DOI: 10.25283/2587-9707-2021-4-65-77 УДК: 621.039.7

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ И ПРОЕКТНЫЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ПУНКТОВ ЗАХОРОНЕНИЯ НИЗКО- И СРЕДНЕАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Д. И. Павлов[1], В. Т. Сорокин[2], А. С. Баринов[3], А. В. Дёмин[3], Д. В. Сыченко[3]

[1]Санкт-Петербургский филиал АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» — «ВНИПИЭТ», Санкт-Петербург

[2]АО «Атомэнергопроект», Санкт-Петербург

[3]Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 01 октября 2021 г.

В статье рассмотрены различные варианты конструкций приповерхностных пунктов захоронения радиоактивных отходов (ППЗРО) и материалов инженерных барьеров безопасности (ИББ), приведены сведения о соотношении затрат на создание ИББ, приводятся предложения по выбору типа и конструкции ППЗРО с целью повышения безопасности и сокращения затрат на размещение в них радиоактивных отходов (РАО).

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, приповерхностные пункты захоронения радиоактивных отходов, инженерные барьеры безопасности, контейнеры для захоронения РАО, стоимость захоронения, буферные материалы, отсеки захоронения.*

Введение

В 2016 году в РФ на площадке АО «УЭХК» введен в эксплуатацию первый ППЗРО для РАО 3 и 4 классов [1] (их классификация указана в соответствии с [2]). В 2018 году ФГУП «НО «РАО» получены разрешения на размещение и сооружение пунктов захоронения РАО 3 и 4 классов на ФГУП «ПО «Маяк» и АО «СХК» [3, 4].

Для размещения РАО на этих площадках используются однотипные конструкции ППЗРО — полузаглубленные железобетонные сооружения (отсеки) с подстилающим и покрывающим экранами.

Прохождение государственной экспертизы проектной документации и возможное получение лицензий на эти объекты может послужить предпосылкой для тиражирования в РФ таких конструкций. Однако применение полузаглубленных ППЗРО в качестве типовых в ряде случаев нецелесообразно и требует дополнительного научно-технического и экономического обоснования, учитывающего параметры площадки ППЗРО, а также характеристики и объемы РАО, планируемых к размещению. В настоящей статье представлен краткий анализ видов ППЗРО, эксплуатируемых и проектируемых в Российской Федерации и за рубежом. Показаны их достоинства и недостатки, даны рекомендации по выбору типа и конструкции ППЗРО, которые могут быть использованы при проектировании.

Краткий анализ эксплуатируемых и проектируемых ППЗРО

Основополагающие принципы классификации удаляемых РАО и требования к выбору типа ПЗРО для их захоронения установлены в Федеральном законе от 11.07.2011 № 190 [2]. Постановление Правительства РФ от 19.10.2012 № 1069 [5] детализирует соответствующие требования и устанавливает численные критерии классификации. В соответствии с требованиями данных документов допускается осуществлять захоронение кондиционированных твердых низко- и среднеактивных короткоживущих радиоактивных отходов в ППЗРО.

При этом в рекомендациях МАГАТЭ GSG-1 «Классификация радиоактивных отходов» [6] представлен иной подход, в соответствии с которым к тому или иному классу относятся те РАО, которые могут быть безопасно захоронены в ПЗРО конкретного типа.

В настоящий момент обсуждаются изменения критериев классификации РАО и исключение численных показателей их характеристик, определенных в НП-093-14 [7], для установления только частных критериев в рамках проектной документации на ПЗРО.

В связи с этим особое значение приобретают вопросы оптимизации конструкций ПЗРО различного типа с учетом накопленного национального и международного опыта с целью определения наиболее подходящих вариантов для РАО с различными характеристиками.

Мировой и отечественный опыт захоронения низко- и среднеактивных отходов представлен разными видами наземных, полузаглубленных и заглубленных ППЗРО.

В Российской Федерации конкретных требований к конструкциям и материалам ИББ в нормативной базе РФ на сегодняшний день нет. Общие требования к конструкции пунктов захоронения и безопасности приведены в НП-055-14 [8] и в НП-069-14 [9]. В соответствии с данными документами ПЗРО должен иметь систему барьеров безопасности (инженерных и естественных), препятствующих распространению ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду.

