

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ
DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

УДК 621.039.743
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-105-118>

Поступила в редакцию 14.10.2021
Received 14.10.2021

М. Л. Жемжуров, Н. Д. Кузьмина

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук
Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

**ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ЗАХОРОНЕНИЯ ОЧЕНЬ НИЗКОАКТИВНЫХ,
НИЗКОАКТИВНЫХ И КОРОТКОЖИВУЩИХ СРЕДНЕАКТИВНЫХ РАДИОАКТИВНЫХ
ОТХОДОВ БЕЛОРУССКОЙ АЭС**

Аннотация. Представлены принципиальные технические решения по сооружениям захоронения радиоактивных отходов (РАО), а также по вспомогательным зданиям, сооружениям и системам инженерно-технического обеспечения пункта захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО), обеспечивающие безопасное и экономически целесообразное захоронение РАО, образующихся от двух блоков Белорусской АЭС в течение 60 лет эксплуатации и при выводе АЭС из эксплуатации. Предложенная техническая концепция ПЗРО включает оценку его радиационной безопасности во время эксплуатации и долговременной безопасности после закрытия. Показано, что обеспечивается безопасное захоронение РАО в период потенциальной опасности захораниваемых отходов с учетом возможных внешних воздействий природного и техногенного происхождения. Выполнена оценка технико-экономических показателей предлагаемого проекта ПЗРО как в целом, так и для первой очереди его строительства. Общая активность РАО, которая может быть размещена в ПЗРО при условии обеспечением долговременной безопасности, составляет $9,0 \cdot 10^{14}$ Бк, в том числе α -излучателей – $6,8 \cdot 10^9$ Бк, трансурановых радионуклидов – $6,8 \cdot 10^9$ Бк; в свою очередь активность очень низкоактивных отходов – $4,1 \cdot 10^9$ Бк. Учитывая достигнутую степень детализации технических решений в концептуальном проекте, он может быть использован на стадии проектирования объекта.

Ключевые слова: Белорусская атомная электрическая станция, радиоактивные отходы атомных электростанций, твердые радиоактивные отходы, захоронение радиоактивных отходов, пункт захоронения радиоактивных отходов

Для цитирования: Жемжуров, М. Л. Техническая концепция захоронения очень низкоактивных, низкоактивных и короткоживущих среднеактивных радиоактивных отходов Белорусской АЭС / М. Л. Жемжуров, Н. Д. Кузьмина // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, №1. – С. 105–118. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-105-118>

Mikhail L. Zhemzhurov, Natallia D. Kuzmina

*Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,
Republic of Belarus*

**TECHNICAL CONCEPT OF DISPOSAL FOR VERY LOW-LEVEL, LOW-LEVEL AND SHORT-LIVED
INTERMEDIATE-LEVEL RADIOACTIVE WASTE OF THE BELARUSIAN NPP**

Abstract. The paper briefly presents the principal technical solutions for radioactive waste disposal facilities (RWDF), as well as for auxiliary buildings, structures and engineering systems for this RWDF, which ensure safe and economically feasible disposal of radioactive waste (RW) generated from two units of the Belarusian NPP during 60 years of operation and during decommissioning. The suggested conceptual RWDF design includes an assessment of its radiation safety during

operation and long-term post-closure safety. It is shown that the suggested RWDF concept ensures safe RW disposal in the period of potential danger of RW taking into account possible external impacts of natural and man-made origin. The aggregate technical and economic parameters of the suggested RWDF project were evaluated both in general and for the first stage of construction. The RW total activity that can be placed in a RWDF, provided the long-term safety of the RWDF is ensured, is $9.0 \cdot 10^{14}$ Bq, including α -emitters – $6.8 \cdot 10^9$ Bq, transuranium radionuclides – $6.8 \cdot 10^9$ Bq; for very low-level waste – $4.1 \cdot 10^9$ Bq. Taking into account the achieved level of detailing of technical solutions in the conceptual design, it can be used at the stage of object design.

Keywords: Belarusian nuclear power plant, radioactive waste of nuclear power plants, radioactive waste processing, solid radioactive waste, radioactive waste disposal, radioactive waste disposal facility

For citation: Zhemzhurov M. L., Kuzmina N. D. Technical concept of disposal for very low-level, low-level and short-lived intermediate-level radioactive waste of the Belarusian NPP. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 1, pp. 105–118 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-105-118>

Введение. В настоящее время в Республике Беларусь введен в эксплуатацию первый энергоблок Белорусской АЭС с реактором типа ВВЭР-1200, ввод второго энергоблока запланирован на 2022 год. Эксплуатационные радиоактивные отходы (РАО) Белорусской АЭС всех категорий будут размещаться в кондиционированном виде (переработанные, отвержденные и упакованные) на АЭС в проектных стационарных хранилищах. Высокоактивные РАО (ВАО) планируется хранить на АЭС в течение всего срока ее службы, а объемы временного хранения конечных форм твердых низкоактивных (НАО) и среднеактивных (САО) радиоактивных отходов (в сертифицированных железобетонных невозвратных защитных контейнерах (НЗК) и металлических 200-литровых бочках) рассчитаны на 10 лет эксплуатации АЭС. Организация упорядоченного хранения упаковок РАО обеспечивает их извлечение из отсеков хранилищ для контроля и транспортирования в другое место хранения или захоронения [1].

Стратегия обращения с радиоактивными отходами Белорусской АЭС (Об утверждении стратегии обращения с радиоактивными отходами Белорусской атомной электростанции: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 2 июня 2015 г., №460 (в редакции постановления Совета Министров Респ. Беларусь от 18.03.2021 №150)) предусматривает реализацию мероприятий по разработке проектной документации на ПЗРО до 2026 г. и сооружению первой очереди объекта до 2030 г.

Создание указанного ПЗРО является сложной научно-технической задачей, которая ставится в Беларуси впервые. В соседних странах (России, Украине, Литве) разработки технических концепций и проектных решений подобных объектов проводились на протяжении нескольких десятков лет в кооперации с зарубежными компетентными организациями [2]. Однако до настоящего времени ни один ПЗРО, рассчитанный на все виды РАО АЭС, не введен в эксплуатацию. Это обусловлено постоянно возрастающими требованиями к обеспечению долговременной безопасности объектов окончательной изоляции РАО.

Согласно международным требованиям [3], для короткоживущих НАО и САО применяются различные типы приповерхностных захоронений, при которых РАО размещаются непосредственно на поверхности или на глубине до нескольких десятков метров. ВАО и долгоживущие НАО и САО подлежат захоронению в пунктах глубинного захоронения РАО (в глубоких геологических формациях).

В западных странах довольно быстро внедрили переработку РАО атомных электростанций для перевода их в формы, пригодные для окончательного захоронения. Действуют приповерхностные пункты захоронения РАО АЭС во Франции (в эксплуатации с 1969, 1992 и 2003 гг.), Испании (с 1993 г.), Великобритании (с 1959 и 1988 гг.), Венгрии (с 1977 г.), Чехии (с 1994 г.), Швеции (с 1985 г.), Японии (с 1992 г.). Проектируются ПЗРО для захоронения РАО АЭС в Литве, Бельгии, Венгрии [2]. Однако нормативные требования по обращению с РАО в этих странах существенно отличаются от таковых в Республике Беларусь и Российской Федерации.

