

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЗАХОРОНЕНИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ, СОДЕРЖАЩИХ ЯДЕРНЫЕ ДЕЛЯЩИЕСЯ МАТЕРИАЛЫ

В. С. Внуков, Б. Г. Рязанов, В. И. Свиридов

АО «Государственный научный центр Российской Федерации — Физико-энергетический институт имени А. И. Лейпунского», г. Обнинск, Калужская область

Статья поступила в редакцию 4 июня 2019 г.

В статье рассмотрены подходы к обеспечению ядерной безопасности при захоронении радиоактивных отходов, содержащих ядерные делящиеся материалы, в зависимости от типа и конструкции пунктов захоронения с учетом сценариев их эволюции. Рассмотрены методы определения содержания делящихся радионуклидов в захораниваемых радиоактивных отходах.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, ядерная безопасность, пункт захоронения радиоактивных отходов, ядерные делящиеся материалы, долговременная ядерная безопасность, сценарии эволюции пункта захоронения.

В соответствии с требованиями российского законодательства все радиоактивные отходы (РАО) должны быть захоронены в пунктах захоронения РАО (ПЗРО), конструкция которых должна обеспечивать защиту человека и окружающей среды от действия ионизирующего излучения на весь период их потенциальной опасности [1]. Поскольку период потенциальной опасности РАО имеет продолжительность от сотен до сотен тысяч лет, то при оценке долговременной безопасности ПЗРО необходимо учитывать изменение условий их захоронения, свойств конструкционных материалов и материалов радиоактивных отходов. В зависимости от активности и радиологической опасности, РАО делятся на шесть классов [2]. Наиболее опасные отходы (1, 2 и 5 классы) должны захораниваться в пунктах глубинного захоронения (ПГЗРО и ПГЖРО), а остальные — в приповерхностных пунктах захоронения (ППЗРО) [2]. Разделение РАО по способу захоронения обусловлено в том числе

и периодом их радиационной опасности. При низком содержании ядерно опасных делящихся нуклидов (ЯДН) в захораниваемых РАО объем РАО в ПЗРО составляет тысячи кубометров, масса ЯДН — десятки и даже сотни килограммов, поэтому нельзя априори исключить возможность возникновения самоподдерживающейся цепной реакции деления (СЦР).

Одним из важнейших показателей безопасности ПЗРО является их ядерная безопасность, которая определяется, в первую очередь, количеством ядерных делящихся материалов, содержащихся в размещенных в них РАО.

Ядерная и радиационная безопасность ПЗРО должна быть обеспечена на период их опасности (от 300 до 1000 лет). ЯДН обладают длительными периодами полураспада. К примеру, период полураспада ^{235}U составляет около 700 млн лет, ^{239}Pu — около 24 тыс. лет. Поэтому при оценке ядерной опасности необходимо рассматривать и учитывать продолжительные

по времени процессы, в результате которых в ПЗРО может образоваться надкритическая система. Такими процессами могут являться деструкция матричных материалов, включающих РАО, их уплотнение, изменение химического и минералогического состава горных пород, происходящих в результате геологических процессов, протекающих в районе размещения ПЗРО, и процессов взаимодействия РАО с вмещающими породами, выход ЯДН из контейнеров, переход их в подземные воды и миграция в геологической среде, возможное концентрирование ЯДН в результате геохимических процессов.

Соответственно, условия ядерной безопасности, установленные по результатам экспертизы проектных материалов ПЗРО без учета сценариев развития и эволюции системы захоронения в целом, включая конструкцию объекта и природные условия района его размещения, не позволяют, строго говоря, исключить возможность возникновения СЦР даже при выполнении требований по содержанию ЯДН в захораниваемых РАО, а тем более определить ее параметры, механизмы гашения возможной СЦР после истечения прогнозного срока.

Обращение с РАО, содержащими ЯДН, паспортизацию упаковок и партий отходов перед их передачей на захоронение осуществляют эксплуатирующие организации, где они образуются, которые и должны обеспечить их приведение к критериям приемлемости для захоронения в том или ином ПЗРО.

Требования к ядерной безопасности, учету и контролю ядерных материалов на установках ядерного топливного цикла (ЯТЦ) при обращении с ними, включая РАО, содержащие ЯДН, установлены федеральными правилами [3–6], стандартами Госкорпорации «Росатом» [7, 8] и заключениями по ядерной безопасности. Требования, критериев и норм, в том числе в части учета и контроля ядерных материалов, вполне достаточно для обеспечения ядерной безопасности при обращении с РАО и их упаковками при временном хранении на установках и перевозке в ПЗРО.

