РАО на технологических переделах для нескольких технологических схем обращения с РАО, в зависимости от исходного морфологического состава РАО и определили изменение удельной активности. Для этого рассчитали коэффициенты изменения массы для каждого способа переработки в зависимости от исходного морфологического состава, которые определяли как отношение массы РАО к массе продуктов переработки. При прессовании, вследствие того, что упаковка становится частью РАО, удельная активность уменьшается в 1,7 – 2,5 раза. При фрагментации масса отходов не меняется существенно. При сжигании отходов радионуклиды концентрируются в меньшем объеме, и удельная активность увеличивается в зависимости от морфологического состава исходных

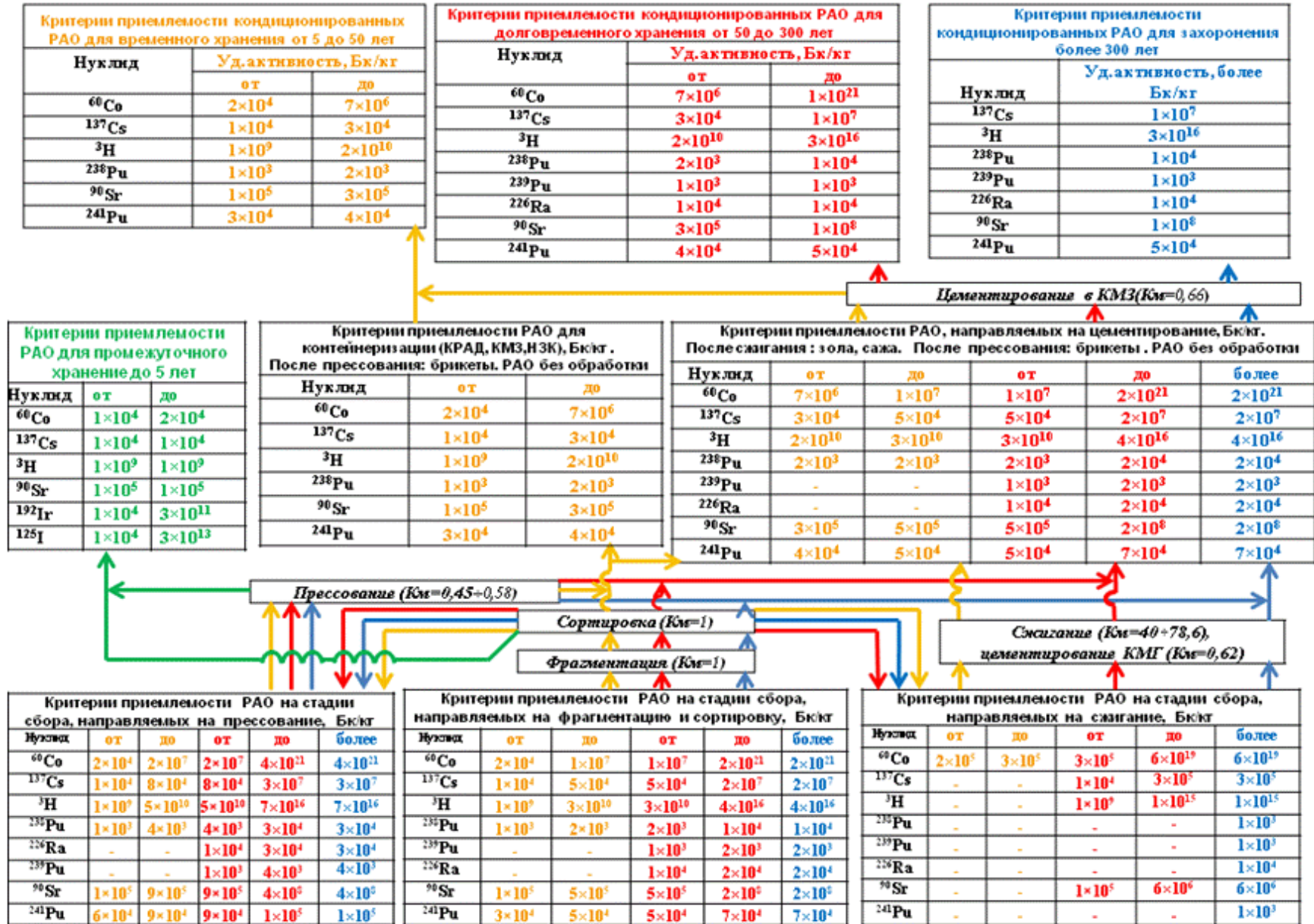


Рис. 6 Технологические схемы обращения с РАО, в зависимости от срока изоляции

РАО от 40 до 78 раз. После сжигания золу и сажу цементируют и размещают в контейнер КМГ, и удельная активность отходов уменьшается приблизительно в 1,5 раза за счет разбавления неактивной составляющей. Затем определили для основных технологических схем, с какой удельной активностью должны поступают отходы, чтобы после иммобилизации их они соответствовали критериям приемлемости для намеченного способа утилизации.