В Российской Федерации была принята практика долговременного хранения РАО на АЭС, а их окончательная изоляция относилась к числу отложенных решений. Принятый в 2011 г. Федеральный закон «Об обращении с радиоактивными отходами» ввел практику обязательной окончательной изоляции всех РАО. В связи с этим к 2030 г. планируется ввод в эксплуатацию порядка 480 тыс. м³ мощностей по захоронению РАО. В ближайшие годы планируется

строительство ПЗРО в г. Северске, г. Озерске; определены 30 перспективных площадок для размещения ПЗРО в 17 объектах Российской Федерации. В конце 2016 г. введен в эксплуатацию первый в России ПЗРО НАО и САО в г. Новоуральске, ориентированный, в основном, на захоронение РАО Уральского электрохимического комбината [4]. Этот единственный существующий в Российской Федерации ПЗРО не рассчитан на всю номенклатуру образующихся на АЭС НАО и короткоживущих САО, однако в настоящее время там ведутся активные подготовительные и проектные работы по созданию объектов захоронения РАО классов 3 и 4, генерируемых на АЭС.

По данным [2], удельные инвестиционные затраты на приповерхностное захоронение РАО определяются широким диапазоном от 1 до более 8 тыс. долл. США/м³.

Согласно методологическому подходу МАГАТЭ, разработка концептуального проекта ПЗРО является начальным этапом его проектирования [5].

Учитывая уникальность и наукоемкость планируемого к сооружению объекта и необходимость проведения комплексных предпроектных исследований, в Объединенном институте энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси на основе референтных технологий и существующих проектов разработан концептуальный проект пункта захоронения очень низкоактивных, низкоактивных отходов и короткоживущих среднеактивных радиоактивных отходов, образующихся при эксплуатации и выводе из эксплуатации Белорусской АЭС.

К разработке технических решений по проекту была привлечена ведущая российская организация в области проектирования ПЗРО госкорпорации «Росатом» – Санкт-Петербургский филиал АО «Федеральный центр науки и высоких технологий «Специальное научно-производственное объединение «Элерон» – «ВНИПИЭТ».

Цель настоящей работы – разработка принципиальных технических решений по сооружениям захоронения РАО, а также по вспомогательным зданиям, сооружениям и системам инженерно-технического обеспечения ПЗРО для принятия решения о технической возможности и экономической целесообразности реализации проекта его строительства.

Исходные данные и нормативная база для разработки концептуального проекта ПЗРО Белорусской АЭС. В процессе разработки концептуального проекта учтены и использованы основные требования и положения законодательства и нормативной документации в области использования атомной энергии Республики Беларусь и Российской Федерации.

Основополагающим элементом системы обращения с РАО является их классификация. Существенным прогрессом в развитии нормативной базы Республики Беларусь в области обращения с РАО явилось недавнее введение в действие новой редакции норм и правил по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения» (утверждены постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 28.09.2010 №47 (в редакции постановления Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 24.07.2017 №33)). Согласно этому документу, в Беларуси вводится деление РАО на четыре класса для обеспечения долгосрочной безопасности при захоронении, которые аналогичны классам 1–4 по российской классификации в документе «Критерии классификации удаляемых радиоактивных отходов» (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: утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 19.10.2012 №1069 (в редакции постановления Правительства Российской Федерации от 04.02.2015 №95)).

Согласно нормам и правилам по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения», класс твердых РАО (ТРО) определяется их категорией (очень низкоактивные – ОНРАО, низкоактивные – НАО, среднеактивные – САО и высокоактивные – ВАО), установленной в соответствии с табл. 1 приложения 2 СПОРО-2015 (Санитарные нормы и правила «Требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при обращении с радиоактивными отходами», утвержденные постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 31.12.2015 №142),

и периодом полураспада содержащихся в РАО радионуклидов (долгоживущие РАО, короткоживущие РАО). К долгоживущим относятся РАО, содержащие радионуклиды с периодом полураспада более 31 года.

Классификация устанавливает прямую связь с вариантами захоронения РАО (табл. 1). Таким образом, от критериев классификации отходов напрямую зависят как безопасность населения, так и затраты на их захоронение. Установленные в России тарифы на захоронение определяются классом РАО [6].

Т а б л и ц а 1. Связь между классом и вариантом захоронения твердых радиоактивных отходов в соответствии с критериями приемлемости

Table 1. Relationship between class and disposal option for solid radioactive waste in accordance with acceptability criteria

Класс	Виды РАО, передаваемых на захоронение	Вид пункта захоронения
Класс 1	ВАО	Пункт глубинного захоронения РАО с предварительной выдержкой в целях снижения их тепловыделения
Класс 2	Долгоживущие САО и ВАО	Пункт глубинного захоронения РАО без предварительной выдержки в целях снижения их тепловыделения
Класс 3	Долгоживущие НАО и короткоживущие САО	Пункт приповерхностного захоронения радиоактивных отходов, размещаемый на глубине до 100 м
Класс 4	Короткоживущие НАО и ОНРАО	Пункт приповерхностного захоронения радиоактивных отходов, размещаемый на одном уровне с поверхностью земли

Введение гармонизированной с российским документом «Критерии классификации удаляемых радиоактивных отходов» классификации РАО с целью их захоронения позволяет при проработке вопросов обращения с РАО Белорусской АЭС применять методический аппарат, основанный на увязке классов РАО с критериями их приемлемости и способами захоронения, которым оперируют российские специалисты.

Однако в настоящее время имеются существенные различия в категорировании РАО низкой активности в Российской Федерации и в Республике Беларусь. Принципиальное отличие российской системы классификации РАО от белорусской и рекомендованной в стандартах МАГАТЭ в том, что в России отходы с удельной активностью от уровней изъятия для больших количеств твердого материала до уровней изъятия для умеренных его количеств не относятся к РАО. Такие промышленные отходы АЭС (однако с более высоким значением нижней границы удельной β -активности – 0,3 Бк/г) классифицируются в соответствии с санитарными правилами СП 2.6.6.2572-2010 «Обеспечение радиационной безопасности при обращении с промышленными отходами атомных станций, содержащими техногенные радионуклиды» (утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 18.01.2010 №4 (в редакции постановления Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 12.01.2015 №2)) как очень низкоактивные отходы (ОНАО), и для них установлен отдельный порядок обращения на АЭС. В Беларуси ОНАО в российском понимании отсутствуют, отходы с такой удельной активностью входят в состав ОНРАО. Указанное различие в белорусской и российской классификациях приводит к тому, что на Белорусской АЭС не могут быть использованы процедуры обращения с отходами очень низкой активности, идентичные принятым на российских АЭС.