Общие требования безопасности и критерии приемлемости РАО для захоронения установлены федеральными нормами и правилами [9–12] и сводятся к следующему:

- на передаваемые для захоронения РАО должен быть оформлен паспорт, содержащий в том числе и сведения об их изотопном составе и удельной активности. Паспорт составляется организацией, в результате деятельности которой образовались РАО, или организацией, осуществившей их переработку и кондиционирование;

- при приеме передаваемых на захоронение РАО Национальный оператор по обращению с РАО должен осуществлять их контроль, который включает в себя проверку атрибутивных признаков передаваемых упаковок и партий отходов;
- упаковки РАО, содержащие ЯДН, должны удовлетворять требованиям ядерной безопасности, установленным федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии;
- соответствие РАО критериям приемлемости для захоронения должно подтверждаться экспериментальными (инструментальными) и (или) расчетными методами при условии, что они основаны на результатах предварительных прямых и (или) косвенных измерений значимых контролируемых параметров технологического процесса;
- характеристики и свойства РАО, направляемых на захоронение, должны быть определены в объеме и с точностью, позволяющими подтвердить соответствие критериям приемлемости РАО для захоронения.

Концентрация ЯДН в ЖРО, поступающих в ПГЗ ЖРО, должна быть ограничена, чтобы исключить возможность возникновения СЦР с учетом их концентрирования при миграции в поглощающих горизонтах. Концентрация ЯДН в ЖРО не должна превышать пределов, установленных для данного ПГЗ ЖРО в соответствии с требованиями ядерной безопасности, установленными федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии.

Таким образом, в целом для обоснования ядерной безопасности в долгосрочной перспективе необходимо получить ответы на следующие основные вопросы:

- возможна ли миграция ЯДН из РАО и их концентрирование в породах, и если да, то каков состав этих пород и какова предельная концентрация в них ЯДН;
- возможно ли фракционирование (выщелачивание, экстракция, сорбция) ЯДН (например, разделение урана и плутония) и каковы будут предельные значения их концентраций в результате внешних событий и эволюции.

Ответы на эти вопросы позволяют определить, возможно ли образование надкритической системы, в которой концентрация/содержание ЯДН в породе превышает минимальное критическое значение для прогнозируемого состава, и если это возможно, то превышает ли масса ЯДН критическое значение для системы данного состава. Следует отметить, что, как правило, суммарная аккумулятивная масса ЯДН

в ПЗРО гораздо выше минимального критического значения.

Значения безопасных критических содержаний даже для смесей ^{235}U с эффективными замедлителями, без поглотителей тепловых нейтронов (например, железо, алюминий, никель), гораздо выше технологических значений (менее 10 мг/кг). Например, их значения для смесей ^{235}U с простыми веществами составляют:

$(\text{MgF}_2 + ^{235}\text{U}) - 0,25 \text{ г } ^{235}\text{U}/\text{кг};$

$(\text{CaF}_2 + ^{235}\text{U}) - 0,42 \text{ г } ^{235}\text{U}/\text{кг};$

$(\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_2 + ^{235}\text{U}) - 9 \text{ г } ^{235}\text{U}/\text{кг};$

$(\text{C} + ^{235}\text{U}) - 0,08 \text{ г } ^{235}\text{U}/\text{кг};$

$(\text{SiO}_2 + ^{235}\text{U}) - 0,8 \text{ г } ^{235}\text{U}/\text{кг}.$

Значения безопасных критических концентраций для смесей ^{239}Pu с этими веществами близки к вышеприведенным и изменяются от 0,05 до 7 г $^{239}\text{Pu}/\text{кг}$.

Таким образом, СЦР в ПЗРО будет исключена, если в результате внешних событий и эволюции системы захоронения будет исключена возможность концентрирования ЯДН (^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu) в РАО более 0,05 г ЯДН на кг РАО. Пороговые значения концентраций и масс ЯДН в упаковках, партиях РАО, предназначенных для захоронения, должны определяться, исходя из этой величины, с учетом коэффициентов концентрирования ЯДН в результате внешних событий и эволюции, а также погрешностей определения содержания ЯДН в кондиционированных РАО. Следует отметить, что погрешности определения содержания ЯДН в РАО, подготовленных к захоронению, весьма велики вследствие малых значений этих величин и неопределенности, связанной с пробоотбором, особенно для высокоактивных ТРО. Значения относительных погрешностей составляют 10–50 %, что приводит к резкому снижению пороговых значений.