Соответственно, необходимо разработать дополнительные требования к сортировке отходов на стадии сбора в месте образования, которые должны препятствовать смешению отходов с разными сроками хранения, и формировать упаковки на этой стадии уже в зависимости от намерения размещения на окончательную утилизацию. Это позволило сформировать критерии приемлемости упаковок РАО на стадии сбора в зависимости от способа захоронения. Далее на каждом технологическом переделе формируются вторичные упаковки РАО, которые и размещают на окончательную утилизацию, требования к которым зависят от срока сохранения $T_{\text{ппо}}$ РАО.

Расчет экономической эффективности в результате внедрения предложенных подходов и оптимизации технологических схем обращения с РАО провели с помощью объёмных и количественных показателей на производственном участке по переработке на примере метода цементирования. Экономические расчеты показали, что общая экономия средств при переработке прессуемых РАО составила в 2012 году 9,30 млн. рублей, в 2013 году – 53,73 млн. рублей и составляет 33 % и 89 % от затраченных на обращение РАО. Из вышесказанного следует, что $T_{\text{ппо}}$ РАО является экономически обоснованным критерием при определении способа обращения с РАО.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы по разработке технологических подходов к обращению с РАО.

1. Проведен анализ исходных характеристик РАО и получили:

1.1. Среднегодовые объёмы поступающих РАО распределяются следующим образом: 88 % от общего объёма РАО относится к 4 классу удаляемых РАО, из них 79 % – ОНАО и 9 % – НАО, которые загрязнены радионуклидами с периодом полураспада меньше 31 года. К 3 классу по объёму относятся 11% РАО, из них 8% НАО загрязнены радионуклидами с периодом полураспада больше 31 года и 3 % САО с периодом полураспада меньше 31 года.

1.2. Выявлен перечень радионуклидов, которые вносят основной вклад в суммарную активность поступающих РАО и определяет суммарную активность РАО, находящихся в ПХ РАО: ^3H , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{125}I , ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{241}Am , ^{239}Pu , ^{238}Pu , ^{192}Ir .

2. Выявлено, что для определения достоверной удельной и суммарной активности радионуклидов при характеристике упаковок большого размера с неизвестным распределением радионуклидов по объёму упаковок необходимо:

2.1. Уменьшить влияние неравномерного распределения активности на относительную погрешность измерения нужно за счет корректировки с помощью построения теста отношений в шаблоне геометрий.

2.2. На стадии входного контроля при неравномерном распределении в объёме радионуклидов загрязнённых радионуклидами: ^{241}Am , ^{137}Cs (по $^{137\text{m}}\text{Ba}$), ^{40}K , ^{54}Mn , ^{144}Ce , ^{89}Sr , которые испускают один тип гамма квантов, построение теста отношений по одной точке не возможно, это требует переупаковку РАО в упаковки небольшого объёма. Проведение такой операции позволяет уточнить учетную удельную активность РАО и $T_{\text{ппо}}$ РАО упаковки.

3. Срок сохранения $T_{\text{ппо}}$ РАО должен стать основным критерием для выбора способа утилизации РАО. Размещение отходов в ПХ РАО должно происходить в зависимости от срока сохранения $T_{\text{ппо}}$ РАО, с учётом прогноза изменения $T_{\text{ппо}}$ РАО за счет накопления дочерних радионуклидов.

4. Выявлен перечень материнских радионуклидов, для которых необходимо учитывать вклад дочерних радионуклидов в срок сохранения $T_{\text{ппо}}$ РАО отходов:

4.1. В зависимости от начальной удельной активности материнского радионуклида и соотношения периодов полураспада $T_{1/2}$ материнского и дочернего радионуклида $T_{\text{ппо}}$ упаковки РАО определяет материнский радионуклид для следующих радионуклидов: ^{243}Am , ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{237}Np , ^{106}Ru , ^{228}Th , ^{238}U и др.;

4.2. В зависимости от соотношения минимально значимой удельной активности материнского и дочернего радионуклида, если $MЗУA_{\text{д}} < MЗУA_{\text{м}}$, то $T_{\text{ппо}}$ упаковки РАО определяет дочерний радионуклид для следующих материнских радионуклидов: ^{234}U , ^{228}Ra .

4.3. Для отходов, содержащих материнские радионуклиды: ^{147}Pm ; ^{152}Eu ; ^{204}Tl ; ^{236}Pu ; ^{241}Pu ; ^{238}Pu ; ^{244}Cm ; ^{252}Cf необходимо учитывать вклад дочерних радионуклидов в $T_{\text{ппо}}$ упаковки РАО, они должны сразу категорироваться на стадии сбора по прогнозу изменения удельной активности дочернего радионуклида.

5. Установлены $T_{\text{ппо}}$ для основного набора радионуклидов для 2,3,4 классов РАО в зависимости от исходной удельной активности отходов, для ОНАО, НАО, САО.