С учетом изложенного при разработке концептуального проекта ПЗРО Белорусской АЭС был принят такой подход: ОНАО рассматриваются как часть очень низкоактивных РАО в соответствии с санитарными нормами и правилами «Требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при обращении с радиоактивными отходами» со следующими граничными значениями:

от уровней изъятия для больших количеств материала и уровней освобождения от контроля в соответствии с табл. 3 приложения 4 гигиенического норматива «Критерии оценки радиационного воздействия» (утвержден постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 28.12.2012 №213), соответствующих удельным активностям для неограниченного

использования в соответствии с приложением 3 ОСПОРБ-99/2010 (Санитарные правила и нормативы «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности», утвержденные постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 №40 (в редакции постановления Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 16.09.2013 №43)),

до уровней изъятия для умеренных количеств (табл. 1 приложения 4 к санитарным правилам СП 2.6.6.2572-2010), соответствующих предельным значениям для отнесения отходов к радиоактивным в соответствии с приложением 5 ОСПОРБ-99/2010.

В связи с отсутствием в настоящее время в Республике Беларусь отдельных санитарных правил по обеспечению радиационной безопасности при обращении с такими отходами при разработке технической концепции ПЗРО принято, что захоронение указанной части РАО Белорусской АЭС, соответствующей по уровням содержания радионуклидов российской категории промышленных ОНАО АЭС, будет производиться в соответствии с требованиями российских санитарных правил СП 2.6.6.2572-2010.

Отличие белорусской и российской систем классификации РАО наглядно представлено в табл. 2, где приведены граничные значения удельной активности для β-излучающих радионуклидов (исключая тритий).

Т а б л и ц а 2. Критерии для отнесения отходов к категории радиоактивных
T a b l e 2. Criteria for waste attribution to radwaste

Республика Беларусь		Российская Федерация	
ВАО более 10 ⁷ Бк/г (β-излучающие радионуклиды)		ВАО более 10 ⁷ Бк/г (β-излучающие радионуклиды)	
САО от 10 ⁴ до 10 ⁷ Бк/г (β-излучающие радионуклиды)		САО от 10 ⁴ до 10 ⁷ Бк/г (β-излучающие радионуклиды)	
НАО от 10 ³ до 10 ⁴ Бк/г (β-излучающие радионуклиды)		НАО от 10 ³ до 10 ⁴ Бк/г (β-излучающие радионуклиды)	
до 10 ³ Бк/г (β-излучающие радионуклиды) ОНРАО Для умеренных количеств – менее 1000 кг (табл. 1 приложения 4 к гигиеническому нормативу «Критерии оценки радиационного воздействия»)		до 10 ³ Бк/г (β-излучающие радионуклиды) ОНРАО Предельные значения удельной активности («Критерии отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам»)	
ОНРАО (для больших количеств – более 1000 кг) Таблица 3 приложения 4 к гигиеническому нормативу «Критерии оценки радиационного воздействия» (0,1 Бк/г – ⁵⁴ Mn, ⁶⁰ Co, ¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs)	Освобождение из-под регулирующего контроля (для умеренных количеств – менее 1000 кг)	Промышленные ОНАО АЭС (согласно санитарным правилам СП 2.6.6.2572-2010) 0,3 Бк/г	Материалы, загрязненные техногенными радионуклидами (Приложение 3 к ОСПОРБ 99/2010) 0,1 Бк/г – ⁵⁴ Mn, ⁶⁰ Co, ¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs
Освобождение из-под регулирующего контроля		Полигон промышленных отходов	

При разработке концептуального проекта в отсутствие выбранной площадки для размещения ПЗРО в данной работе было принято, что пункт захоронения РАО и ОНАО представляют собой единый комплекс зданий, сооружений и инженерных коммуникаций, размещенных на одной площадке. Компонентные решения по схеме генерального плана проработаны по варианту организации ПЗРО как функционально независимого объекта (максимальный состав зданий, сооружений и систем технологического и вспомогательного назначения), что позволит в дальнейшем оптимизировать состав объекта с привязкой к конкретной площадке его размещения. Введенный в санитарных правилах СП 2.6.6.2572-2010 термин «пункт захоронения ОНАО» в данном случае для захоронения ОНАО не используется, так как пункт захоронения ОНАО входит в состав ПЗРО.

Характеристики радиоактивных отходов. В результате выполненного при разработке технической концепции ПЗРО анализа соответствия характеристик поступающих с АЭС упаковок твердых радиоактивных отходов (ТРО) регламентируемым общим критериям приемлемости РАО для захоронения выявлено:

упаковки отвержденных жидких РАО (ЖРО) и осушенных ионнообменных смол (ИОС), сформированные на АЭС на основе контейнеров НЗК-150-1,5П и НЗК-150-1,5П (ИОС), соответствуют общим критериям приемлемости РАО для захоронения;

упаковки с горючими ТРО категорий ОНРАО и НАО, для которых на АЭС в качестве упаковочного комплекта используется специальная 200-литровая металлическая бочка, не удовлетворяют нормативным требованиям по обязательному размещению горючих ТРО в контейнере, соответствующем требованиям к огнестойкости;

упаковки с ТРО категории САО при использовании в качестве упаковочного комплекта бочки не удовлетворяют общим критериям приемлемости для РАО класса 3 в части сохранения изолирующей способности упаковки РАО и устойчивости к термическим циклам;

упаковки с негорючими ТРО категорий ОНРАО и НАО при использовании в качестве упаковочного комплекта бочки соответствуют общим критериям приемлемости РАО для захоронения.

Исходя из изложенного схема обращения с упаковками РАО классов 3 и 4 (за исключением ОНАО) в ПЗРО разделена на два потока:

1. Обращение с упаковками РАО, которые поступают в ПЗРО с Белорусской АЭС в форме, отвечающей критериям приемлемости для захоронения:

упаковки среднеактивных отвержденных ЖРО, сформированные на основе контейнера НЗК-150-1,5П;

упаковки среднеактивных ИОС, сформированные на основе контейнера НЗК-150-1,5П (ИОС);

упаковки с негорючими НАО и ОНРАО, сформированные на основе специальной 200-литровой бочки.

2. Обращение с упаковками РАО, для которых выявлена необходимость дополнительного кондиционирования для приведения их к конечной форме, приемлемой для захоронения в ПЗРО Белорусской АЭС:

упаковки с отходами категории САО, сформированные на основе специальной 200-литровой бочки;

упаковки с горючими НАО и ОНРАО, сформированные на основе специальной 200-литровой бочки.

В результате выполненного анализа возможных способов кондиционирования горючих ТРО (сжигание, суперпрессование и размещение в огнестойких контейнерах) в данной работе установлено, что размещение горючих ТРО категорий ОНРАО и НАО в железобетонном контейнере является наиболее рациональным способом для ПЗРО Белорусской АЭС с точки зрения экономической эффективности, а также характеризуется отсутствием образования вторичных РАО и оказывает минимальное воздействие на загрязнение окружающей среды.