Для решения этой проблемы Отделом ядерной безопасности АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» разработан опытный образец установки с импульсным нейтронным генератором для активного нейтронного анализа суммарной массы ЯДН (^{235}U , ^{239}Pu , ^{239}Pu) в 200-литровых контейнерах (бочках) с твердыми РАО, определены ее нормируемые метрологические характеристики. В текущем году планируется завершить ее испытания, подготовить комплект документов для получения сертификата об утверждении установки в качестве типа средств измерений и провести аттестацию методики выполнения измерений. Подобная установка может быть разработана и для контейнеров типа НЗК, заполненных ТРО «навалом», и для остеклованных ВАО в «бидонах» и пеналах с бидонами. Пока не получены доказательства, что подобный метод и установка могут

быть применены для контроля РАО, находящихся внутри транспортно-защитного контейнера, который предназначен для защиты от мощного гамма- и нейтронного излучения и используется для обращения с ВАО на ФГУП «ПО «Маяк».

Рассмотрим более подробно подходы к оценке допустимого содержания ЯДН в различных типах ПЗРО.

Пункты глубинного захоронения средне- и высокоактивных жидких радиоактивных отходов

Захоронение ЖРО, содержащих ^{235}U и ^{239}Pu , начиная с 60-х годов прошлого века осуществляется на ПЗ ЖРО в глубоко залегающие пласты-коллекторы [13].

Проведенными исследованиями установлено, что для нуклидов, находящихся в ЖРО в микроконцентрациях, наблюдается равновесность процессов накопления, имеется верхний предел накопления в породах, который практически линейно зависит от концентрации нуклида в растворе, т.е. при заполнении порового пространства пласта ЖРО, нуклиды в результате физико-химических процессов распределяются между твердой фазой и поровой жидкостью и находятся в равновесном состоянии. Поскольку при нагнетании происходит поступление в поровое пространство пласта новых порций отходов, за равновесное содержание нуклида в поровой жидкости принимается содержание нуклида в удаляемых отходах.

Геофизическими исследованиями в наблюдательных скважинах установлено, что заполнение подземных хранилищ отходами происходит равномерно. Соответственно, и удаляемые с отходами ЯДН распределяются в толще горных пород равномерно. На основании этого факта, крайне низкой концентрации калифорния в отходах (менее 10^{-5} мкг/л) и его незначительного накопления в породах (десятые доли мкг/л) в дальнейшем он не рассматривался.

В заключениях по ядерной безопасности, разработанных по результатам экспертизы проектных материалов ПЗ ЖРО, были определены параметры объектов на период прогнозируемого срока эксплуатации и сформулированы следующие критерии и выводы.

Для эксплуатируемых ПЗ ЖРО ^{239}Pu является нуклидом, определяющим критические параметры образующихся систем. Максимально возможное его накопление в песчаных породах ПЗ ЖРО полигона «Северный» составляет не более 80 мг/л при исходной концентрации в ЖРО 0,3 мг/л. Оценка максимальной суммарной

концентрации ^{235}U и ^{239}Pu в породах, выполненная для полигона «Северный» на основании исследований, проведенных ИФХЭ РАН, показала, что максимальное значение этой величины не превысит 100 мг/л. Это значение в десятки раз меньше минимальной критической концентрации.

Для полигона филиала «Димитровградский» ФГУП «НО РАО» соответствующие значения концентраций равны 7,9 и 0,01 мг/л. В результате выполнения консервативных расчетов и оценок установлено, что на этом полигоне при исходной концентрации ЯДН в ЖРО, равной 0,01 мг/л, содержание ЯДН в III водоносном комплексе составит менее 26 мг/л, в IV водоносном комплексе — не более 3,2 мг/л, что меньше безопасной концентрации в 75 раз для III водоносного комплекса и в 175 раз — для IV водоносного комплекса.

Пункты приповерхностного захоронения твердых низкоактивных РАО 3 и 4 класса

Радиоактивные отходы 3 и 4 класса направляются на захоронение в приповерхностные пункты захоронения. Технологические процессы, связанные с изменением агрегатного состояния отходов, в ППЗРО не предусматриваются.

Приведенные в проектной документации и в отчете по обоснованию безопасности данные свидетельствуют, что в течение прогнозируемого срока потенциальной радиационной опасности не произойдет существенного изменения структуры захороненных РАО, и позволяют оценить риск возникновения СЦР при соблюдении норм содержания ЯДН в упаковках для данного типа ППЗРО в течение этого срока как пренебрежимо малый.

Ядерная безопасность ППЗРО на всех технологических участках в течение всего его жизненного цикла обеспечивается ограничением массы ЯДН в упаковках, ограничением в штабеле количества ярусов контейнеров с РАО, содержащих ЯДН, общей высотой столба таких контейнеров.

Эти параметры определяются исходя из безопасной поверхностной плотности ЯДН (массы ЯДН, приходящейся на единицу площади поверхности, на которой размещены упаковки с РАО). Такой подход основан на предположении, что уплотнение РАО происходит только «по вертикали» без изменения поверхностной плотности ЯДН (например, из-за увеличения слоев упаковок). Критерий также применим при рассмотрении сценариев с разрушением контейнеров и образованием смесей ЯДН с водой и используется в зарубежной практике [14].