6. Предложена классификация РАО по дополнительным группам внутри классов, в зависимости от намеченного способа изоляции:

6.1. Выделены 8 групп для РАО в зависимости от $T_{\text{ппо}}$ РАО. Группа 1 с $T_{\text{ппо}}$ РАО больше 300 лет; группа 2 с $T_{\text{ппо}}$ РАО в интервале от 190 до 300 лет; группа 3 – от 105 до 190 лет; 4 группа – от 95 до 105; 5 группа – от 50 до 95 лет; 6 группа – от 35 до 50 лет; 7 группа – от 5 до 35 лет; 7 группа – от 5 до 35 лет; 8 группа меньше 5 лет, на основании которой предложены рекомендации способу размещения в хранилище и используемого типа контейнера.

6.2. Выявлен среднегодовой объёма поступления РАО для каждого класса, который позволил существенно уменьшить объём РАО для утилизации на 25 %.

7. Установлено, что класс отходов при хранении может меняться за счет накопления дочерних радионуклидов, это необходимо учитывать на стадии сбора при формировании первичных упаковок и окончательных упаковок с отвержденными РАО, размещаемых на утилизацию.

7.1. При хранении САО для материнских радионуклидов ^{241}Pu , ^{236}Pu класс отходов увеличивается с 3 на 2.

7.2. Отходы, содержащие ^{241}Pu с начальной удельной активностью меньше $MЗУA$, условно не являются РАО, но за счет накопления дочернего радионуклида ^{241}Am через 8 лет переходят в категорию ОНАО 4 класса.

8. Предложены усовершенствованные унифицированные технологические схемы обращения с РАО для каждого способа утилизации в зависимости от $T_{\text{ппо}}$ РАО.

9. Для каждого технологического этапа обращения в зависимости от морфологического состава отходов разработаны критерии приемлемости, которые определяются радионуклидным составом и удельной активностью радионуклидов, сроком сохранения $T_{\text{ппо}}$ РАО, с учетом накопления дочерних радионуклидов.

10. Показано, что применение технологических подходов обращение с РАО в зависимости от срока сохранения $T_{\text{ппо}}$ РАО приводит к существенному снижению затрат на утилизацию РАО и может достигать ~ 80 %.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Вербицкий В.В., Черкесов А.Э., Рогозин В.И., Долгих В.П. Информационно-техническое обеспечение процессов обращения РАО. Система комплексного контроля радиационных и физических характеристик РАО в ГУП МосНПО «Радон» // АНРИ. 2007. №3. С. 47-50.

2. Долгих В.П., Вербицкий В.В., Волков А.С., Брыкин С.Н. Проблемы паспортизации радиоактивных отходов//Безопасность окружающей среды. 2008. №1. С.54-59.

3. Долгих В.П., Коренков И.П., Вербицкий В.В., Лащеннова Т.Н. Основные параметры контроля при долговременном хранении радиоактивных отходов в приповерхностных хранилищах / Ядерно- промышленный комплекс Урала: проблемы и перспективы: Тез. докл. V молодежная научно- практическая конф. 20-23 апр. 2009 г. Озерск, 2009. - С. 99-101.

4. Коренков И.П., Вербицкий В.В., Лащеннова Т.В., Долгих В.П. Подходы к категорированию источников ионизирующего излучения // Безопасность окружающей среды. 2010. №1. С. 106-110.

5. Долгих В.П., Вербицкий В.В., Рогозин В.И. Применение системы контроля и учета для оптимизации размещения радиоактивных отходов в хранилищах ГУП МосНПО «Радон» / Безопасность ядерных технологий. Стратегия и экономика безопасности: Сбор. доклад V Междунар. ядер. форум. 27сент.- 1окт. 2010 г. Санкт- Петербург, 2010. С. 342-344.

6. Долгих.В.П. Новые подходы к размещению РАО в пунктах хранения / Молодежь ЯТЦ: наука, производство, экологическая безопасность: Тезис. докл. отрасл. научно-практич. конф. молодых специал. и аспирантов 8-11 ноября 2011. Железногорск, 2011.С. 64-66.

7. Долгих В.П., Лащеннова Т.Н, Вербицкий. В.В. Структура и анализ данных системы контроля и учета РАО в ГУП МосНПО «Радон» / Актуальные проблемы радиохимии и радиоэкологии: Материалы Росс. научно-техноч. конф. с междунар. участием, Екатеринбург, 9-11 ноября 2011. Екб: УрФУ, 2011. С.254-258.

8. Долгих. В.П. Разработка подходов к определению периода потенциальной опасности радиоактивных отходов / Радиохимия- 2012: Тез. докл. VII Российская конференция по радиохимии 15-19 окт. 2012 г. Димитровград, 2012. С. 209.

9. Долгих В.П. Применение неразрушающих методов контроля для характеристики контейнеров большого объема // АНРИ. 2013. №1. С. 37-41.

10. Долгих В.П. Разработка подходов определения периода потенциальной опасности радиоактивных отходов с учетом дочерних радионуклидов / Команда – 2013: Тез. докл. V международная научно- техническая конференция молодых ученых и специалистов атомной отрасли 03 – 07 июн. 2013 г. Санкт-Петербург, 2013. С.36-38.

11. Долгих В.П., Попов Э.П. Определение радиационных характеристик облучённых конструкционных элементов сборок активной зоны реакторов БН большой мощности // Вопросы атомной науки и техники ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2017. вып. 1. С.144-153.