Для унификации проектных решений в качестве конечной формы упаковки для размещения на захоронение бочек с горючими ТРО категорий ОНРАО и НАО рекомендован контейнер НЗК-150-1,5П, характеризующийся пределом огнестойкости не менее 0,75 ч.

Поскольку для ТРО категорий ОНРАО и НАО не требуется применения защитных контейнеров двухцелевого назначения, при разработке проектных решений по ПЗРО целесообразно создать упрощенную конструкцию контейнера, обеспечивающую соответствие требованиям к огнестойкости и соответствующую по размерам и конструкции грузозахватных элементов типу НЗК-150-1,5П. Для исключения применения при обращении с упаковками ТРО категории САО в ПЗРО дистанционных методов (ограничения мощности дозы γ -излучения на поверхности упаковки), приведения упаковки ТРО в соответствие нормативным требованиям по общим критериям приемлемости для захоронения РАО класса 3 и унификации проектных решений в качестве конечной формы упаковки для размещения на захоронение бочек с ТРО категории САО также рекомендован контейнер НЗК-150-1,5П.

Для размещения бочек с горючими ТРО категорий ОНРАО и НАО и с ТРО категории САО в контейнере НЗК-150-1,5П на ПЗРО рекомендовано организовать участок формирования таких контейнеров и реализовать технологии заливки межбочечного пространства цементным раствором и герметизации НЗК, поэтому проработаны указанные технологии и выбрано соответствующее оборудование.

В табл. 3 приведены количественные данные по удаляемым с АЭС эксплуатационным РАО (за исключением ОНАО) и конечным формам этих упаковок РАО, поступающим на захоронение в сооружения захоронения ПЗРО, с разбивкой по их видам, категориям, классам и типам упаковок.

Т а б л и ц а 3. Количество радиоактивных отходов за 60 лет эксплуатации двух блоков АЭС

Table 3. Radioactive waste amount produced over 60 years of the NPP's two units operation

Наименование РАО	Класс РАО	Упаковки РАО, образующиеся при эксплуатации АЭС			Упаковки РАО, поступающие на захоронение		
		Объем РАО, м ³	Наименование упаковки	Количество упаковок, шт.	Объем РАО, м ³	Наименование упаковки	Количество упаковок, шт.
Отвержденные ЖРО и осушенные ИОС	3	3768	Контейнер НЗК-150-1,5П; контейнер НЗК-150-1,5П (ИОС)	2640	9882	Контейнер НЗК-150-1,5П; контейнер НЗК-150-1,5П (ИОС)	2640
Среднеактивные ТРО	3	300	Бочка $V = 0,2 \text{ м}^3$	3000	2808	Контейнер НЗК-150-1,5П	750
Горючие НАО, ОНРАО	4	720	Бочка $V = 0,2 \text{ м}^3$	3600	3369	Контейнер НЗК-150-1,5П	900
Негорючие НАО, ОНРАО	4	3792	Бочка $V = 0,2 \text{ м}^3$	18 960	3792	Бочка $V = 0,2 \text{ м}^3$	18 960
Итого		8580		28 200	19 851		23 250

Схема обращения с РАО введенной эксплуатационной категории ОНАО определяется их видом:

отходы, хранящиеся на Белорусской АЭС до отправки на захоронение в неупакованном виде (так называемые однородные ОНАО, представленные в основном иловыми отложениями очистных сооружений, донными отложениями брызгальных бассейнов);

отходы, хранящиеся на Белорусской АЭС до отправки на захоронение в упакованном виде (упаковки ОНАО на основе бочки ГОСТ 13950): угольный адсорбент, отходы древесины, теплоизоляция, металл, СИЗ, пластикат, полиэтилен, ветошь и др.

Однородных ОНАО образуется на АЭС ориентировочно $10 \text{ м}^3/\text{год}$ с одного энергоблока.

Оценка предполагаемого количества второй группы ОНАО, образуемых в зоне контролируемого доступа (ЗКД), выполнена на основании опыта эксплуатации российских АЭС. При этом кроме отходов с нижней границей удельной β -активности $0,3 \text{ кБк/кг}$, установленной для отнесения отходов к ОНАО в Российской Федерации, учитывались также все образующиеся в ЗКД отходы с суммарной удельной β -активностью до $0,3 \text{ кБк/кг}$. Такая консервативная оценка предполагаемого объема ОНАО Белорусской АЭС составляет $22,5 \text{ м}^3/\text{год}$ с одного энергоблока и произведена исходя из того, что изначально все отходы, образовавшиеся в ЗКД, должны рассматриваться как радиоактивные.

ОНАО Белорусской АЭС удовлетворяют нормативным требованиям к захоронению таких отходов, за исключением требования по минимизации объемов. Поэтому «мягкие» (пригодные для прессования) ОНАО должны подвергаться прессованию на ПЗРО.

При разработке технической концепции ПЗРО принято, что ОНАО, хранящиеся на Белорусской АЭС в неупакованном виде, перед удалением с территории АЭС в ПЗРО подлежат размещению в контейнеры типа МКР (мягкий контейнер разовый) для исключения распространения радиоактивного загрязнения при транспортировании.

В результате анализа нормативных требований к переработке ОНАО и принятых в референтных проектах способов подготовки ОНАО к размещению на захоронение определены оптимальные варианты конечных форм упаковок ОНАО для их захоронения в планируемом ПЗРО:

для непрессуемых ОНАО – 200-литровая бочка по ГОСТ 13950-91;

для мягких (прессуемых) ОНАО – пакетированный брикет ОНАО (перетянутый металлическими лентами и обернутый в полиэтиленовую пленку спрессованный брикет объемом 1 м³, массой 500÷600 кг и размерами 1300×1100×700 мм³);

для однородных ОНАО, хранящихся на АЭС в местах образования, – мягкий контейнер МКР- 1,0Л4-1,0ПП объемом 1,5 м³ и грузоподъемностью 1500 кг.

При размещении в сооружении для захоронения указанные упаковки ОНАО (бочки, спрессованные пакетированные брикеты, мягкие контейнеры) целесообразно предварительно разместить в стандартный грузовой 20-футовый контейнер (рекомендован контейнер 1СХ размерами 6058×2438×1300 мм³). Применение формообразующего контейнера обеспечит упорядоченную загрузку ОНАО на место захоронения и целостность упаковок, уменьшит количество грузоподъемных и транспортных операций.

В табл. 4 приведены прогнозные данные по количеству отходов выделенной эксплуатационной категории ОНАО. Оценка произведена с учетом объемов ОНАО, образующихся в результате перевода в ходе проведения периодических ревизий части их упаковок в «чистые» отходы из-за распада короткоживущих радионуклидов (освобождение из-под регулирующего контроля), а также образования ОНАО при осуществлении периодических работ по реконструкции и модернизации на АЭС. Указанная оценка требует уточнения по результатам эксплуатации Белорусской АЭС.