Проектом должна быть предусмотрена система радиационного контроля, система контроля состояния инженерных барьеров безопасности, а также установлены контролируемые параметры и показатели безопасной эксплуатации. По сути, ядерная безопасность ППЗРО обосновывается и обеспечивается аналогично пункту временного хранения ядерных материалов. Масса ЯДН, содержащаяся в упаковках РАО, направляемых в ППЗРО, должна быть определена при загрузке ТРО и указана в их паспортах.

Для урансодержащих ТРО в долгосрочной перспективе масса ^{235}U , приходящаяся на каждый квадратный сантиметр основания любого отсека (помещения) ППЗРО (поверхностная плотность ^{235}U), не должна превышать 0,043 г/см² (консервативное значение определено для смеси ^{235}U с углеродом), что обеспечит ядерную безопасность объекта при всех предвиденных условиях эксплуатации ППЗРО, в том числе и при разрушении всех контейнеров.

Для ТРО, содержащих ^{235}U и ^{239}Pu , поверхностная плотность их на квадратный сантиметр в ППЗРО не должна превышать 0,031 г/см² (консервативное значение определено для смеси ^{239}Pu с углеродом), в том числе и при разрушении всех контейнеров.

В случае когда РАО содержат уран с обогащением по ^{235}U до 20 %, его концентрация должна удовлетворять следующим требованиям:

- упаковки, изготовленные с использованием контейнеров НЗК-МР и бочек, должны содержать не более $8,7 \times 10^{-5}$ граммов ^{235}U на см³ РАО (при условии не более одного слоя НЗК-МР и двух слоев клеток с бочками в штабеле РАО);
- упаковки, изготовленные с использованием контейнеров НЗК-150-1,5П, ЖЗК-2, НЗК-П, НЗК-Радон, ЖБУ, ЖЗК, должны содержать не более $2,4 \times 10^{-5}$ граммов ^{235}U на см³ РАО, а масса ^{235}U в упаковках не должна превышать:
 - НЗК-150-1,5П, ЖЗК-2, НЗК-П — 36,0 г;
 - НЗК-Радон — 45,6 г;
 - НЗК-МР — 165,3 г (при условии не более 1 слоя в штабеле РАО);
 - ЖБУ, ЖЗК — 23,0 г;
 - бочка — 16,8 г (при условии не более 2 слоев в штабеле);
 - КМЗ — 74,4 г;
 - Крад-1,36 — 32,6 г.

Для РАО, содержащих уран, плутоний, америций, кюрий, суммарная объемная концентрация ^{235}U и ^{239}Pu не должна превышать $3,0 \times 10^{-5}$ граммов на см³ РАО, а суммарная масса ^{235}U и ^{239}Pu в упаковках не должна превышать:

- НЗК-150-1,5П, ЖЗК-2, НЗК-2, НЗК-П — 45,0 г;
- НЗК-Радон, НЗК-МР, ЖЗК — 57,0 г;

- ЖБУ, ЖЗК — 28,8 г;
- бочка 200 л — 6,0 г;
- КМЗ — 93,0 г.

Пункты глубинного захоронения твердых высокоактивных отходов

В настоящее время работы по созданию ПГЗРО в России находятся на стадии строительства подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ), которая размещается в кристаллических породах Нижнеканского массива (Красноярский край). Оценки критичности ПГЗРО проводились как для периода его эксплуатации, так и в долгосрочной перспективе (после закрытия ПГЗРО). При этом учитывались процессы разрушения упаковок и инженерных защитных барьеров ПГЗРО.

В качестве ЯДН рассматривались ^{239}Pu и ^{235}U .

На этапе эксплуатации ПГЗРО сохраняется целостность упаковок РАО и их способность удерживать радиоактивный материал.

Но в долгосрочной перспективе, после закрытия ПГЗРО, ожидается постепенная деградация материала упаковок и инженерных барьеров, что приведет к перераспределению делящихся и иных материалов и потенциально может привести к образованию композиции ЯДМ с большей реактивностью по сравнению с реактивностью РАО на этапе эксплуатации ПГЗРО.

Для обеспечения ядерной безопасности Нижнеканского ПГЗРО для всех типов упаковок РАО класса 2 значение безопасной суммарной массы ^{239}Pu и ^{235}U составляет 50 г для ЯДМ оружейного качества, и 100 г для РАО от атомных станций или образующихся при переработке ОЯТ. Для пенала с РАО класса 1 (остеклованные ВАО, поступающие с ПО «Маяк») значение безопасной суммарной массы ^{239}Pu и ^{235}U принято равным 77 г. В настоящее время отсутствуют достоверные данные о содержании ЯДН в РАО класса 2, которые будут поставляться в Нижнеканский ПГЗРО от установок ядерного топливного цикла.