Т а б л и ц а 4. **Количество очень низкоактивных радиоактивных отходов за 60 лет эксплуатации двух блоков АЭС**

T a b l e 4. **Very low-level radioactive waste amount produced over 60 years of the NPP's two units operation**

Наименование ОНАО	Количество ОНАО, образующихся при эксплуатации			Количество ОНАО, поступающих на захоронение			
	Объем, м ³	Наименование упаковки	Количество упаковок, шт.	Объем упаковок ОНАО, м ³	Наименование упаковки	Количество упаковок, шт.	Количество 20-футовых контейнеров, шт.
Прессуемые	1200	Бочка $V = 0,2 \text{ м}^3$	6000	400	Брикет $V = 1,0 \text{ м}^3$	400	34
Непрессуемые	500	Бочка $V = 0,2 \text{ м}^3$	2500	500	Бочка $V = 0,2 \text{ м}^3$	2500	74
Хранящиеся на местах образования без упаковки	1700	–	–	1700	Контейнер типа МКР $V = 1,25 \text{ м}^3$	1360	136
Итого	3400		8500	2600		4260	244

По результатам определения конечных форм упаковок РАО установлен проектный объем захоронения РАО Белорусской АЭС.

Объем захоронения на ПЗРО для эксплуатационных РАО классов 3 и 4 составит 19452 м³ упаковок РАО, из них: класса 3 – 12372 м³ (3390 НЗК); класса 4 – 7080 м³ (900 НЗК и 18960 бочек).

Принято, что первая очередь строительства ПЗРО будет рассчитана на загрузку РАО, которые образуются за 10 лет эксплуатации АЭС. Объем захоронения для первой очереди ПЗРО – 3242 м³ упаковок РАО, из них: класса 3 – 2062 м³ (565 НЗК); класса 4 – 1180 м³ (160 НЗК и 3160 бочек).

Объем захоронения РАО категорий ОНРАО, НАО и САО, прогнозируемых при выводе из эксплуатации двух блоков АЭС, по консервативной оценке составит около 10000 м³.

Таким образом, объем захоронения РАО (кроме ВАО и ОНАО), образующихся в процессе эксплуатации и вывода из эксплуатации Белорусской АЭС, может достигать 30000 м³.

Основные технические решения по пункту захоронения радиоактивных отходов Белорусской АЭС. В рамках концептуального проекта ПЗРО разработаны типовые решения «на стекле», без привязки к конкретному месту размещения объекта, но с учетом инженерно-

геологических условий в районах размещения конкурентных и оптимальной площадок ПЗРО в 30-километровой зоне АЭС [7]. По результатам выполнения в Объединенном институте энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси научно-исследовательской работы в качестве перспективных площадок рекомендованы четыре конкурентные площадки вблизи Белорусской АЭС. Для решения задачи оценки радиационной безопасности концептуального проекта ПЗРО Белорусской АЭС как пример рассмотрено размещение ПЗРО на рекомендованной в качестве оптимальной площадке №2 площадью 1,12 км², расположенной в 1,2 км к северу от площадки АЭС [7]. Уровень грунтовых вод на площадке изменяется в пределах 11–13 м, средняя мощность зоны аэрации – 12,5 м.

Содержание разработанного концептуального проекта соответствует нормативным требованиям к проекту ПЗРО. В процессе его разработки научное обоснование ключевых принципиальных решений по способам обращения с РАО и концепции обеспечения радиационной безопасности сопровождалось детальной проработкой обладающей соответствующими компетенциями привлеченной российской организацией транспортно-технологических схем обращения с РАО, конструктивных и объемно-планировочных решений по системам технологического и инженерного обеспечения, влияния объекта на окружающую среду, технико-экономической эффективности.

На основе рассмотрения критериев и принципов обеспечения безопасности при хранении и захоронении РАО в рассматриваемом концептуальном проекте предложены технические решения по безопасному хранению и захоронению РАО каждой категории на ПЗРО Белорусской АЭС, которые разделены на следующие группы:

- решения по установлению критериев приемлемости РАО для захоронения;
- решения, гарантирующие долговременную безопасность сооружений захоронения;
- решения по обеспечению возможности безопасного закрытия ПЗРО, проведения мониторинга площадки ПЗРО и окружающей среды, поддержания границы санитарно-защитной зоны в период после закрытия ПЗРО в течение обоснованного в проекте срока;
- решения по составу системы инженерных барьеров с указанием назначенных функций, важных для безопасности;
- решения по системам технологического и вспомогательного назначения, обеспечивающие функционирование ПЗРО в период эксплуатации;
- решения, гарантирующие функционирование систем мониторинга после закрытия ПЗРО.

Также предложены организационные решения для реализации критериев и принципов безопасности ПЗРО Белорусской АЭС, включающие мероприятия по радиационной, промышленной, пожарной безопасности в период эксплуатации ПЗРО и после его закрытия.

При разработке технической концепции ПЗРО ориентировались на оценочные данные по наличию долгоживущих радионуклидов в эксплуатационных РАО АЭС с ВВЭР-1200, полученные с применением корреляционного метода.

Перечень основных и вспомогательных зданий и сооружений ПЗРО, необходимых для формирования транспортно-технологической схемы обращения с упаковками РАО и гарантии нормального функционирования систем инженерного обеспечения, и их принципиальные конструктивные и объемно-планировочные решения определены по результатам анализа нормативных требований, предпроектной и проектной документации аналогов – пунктов захоронения, планируемых к строительству в Российской Федерации, таких как ПЗРО в Ленинградской области, ПЗРО в Приволжском федеральном округе (территория ОАО «ГНИЦ НИИАР»), тендерной документации на разработку проектной документации ПЗРО в городах Северске и Озерске, проектной документации ПЗ ОНАО ЛАЭС-2, Курской АЭС и в Губе Андреева (Мурманская область), – с учетом технологических особенностей кондиционирования РАО, поступающих с Белорусской АЭС.

Учтена необходимость создания участков формирования НЗК, прессования ОНАО, организации буферного хранения упаковок РАО, организации обращения с вторичными ТРО и ЖРО, образующимися в процессе эксплуатации ПЗРО.

По результатам обоснования способов обращения с РАО и их захоронения предложены конструкции сооружений технологического назначения – для переработки и захоронения РАО (в том числе с использованием упрощенных технологий для ОНАО).

Базируясь на нормативных требованиях и анализе применяемых референтных технологий приповерхностного захоронения РАО за рубежом, с учетом природных условий на рекомендованных перспективных площадках размещения ПЗРО (инженерно-геологических и гидрогеологических факторов, класса и параметров возможного воздействия вероятного смерча), оптимальной конструкцией сооружения захоронения РАО, образующихся при эксплуатации и выводе из эксплуатации Белорусской АЭС, определен «курганный» ПЗРО заглубленного типа (аналоги – концепции ПЗРО в городах Северске, Озерске и Новоуральске в Российской Федерации).

Конструкция сооружения захоронения для РАО представляет собой модульные железобетонные отсеки, для достижения унифицированного решения по удовлетворяющему нормативным требованиям размещению РАО различных классов заглубленная часть которых (до отметки – 6,8 м) предназначена для упаковок РАО класса 3, а возвышающаяся над поверхностью земли часть (до отметки +1,2 м) – для упаковок РАО класса 4. В конструкции реализуется принцип многобарьерности, сочетающий как природные, так и предложенные инженерные барьеры (физическая форма захораниваемых РАО, стенки контейнеров, буферный сорбирующий материал в отсеках сооружения захоронения, бетонные конструкции сооружения, глиняный экран в составе подстилающего экрана, два слоя бентонитового покрывала, полиэтилен высокой плотности в составе покрывающего экрана и др.). Для захоронения 30 000 м³ упаковок РАО на площадке предусматриваются три модуля захоронения по 10 000 м³, каждый из которых состоит из 30 отсеков. Для загрузки образующихся за первые 10 лет эксплуатации АЭС РАО объемом 3242 м³ используется секция из 10 отсеков (первая очередь строительства).

На рис. 1 представлены общие виды сооружения захоронения РАО в эксплуатационный (а) и постэксплуатационный (b) (после его закрытия) периоды.

Для ОНАО на основе анализа референтных технологий (для Ленинградской, Курской АЭС, АЭС «Руппур», захоронения в Губе Андреева) рекомендовано их размещение в земляные карты (заглубленные обвалованные площадки), схематично представленные на рис. 2.

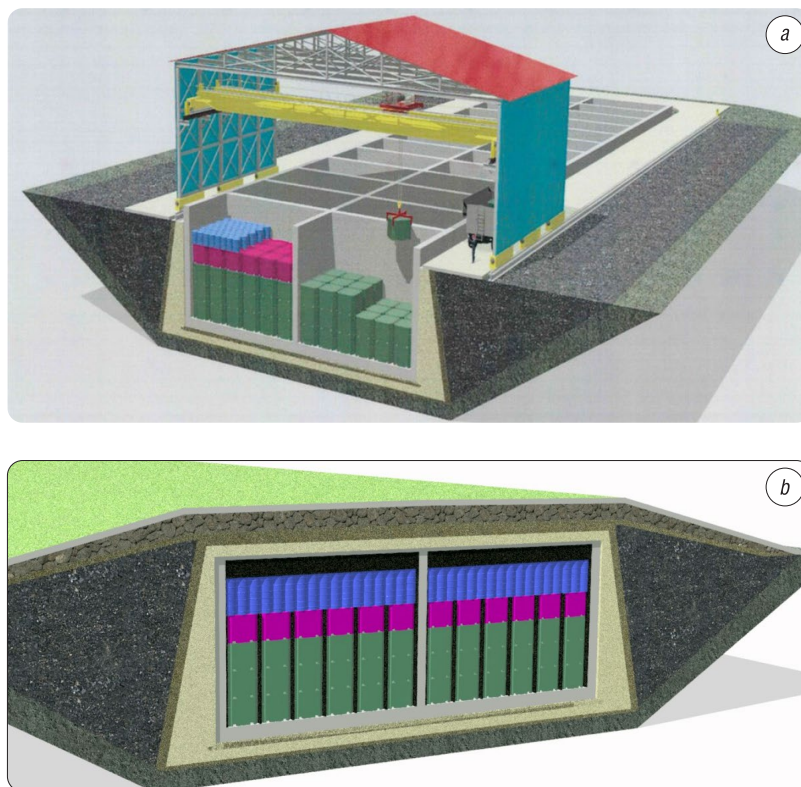


Рис. 1. Сооружение захоронения радиоактивных отходов при эксплуатации (а) и после закрытия (b)

Fig. 1. Radioactive waste disposal facility during operation (a) and after closure (b)

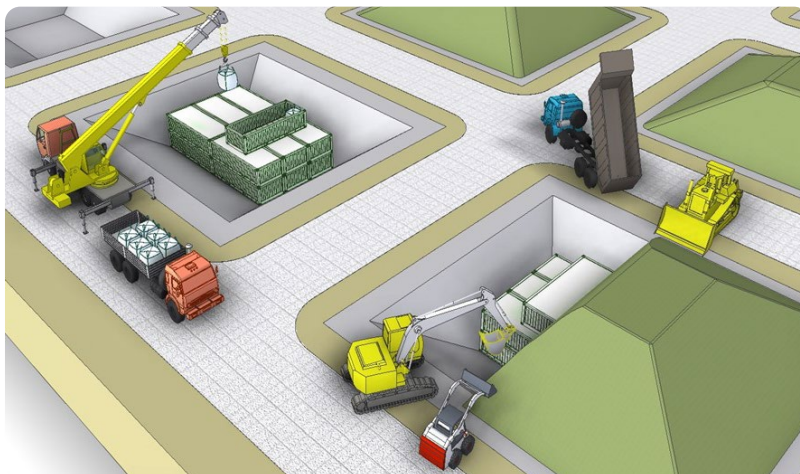


Рис. 2. Сооружения захоронения очень низкоактивных радиоактивных отходов, образующихся при эксплуатации АЭС

Fig. 2. Disposal facilities of industrial very low-level radioactive waste generated during NPP operation

Для захоронения 5200 м³ упаковок ОНАО, прогнозируемых при эксплуатации и выводе из эксплуатации Белорусской АЭС, предусматривается девять карт складирования: восемь карт для эксплуатационных ОНАО и одна, значительно большего размера, – для ОНАО, образующихся при выводе из эксплуатации АЭС. Одна карта складирования эксплуатационных ОНАО рассчитана на размещение 308 м³ упаковок, прогнозируемых за 10 лет эксплуатации Белорусской АЭС, и представляет собой траншею глубиной около 2,2 м (без учета толщины подстилающих экранов). Габариты траншеи в плане – 14,7 × 38 м². Размеры одной карты складирования ОНАО, образующихся при эксплуатации Белорусской АЭС, с покрывающими экранами в плане 34,7 × 51,6 м². В качестве формообразующего контейнера используется, как уже отмечалось, 20-футовый контейнер, устанавливаемый в карте складирования до загрузки упаковок ОНАО. Свободное пространство между упаковками ОНАО внутри контейнера заполняется буферным материалом.

В рассматриваемом концептуальном проекте проработаны принципиальные конструктивные и компоновочные решения по технологическим корпусам обращения с РАО и ОНАО с детализацией запланированных отделений и участков, мойке автотранспорта, наблюдательным скважинам, площадке хранения материалов для консервации сооружений захоронения с хранилищами буферных материалов.