В соответствии с федеральными нормами и правилами [9], Национальный оператор должен обеспечить разработку критериев приемлемости для остеклованных ВАО, поступающих на захоронение в ПГЗРО, по содержанию в них ЯДМ. В существующей проектной документации ПГЗРО установлены критерии приемлемости по массе ЯДН в пеналах с остеклованными ВАО. В результате проведенной НИР уточнены массы ЯДН в пеналах с алюмофасфатным стеклом. Оказалось, что более 95% пеналов имеют суммарную массу ^{239}Pu и ^{235}U выше проектного предела, причем значение массы ^{239}Pu в

различных пеналах отличается более чем в сто раз, а ^{235}U — более чем в десять раз. Верхний диапазон суммарного массового содержания ^{235}U и ^{239}Pu в пеналах сопоставим с содержанием ^{239}Pu и ^{235}U в ОЯТ ВВЭР-440. Это обстоятельство требует проведения работ по уточнению критериев приемлемости для данного ПГЗРО.

В такой ситуации критерии приемлемости следует разрабатывать, используя следующий подход: при комплектации (перекомплектации) пеналов, в которые помещены бидоны с остеклованными ВАО, обращении с пеналами, хранении пеналов в скважинах ПГЗРО следует определить и установить предельные значения суммарного содержания ^{235}U и ^{239}Pu в пенале и скважине захоронения, содержащей несколько пеналов, с учетом расположения пеналов и скважин, исходя из предположения, что при эксплуатации и в долгосрочной перспективе после закрытия ПГЗРО не произойдет выхода ЯДН из скважин и последующего их концентрирования с образованием надкритической системы.

Кроме того, существуют другие факторы, которые могут оказывать влияние на критичность системы. Например, изменения напряженного состояния массива горных пород или небольшие сейсмические воздействия могут влиять на расположение упаковок РАО и привести к перераспределению или накоплению ЯДМ из нескольких упаковок в геометрическую конфигурацию с большей реактивностью. Поэтому проблематично использовать ограничение поверхностной плотности ЯДН в ПГЗРО, которое применялось для ППЗРО.

Для принятия решения о нормах ядерной безопасности при захоронении пеналов с остеклованными ВАО, содержащими массы ЯДН выше безопасных значений, должны быть проведены дополнительные исследования, с целью уточнения сценариев и последствий эволюции ПГЗРО и критериев приемлемости для захоронения таких ТРО.

Если будет обосновано, что даже после прогнозного периода потенциальной опасности ПГЗРО перераспределения и концентрирования урана и плутония, например, в результате сорбции-десорбции, диффузии не произойдет, то в качестве параметра ядерной безопасности можно использовать отношение суммы ^{239}Pu и ^{235}U к урану (так называемое эффективное обогащение в РАО), усредненное по скважине. Предельное значение будет зависеть от состава смеси, в которой будут находиться ЯДН, и от соотношения ^{239}Pu и ^{235}U . Требования и нормы ядерной безопасности в период эксплуатации ПГЗРО и в течение прогнозного периода после

его закрытия определяются на основе данных о состоянии бидонов, пеналов с ВАО, миграции радионуклидов в материалах инженерных барьеров и горных породах в районе ПЗРО, рассматриваемых в проекте и отчете по обоснованию безопасности.

Следует отметить, что введены в действие рекомендации и руководства МАГАТЭ по безопасности при подготовке и захоронении РАО в ППЗРО и ПГЗРО [15–18]. В них содержатся общие требования к анализу и обоснованию безопасности пунктов захоронения, в том числе ядерной безопасности.

Известны работы зарубежных авторов, в которых приведены оценки параметров и последствий СЦР для моделей пунктов захоронения по истечении прогнозного срока [19–21] в предположении длительного образования критической системы, медленного увеличения и последующего гашения реактивности. Длительность пульсирующей (волнообразной) СЦР для таких моделей составляла более ста лет. Справедливость использованных предположений как опровергнуть, так и подтвердить затруднительно. Надо иметь в виду, что при СЦР образуются радиоактивные благородные газы и цезий-137, которые могут выходить на поверхность. Активность выброса оценить не менее трудно, чем параметры СЦР, поскольку для этого надо знать параметры системы и геологическое строение массива размещения объекта.