На рис. 3 представлен технологический корпус обращения с радиоактивными отходами. В одноэтажной части располагаются два транспортных въезда и технологические отделения (формирования НЗК,

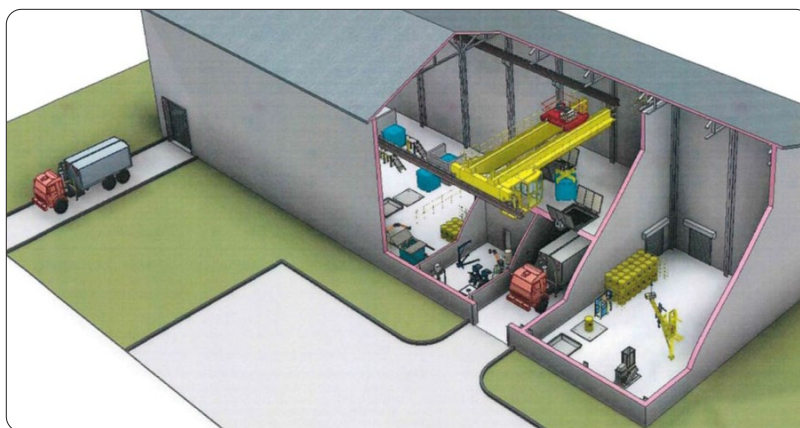


Рис. 3. Технологический корпус обращения с радиоактивными отходами

Fig. 3. Technological building for the radioactive waste management

приготовления фиксирующей смеси, переработки ТРО, переработки ЖРО, входного контроля упаковок РАО, буферного хранения упаковок РАО, рассчитанное на прием до 36 упаковок НЗК и 170 бочек с низкоактивными негорючими ТРО). Вместимость отделения буферного хранения упаковок РАО принята равной половине количества упаковок РАО, размещаемых в одном отсеке модуля захоронения.

Технологический корпус обращения с ОНАО представлен на рис. 4 и включает в себя участки размещения поступающих с АЭС бочек с ОНАО, прессования и хранения конечных упаковок ОНАО. Вместимость зон буферного хранения бочек, пакетированных брикетов и контейнеров типа МКР принята, исходя из количества требующих размещения в одной карте складирования упаковок ОНАО.

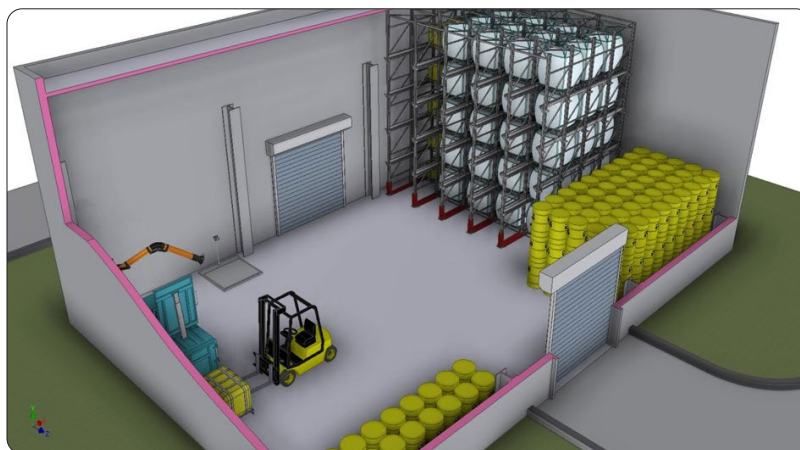


Рис. 4. Технологический корпус обращения с очень низкоактивными радиоактивными отходами

Fig. 4. Technological building for the very low-level radioactive waste management

В концептуальном проекте определены также перечень, основные характеристики и оборудование зданий, сооружений и систем инженерного обеспечения ПЗРО с указанием аналогов. Состав зданий и сооружений ПЗРО включает более 20 объектов:

здания и сооружения технологического назначения (сооружения захоронения РАО (два модуля для эксплуатационных РАО и один для РАО, образующихся при выводе из эксплуатации АЭС), карты складирования ОНАО (девять карт), технологический корпус обращения с РАО, технологический корпус обращения с ОНАО, мойка автотранспорта, наблюдательные скважины по периметру сооружений технологического назначения, площадка хранения материалов для консервации и закрытия сооружений захоронения с хранилищами буферных материалов);

вспомогательные здания и сооружения (административно-бытовой корпус, автотранспортный контрольно-пропускной пункт, трансформаторная подстанция, дизель-генератор, санпропускник, гараж для автомашин, резервуары запаса воды на хозяйственно-питьевые и противопожарные нужды, очистные сооружения бытовых и промышленных стоков, очистные сооружения дождевых стоков, помещение охраны, пожарное депо, топливно-заправочный пункт, ограждение системы физической защиты (СФЗ), артезианские скважины).

Исходя из определенных площадей застройки зданий и сооружений технологического и вспомогательного назначения ПЗРО, условий обеспечения технологического процесса производства, рациональных транспортных связей, санитарных, противопожарных требований строительных норм и правил, предложена схема генерального плана ПЗРО, предусматривающая возможность расширения за счет возведения дополнительных сооружений захоронения РАО. Площадь ПЗРО в пределах ограждения СФЗ при строительстве четырех очередей (полное развитие) составит ориентировочно 17 га, вне ограждения – 7 га.

Для предложенного концептуального проекта выполнена оценка радиационной безопасности ПЗРО при его эксплуатации и долговременной безопасности после закрытия (в постэксплуатационный период) в соответствии с возможными сценариями эволюции сооружений захоронения. Определен перечень возможных аварий на ПЗРО и необходимые противоаварийные мероприятия; выполнено обоснование пределов безопасной эксплуатации ПЗРО по выбросам и сбросам радионуклидов. Даны предложения по организации системы радиационного контроля и мониторинга системы захоронения РАО в процессе эксплуатации ПЗРО и в постэксплуатационный период. Предложен комплекс необходимых мероприятий по выводу из эксплуатации (закрытию) ПЗРО.

Выполненная прогнозная расчетная оценка долговременной безопасности системы захоронения РАО после закрытия ПЗРО показала, что предлагаемая техническая концепция обеспечивает безопасность захоронения РАО в период их потенциальной опасности с учетом возможных внешних воздействий природного и техногенного происхождения. По результатам оценки возможного радиационного воздействия ПЗРО на население определено, что он будет относиться к III категории радиационных объектов по потенциальной радиационной опасности и граница санитарно-защитной зоны будет ограничиваться его промплощадкой.

Таким образом, ПЗРО обеспечивает окончательную изоляцию кондиционированных РАО классов 3, 4 и ОНАО, образующихся при эксплуатации и выводе из эксплуатации Белорусской АЭС:

30 000 м³ упаковок РАО классов 3 и 4, в том числе объем первой очереди – 3308,5 м³;

5200 м³ упаковок ОНАО, в том числе объем первой очереди – 308 м³.

Общая активность РАО, которая может быть размещена в ПЗРО при условии обеспечения его долговременной безопасности, составляет: для РАО классов 3 и 4 – $9,0 \cdot 10^{14}$ Бк, в том числе α -излучатели – $6,8 \cdot 10^9$ Бк, трансурановые радионуклиды – $6,8 \cdot 10^9$ Бк; для ОНАО – $4,1 \cdot 10^9$ Бк.