Считаем уместным поделиться следующими соображениями. Сведения о месторождениях полезных ископаемых говорят, что природа обладает свойством в течение миллионов лет разделять элементы и концентрировать простые вещества содержащихся в природе элементов (оксиды, в том числе урана, фториды и др.) и даже металлы (золото, серебро и др.) в отдельных местах в огромных количествах. Общеизвестен факт существования квазигомогенного природного реактора на оксиде урана (феномен Окло). Если исходить из этого факта, то урансодержащие РАО перед захоронением следует «разубоживать» так, чтобы содержание ^{235}U в уране было не более 1,5%. Тогда в «квазигомогенной» среде (без рукотворной гетерогенности) СЦР исключена при любом содержании ^{235}U в любой смеси. Для захоронения РАО, содержащих уран и трансурановые ЯДН, необходимо, как минимум, обосновать исключение возможности их разделения и определить предельное отношение ЯДН к сумме «неделящихся» нуклидов (в первую очередь ^{238}U , ^{240}Pu и ^{238}Pu) в захороняемых РАО, содержащих ЯДМ (уран, плутоний, нептуний, америций).

Заключение

Ядерная безопасность пунктов захоронения РАО, содержащих ЯДН, должна обосновываться с учетом прогнозируемых сценариев эволюции ПЗРО, которые делаются для периода, ограниченного знаниями о геологическом строении района его размещения и сценариях его развития. Основным критерием приемлемости РАО, предназначенных для глубинного захоронения, в части ядерной безопасности (параметром ядерной безопасности) является концентрация ЯДН в ЖРО и масса, а также содержание ЯДН в упаковках с ТРО. Значения параметров определяются исходя из нуклидного состава РАО и результатов прогноза состояния ПЗРО в течение эксплуатации и в долгосрочной перспективе (после закрытия ПЗРО), приведенных в проекте и отчете по обоснованию безопасности.

Параметры РАО, которые определяются при их кондиционировании с помощью измерений, указываются в паспорте на партию, упаковку с РАО должны контролироваться при получении в пункте захоронения. Подтверждающие гамма-спектрометрические измерения активности основных техногенных долгоживущих гамма-активных радионуклидов в контейнерах с квазигомогенными ТРО могут быть выполнены с помощью детекторов высокого разрешения, размещенных снаружи металлических и бетонных контейнеров типов НЗК, ЖБУ, ЖЗК, Крад, КМЗ. Для подтверждающих измерений массы (содержания) ЯДН в таких контейнерах с ТРО можно использовать активный нейтронный метод с помощью импульсного нейтронного генератора.

Для обоснования исключения СЦР в регионе пункта захоронения за пределами прогнозного периода необходимо определить параметры системы, механизмы гашения СЦР после истечения прогнозного срока, для определения которых необходимы дальнейшие исследования.

Литература

1. Федеральный закон от 11 июля 2011 г. № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
2. 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».

3. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла» (НП-016-05) / Утв. постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 2 декабря 2005 г. № 11.

4. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила ядерной безопасности для объектов ядерного топливного цикла» (НП-063-05) / Утв. постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20 декабря 2005 г. № 15.

5. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Основные правила учета и контроля ядерных материалов» (НП-030-12) / Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 апреля 2012 г. № 255.

6. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Основные правила учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов в организации» (НП-067-16) / Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 28 ноября 2016 г. № 503.

7. СТО 95 12001-2016 Основные правила ядерной безопасности при производстве, использовании, переработке, хранении и транспортировании ядерных делящихся материалов (ПБЯ-06-00-2016).

8. СТО 95 12002-2016 Правила ядерной безопасности при хранении и транспортировании ядерных делящихся материалов (ПБЯ-06-09-2016).

9. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения» (НП-093-14) / Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2014 г. № 572.

10. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов.

Требования безопасности» (НП-069-14) / Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 6 июня 2014 г. № 249.

11. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности» (НП-055-14) / Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 22 августа 2014 г. № 379.

12. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов» (НП-100-17) / Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23 июня 2017 г. № 218.

13. Рыбальченко А. И., Пименов М. К. и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. М.: ИздАТ, 1994. — 257 с.

14. Hopper C. H., Elfm K. E., Panks C.V. Proceedings of the Meeting. Criticality Safety Challenges in the Next Decade. ORNL USA. ANS, 1997.

15. Storage of Radioactive Waste. Safety Guide. № WS-G-6.1. 2006.

16. The Safety Case and Safety Assessment for the Predisposal Management of Radioactive Waste. General Safety Guide. № GSG-29. 2014.

17. Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste. Specific Safety Guide. № SSG-29. 2014.

18. The Safety Case and Safety Assessment for the Predisposal Management Waste. Specific Safety Guide. № SSG-23. 2012.

19. Long-Term Criticality Safety Concerns Associated with Weapons-Plutonium Disposition. Research Grant NATO No SA/12-1-02 (DISRM. CRG941318).

20. Forsberg C. W. Long-Term Criticality Control in Radioactive Waste Facilities. // Nuclear Safety, 1997, vol. 38, no. 1.