Основными радионуклидами, вносящими вклад в активность РАО, являются ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co, ⁹⁰Sr. Основные радиологически значимые долгоживущие радионуклиды – это ¹⁴C, ⁵⁹Ni, ⁶⁰Co, ⁶³Ni, ⁹⁴Nb, ⁹⁹Tc, ¹²⁹I, ²³⁵U, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu, ²⁴¹Am.

Удельная активность радионуклидов в РАО, содержащих $\beta(\gamma)$ -излучающие радионуклиды с периодом полураспада менее 31 года (с учетом непревышения других показателей критериев приемлемости и суммарной емкости ПЗРО), ограничена суммарной удельной активностью $1,0 \cdot 10^9$ Бк/кг, в том числе ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в сумме до $5 \cdot 10^7$ Бк/кг (на основе анализа аварийных ситуаций). Для остальных $\beta(\gamma)$ -излучающих радионуклидов предельная (максимальная) удельная активность – $1 \cdot 10^9$ Бк/кг. Для α -излучающих радионуклидов максимальная удельная активность составляет $1,0 \cdot 10^3$ Бк/кг, для трансурановых – $1,0 \cdot 10^2$ Бк/кг.

Этапы функционирования ПЗРО: эксплуатационный период – приблизительно 70 лет; постэксплуатационный период – около 500 лет, в том числе период активного мониторинга – 100 лет.

Производительность – четыре упаковки РАО на основе контейнера НЗК либо 24 бочки с РАО в смену. Проведение работ по загрузке и консервации сооружений захоронения предусмотрено в теплый период года, длительность работ – около 7 месяцев. Принятая производительность обеспечивает в течение года объем захоронения 1316 м³ упаковок РАО (1480 упаковок в год).

Выполнена оценка укрупненных технико-экономических показателей предложенного проекта ПЗРО в целом и его первой очереди. Ориентировочная стоимость строительства ПЗРО составляет около 50 млн долл. США, в том числе первой очереди – около 25 млн долл. США.

Заключение. Разработанная техническая концепция объекта захоронения РАО является основой для подготовки предпроектной (прединвестиционной) документации для планируемого сооружения ПЗРО. Учитывая достигнутую степень детализации технических решений компетентной российской организацией, материалы концептуального проекта могут быть использованы также на этапе проектирования объекта. Рассматриваемый объект ориентирован на захоронение РАО Белорусской АЭС, однако в случае ожидаемого принятия решения о создании в Республике Беларусь централизованного пункта захоронения для всех видов имеющихся и образуемых в стране РАО выполненные разработки применимы для формирования соответствующих модулей ПЗРО.

Список использованных источников

1. Седьмой национальный доклад Республики Беларусь о выполнении обязательств, вытекающих из Объединенной конвенции по безопасности обращения с отработавшим ядерным топливом и безопасности обращения с радиоактивными отходами [Электронный ресурс]. – Минск, 2020. – Режим доступа: https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/294/belarus_jc_national_report_2020_ru.pdf – Дата доступа: 05.09.2021.
2. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО / Н.С. Цебаковская [и др.]; под общ. ред. И.И. Линге, Ю.Д. Полякова. – М.: Комтехпринт, 2015. – 208 с.
3. Classification of radioactive waste // IAEA - GSG-1. – Vienna, 2009. – 68 p.
4. Шестой национальный доклад Российской Федерации о выполнении обязательств, вытекающих из Объединенной конвенции по безопасности обращения с отработавшим ядерным топливом и безопасности обращения с радиоактивными отходами [Электронный ресурс]. – М., 2020. – Режим доступа: http://www.gosnadzor.ru/activity/international/national%20reports/Russian_Federation_rus.pdf – Дата доступа: 07.09.2021.
5. Technical considerations in the design of near surface disposal facilities for radioactive waste // IAEA-TECDOC-1256. – Vienna, 2001. – 60 p.
6. Иванов, Е. А. Актуальные проблемы классификации удаляемых твердых радиоактивных отходов, образующихся при использовании атомной энергии / Е. А. Иванов, Д. А. Шаров, А. В. Курындин // Ядерная и радиационная безопасность. – 2018. – №2 (88). – С. 11–23.
7. Рекомендации по выбору площадки для размещения пункта захоронения радиоактивных отходов Белорусской АЭС / В. Т. Казазян [и др.] // Материалы 7-й Международ. конф. «Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии 21-го века». – Минск, 2018. – С. 162–166.

References

1. 7th National Report of the Republic of Belarus on Compliance with Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. Available at: https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/294/belarus_jc_national_report_2020_ru.pdf (accessed 5 September 2021) (in Russian).
2. Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Kapyrin I. V., Medyantsev N. V., Shamina A. V. *Review of Foreign Practices of SNF and RW disposal*. Moscow, Komtekhpriint Publ., 2015. 208 p. (in Russian).
3. Classification of radioactive waste. *IAEA-GSG-1*. Vienna, 2009. 68 p.
4. 6th National Report of the Russian Federation on Compliance with Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. Available at: http://www.gosnadzor.ru/activity/international/national%20reports/Russian_Federation_rus.pdf (accessed 7 September 2021) (in Russian).
5. Technical considerations in the design of near surface disposal facilities for radioactive waste. *IAEA-TECDOC-1256*. Vienna, 2001. 60 p.
6. Ivanov E. A., Sharov D. A., Kuryndin D. A. Actual problems of the classification of removable solid radioactive waste generated by the use of atomic energy. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' = Nuclear and Radiation Safety*, 2018, no. 2 (88), pp. 11–23 (in Russian).
7. Kazazyan V. T., Malykhin A. P., Molodykh V. G., Shiryayeva N. M. Recommendations for choosing a site for radioactive waste disposal facilities of the Belarusian nuclear power plant. *Materialy 7-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Atomnaya energetika, yadernye i radiatsionnye tekhnologii 21-go veka"* [Materials of the 7th International Conference "Nuclear Power Engineering, Nuclear and Radiation Technologies of the 21st Century"]. Minsk, 2018, pp. 162–166 (in Russian).

Информация об авторах

Жемжуров Михаил Леонидович – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией радиационно-химических исследований окружающей среды, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (д. Прилесье, 47/17, 223063, Лувослободской с/с, Минский район, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: jema@sosny.bas-net.by

Кузьмина Наталья Дмитриевна – старший научный сотрудник, лаборатория детерминистического и вероятностного анализа безопасности объектов использования атомной энергии, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (д. Прилесье, 47/17, 223063, Лувослободской с/с, Минский район, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: ndkuzmina@sosny.bas-net.by

Information about the authors

Mikhail L. Zhemzhurov – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Laboratory of Radiation and Chemical Research of the Environment, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/17, Prilesye village, 223063, Lugovoslobodskaya village, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: jema@sosny.bas-net.by

Natallia D. Kuzmina – Senior Researcher, Laboratory for Deterministic and Probabilistic Safety Analysis of Nuclear Facilities, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/17, Prilesye village, 223063, Lugovoslobodskaya village, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: ndkuzmina@sosny.bas-net.by