21. Bowman C. D., Venneri F. Autocatalytic Criticality from Plutonium and Other Fissile Material. // Science & Global Security, 1996, vol. 5.

Информация об авторах

Внуков Виктор Сергеевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, АО «Государственный научный центр Российской Федерации — Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского» (249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1), e-mail: ryazanov@ippe.ru.

Рязанов Борис Георгиевич, кандидат физико-математических наук, заместитель главного инженера, АО «Государственный научный центр Российской Федерации — Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского» (249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1), e-mail: ryazanov@ippe.ru.

Свиридов Виктор Иванович, начальник лаборатории, АО «Государственный научный центр Российской Федерации — Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского» (249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1), e-mail: ryazanov@ippe.ru.

Библиографическое описание статьи

Внуков В. С., Рязанов Б. Г., Свиридов В. И. Обеспечение ядерной безопасности при захоронении радиоактивных отходов, содержащих ядерные делящиеся материалы // Радиоактивные отходы. 2019. № 3(8). С. 44—52. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-3-44-52.

NUCLEAR SAFETY OF DISPOSAL FACILITIES FOR RADIOACTIVE WASTE CONTAINING FISSILE NUCLEAR MATERIALS

Vnukov V. S., Ryazanov B. G., Sviridov V. I.

Joint Stock Company «State Scientific Centre of the Russian Federation — Institute for Physics and Power Engineering named after A. I. Leypunsky», Obninsk, Russia

Article received on June 4, 2019

The article focuses on different approaches aiming to ensure nuclear safety at disposal facilities for radioactive waste containing fissile nuclear materials. The approaches vary depending on the type and design of disposal facilities with due account of their evolution scenarios. The article discusses the methods enabling to identify the amount of fissile radionuclides contained in the radioactive waste subject to disposal.

Key words: radioactive waste, nuclear safety, disposal facility for radioactive waste, fissile nuclear materials, long-term nuclear safety, disposal facility evolution scenarios.

References

1. Federal'nyj zakon Rossijskoj Federacii ot 11 iyulya 2011 g. no 190-FZ «Ob obrashchenii s radioaktivnymi othodami i o vnesenii izmenenij v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii» [Federal Law of July 11, 2011 no 190-FZ “On Management of Radioactive Waste and Amendment of some acts of Law of the Russian Federation”].
2. Postanovlenie Pravitelstva RF ot 19.10.2012 no 1069 «O kriteriyah otneseniya tverdyh, zhidkih i gazoobraznyh othodov k radioaktivnym othodam, kriteriyah otneseniya radioaktivnyh othodov k osobym radioaktivnym othodam i k udalyaemym radioaktivnym othodam i kriteriyah klassifikacii udalyemyh radioaktivnyh othodov [Decree of the Government of the Russian Federation of 19 October 2012, no. 1069 “On the criteria of designation of solid, liquid and gaseous waste as radioactive waste, criteria of radioactive waste designation as special radioactive waste and removable radioactive waste and criteria of classification of removable radioactive waste”].
3. Federal'nyenormy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii «Obshchie polozheniya obespecheniya bezopasnosti ob"ektov yadernogo toplivnogo cikla» (NP-016-05) [Federal Norms and Rules in Field of Atomic Energy Use “General Safety Provisions for Nuclear Fuel Cycle Facilities”] / Utv. postanovleniem Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu,

tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 2 dekabrya 2005 g no 11.

4. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii «Pravila yadernoj bezopasnosti dlya ob"ektov yadernogo toplivnogo cikla» (NP-063-05) [Federal Norms and Rules in Field of Atomic Energy Use “Nuclear Safety Rules for Nuclear Fuel Cycle Facilities” (NP-063-05)] / Utv. postanovleniem Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 20 dekabrya 2005 g no 15.

5. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii «Osnovnye pravila ucheta i kontrolya yadernyh materialov» (NP-030-12) [Federal Norms and Rules in Field of Atomic Energy Use “Basic Rules on Accounting and Control of Nuclear Materials” (NP-030-12)] / Utv. prikazom Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 15 aprelya 2012 g no 255.

6. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii «Osnovnye pravila ucheta i kontrolya radioaktivnyh veshchestv i radioaktivnyh othodov v organizacii» (NP-067-16) [Federal Norms and Rules in Field of Atomic Energy Use “Basic Rules on Accounting and Control of Radioactive Materials and Radioactive Waste in Organizations” (NP-067-16)] / Utv. prikazom Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 28 noyabrya 2016 g no 503.

7. STO 95 12001-2016 Osnovnye pravila yadernoj bezopasnosti pri proizvodstve, ispol'zovanii, pererabotke, hranenii i transportirovanii yadernyh del'yashchihsya materialov (PBYA-06-00-2016) [STO 95 12001-2016 Basic Nuclear Safety Rules for manufacturing, Use, Processing, Storage and Transportation of Fissile Nuclear Materials (PBYa-06-00-2016)].
8. STO 95 12002-2016 Pravila yadernoj bezopasnosti pri hranenii i transportirovanii yadernyh del'yashchihsya materialov (PBYA-06-09-2016) [STO 95 12002-2016 Nuclear Safety Rules for Storage and Transportation of Nuclear Fissile Materials (PBYa-06-09-2016)].
9. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii «Kriterii priemlemosti radioaktivnykh othodov dlya zahoroneniya» (NP-093-14) [Federal Norms and Rules in Field of Atomic Energy Use “Radioactive Waste Acceptance Criteria for Disposal” (NP-093-14)] / Utv. prikazom Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 15 dekabrya 2014 g no 572.
10. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii «Pripoverhnostnoe zahoronenie radioaktivnykh othodov. Trebovaniya bezopasnosti» (NP-069-14) [Federal Norms and Rules in Field of Atomic Energy Use “Near-Surface Disposal of Radioactive Waste. Safety Requirements” (NP-069-14)] / Utv. prikazom Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 6 iyunya 2014 g no 249.
11. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii «Zahoronenie radioaktivnykh othodov. Principy, kriterii i osnovnye trebovaniya bezopasnosti» (NP-055-14) [Federal Norms and Rules in Field of Atomic Energy Use “Radioactive Waste Disposal. Principles, Criteria and Main Safety Requirements” (NP-055-14)] / Utv. prikazom Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 22 avgusta 2014 g no 379.
12. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii «Trebovaniya k sostavu i sodержaniyu otcheta po obosnovaniyu bezopasnosti punktov zahoroneniya radioaktivnykh othodov» (NP-100-17) [Federal Norms and Rules in Field of Atomic Energy Use “Requirements on the Contents and Structure of Safety Analysis Reports for Radioactive Waste Disposal Facilities” (NP-100-17)] / Utv. prikazom Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 23 iyunya 2017 g no 218.
13. Rybalchenko A. I., Pimenov M. K. i dr. *Glubinnoe zahoronenie zhidkih radioaktivnykh othodov* [Deep Disposal of Radioactive Waste]. Moscow, IzdAT Publ., 1994. 257 p.
14. Hopper C. H., Elfm K. E., Panks C.V. // *Proceedings of the Meeting. Criticality Safety Challenges in the Next Decade*. ORNL USA. ANS, 1997.
15. Storage of Radioactive Waste. *Safety Guide*. No WS-G-6.1. 2006.
16. The Safety Case and Safety Assessment for the Predisposal Management of Radioactive Waste. *General Safety Guide*. No GSG-29. 2014.
17. Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste. *Specific Safety Guide*. No SSG-29. 2014.
18. The Safety Case and Safety Assessment for the Predisposal Management Waste. *Specific Safety Guide*. No SSG-23. 2012.
19. Long-Term Criticality Safety Concerns Associated with Weapons-Plutonium Disposition. Research Grant NATO No SA/12-1-02 (DISRM.CRG941318).
20. Forsberg C. W. Long-Term Criticality Control in Radioactive Waste Facilities. *Nuclear Safety*, Vol. 38, No 1, January-March 1997.
21. Bowman C. D., Venneri F. Autocatalytic Criticality from Plutonium and Other Fissile Material. *Science & Global Security*, vol. 5, 1996.

Information about the authors

Vnukov Viktor Sergeevich, PhD, Senior Researcher, Joint Stock Company “State Scientific Centre of the Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering named after A. I. Leypunsky” (1, Bondarenko square, Obninsk, Kaluga region, 249033, Russia), e-mail: ryazanov@ippe.ru.

Ryazanov Boris Georgievich, PhD, Deputy Chief Engineer, Joint Stock Company “State Scientific Centre of the Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering named after A. I. Leypunsky” (1, Bondarenko square, Obninsk, Kaluga region, 249033, Russia), e-mail: ryazanov@ippe.ru.

Sviridov Viktor Ivanovich, Head of Laboratory, Joint Stock Company “State Scientific Centre of the Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering named after A. I. Leypunsky” (1, Bondarenko square, Obninsk, Kaluga region, 249033, Russia), e-mail: ryazanov@ippe.ru.

Bibliographic description

Vnukov V. S., Ryazanov B. G., Sviridov V. I. Nuclear Safety of Disposal Facilities for Radioactive Waste Containing Fissile Nuclear Materials. *Radioactive Waste*, 2019, no. 3 (8), pp. 44–52. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-3-44-52. (In Russian).