Согласно [9] к ИББ ППЗРО относятся:

- упаковка РАО и ее отдельные элементы (форма РАО, контейнер);
- строительные конструкции ППЗРО и их отдельные части;
- конструкционные материалы ячейки захоронения РАО (в терминологии настоящей статьи — отсека захоронения);
- буферные материалы;
- подстилающий экран;
- покрывающий экран.

При этом в тексте документов не содержится требований о том, что вышеуказанный перечень ИББ является необходимым и/или достаточным для каждого ППЗРО, хотя данный принцип реализован в некоторых зарубежных практиках окончательной изоляции РАО, в соответствии с которыми захоронение отходов осуществляется в нескольких сооружениях, различных по конструкции.

Например, во Франции наименее опасные, но характеризующиеся наибольшими объемами очень низкоактивные радиоактивные отходы, изолируются в наземных ППЗРО упрощенной конструкции с минимальным количеством инженерных барьеров безопасности, а низко- и среднеактивные короткоживущие отходы — в наземных ППЗРО с дополнительными инженерными барьерами — железобетонными отсеками. Долгоживущие низкоактивные отходы планируется размещать в подземном ПЗРО на глубине в несколько десятков метров. Стоит отметить, что, в соответствии с отечественными проектами ППЗРО [1, 3, 4], все эти отходы планируется размещать в сооружениях одинаковой конструкции.

Согласно нормативной базе РФ (раздел II п. 24 [8] и п. 11 [9]) назначение и свойства системы барьеров безопасности определяются в проектной документации и аргументируются в отчете по обоснованию безопасности пункта захоронения РАО.

Классификация систем и элементов ППЗРО и требования к их сейсмостойкости устанавливаются при проектировании в соответствии с нормативной документацией для атомных станций и предприятий ядерного топливного цикла — НП-016-05 и НП-031-01 [10, 11] (специализированные нормативные документы, устанавливающие классификацию и категорирование систем и элементов непосредственно для ППЗРО, не разработаны).

Согласно этой классификации, а также с учетом требований основных документов, регламентирующих вопросы радиационной безопасности, ОСПОРБ-99/2010 [12] и НРБ-99-2009 [13], проектируются конструктивные элементы ППЗРО и ИББ. По результатам принятых решений осуществляется оценка долговременной безопасности ПЗРО в соответствии с требованиями РБ-117-16 и НП-100-17 [14, 15].

При установлении классификации и требований к ИББ на стадии проектирования, помимо требований нормативно-технической

документации, необходимо использовать данные последних достижений науки и техники в области создания ИББ и референтные решения по реализованным проектам ППЗРО. На их основе выбираются, например, буферные материалы, определяется компоновка (тип) ППЗРО, конструкция подстилающего и покрывающего экранов.

Рассмотрим некоторые особенности различных типов ППЗРО.

Полузаглубленные ППЗРО

Конструкция полузаглубленных ППЗРО предусматривает размещение отсеков для упаковок РАО на глубине в несколько метров от поверхности земли.

Этот тип ПЗРО характерен для регионов с сухим климатом и благоприятными гидрогеологическими свойствами площадки с низким уровнем грунтовых вод.

Использование полузаглубленных ППЗРО целесообразно в тех случаях, когда подстилающие породы характеризуются низкой или, наоборот, хорошей водопроницаемостью, а извлеченный грунт при выемке котлована может быть использован для обратной засыпки отсеков захоронения и/или создания покрывающего экрана. В основном это касается площадок, расположенных на территориях с глинистыми грунтами, характеризующимися хорошими изоляционными свойствами (Венгрия (RWTDF) [16], Великобритания (Drigg) [17]), или высокопроницаемыми песками в засушливых регионах (США, Hanford [18], ЮАР, Vaalputs [19]).

Полузаглубленный тип ПЗРО принят для первых российских пунктов захоронения РАО 3 и 4 классов в качестве типового. Эскиз конструкций ППЗРО, разработанных для площадок АО «УЭХК», ФГУП «ПО «Маяк» и АО «СХК» представлен на рис. 1 и 2.

Для данных конструкций ППЗРО характерны следующие технические решения:

- заглубление нижней части отсеков захоронения относительно поверхности земли;
- размещение РАО разных классов в одних отсеках (упаковки РАО 4 класса размещены над упаковками РАО 3 класса);
- использование нескольких защитных барьеров на пути миграции радионуклидов;
- прием разнотипных упаковок для захоронения.

Применение перечисленных технических решений для всех площадок размещения без учета

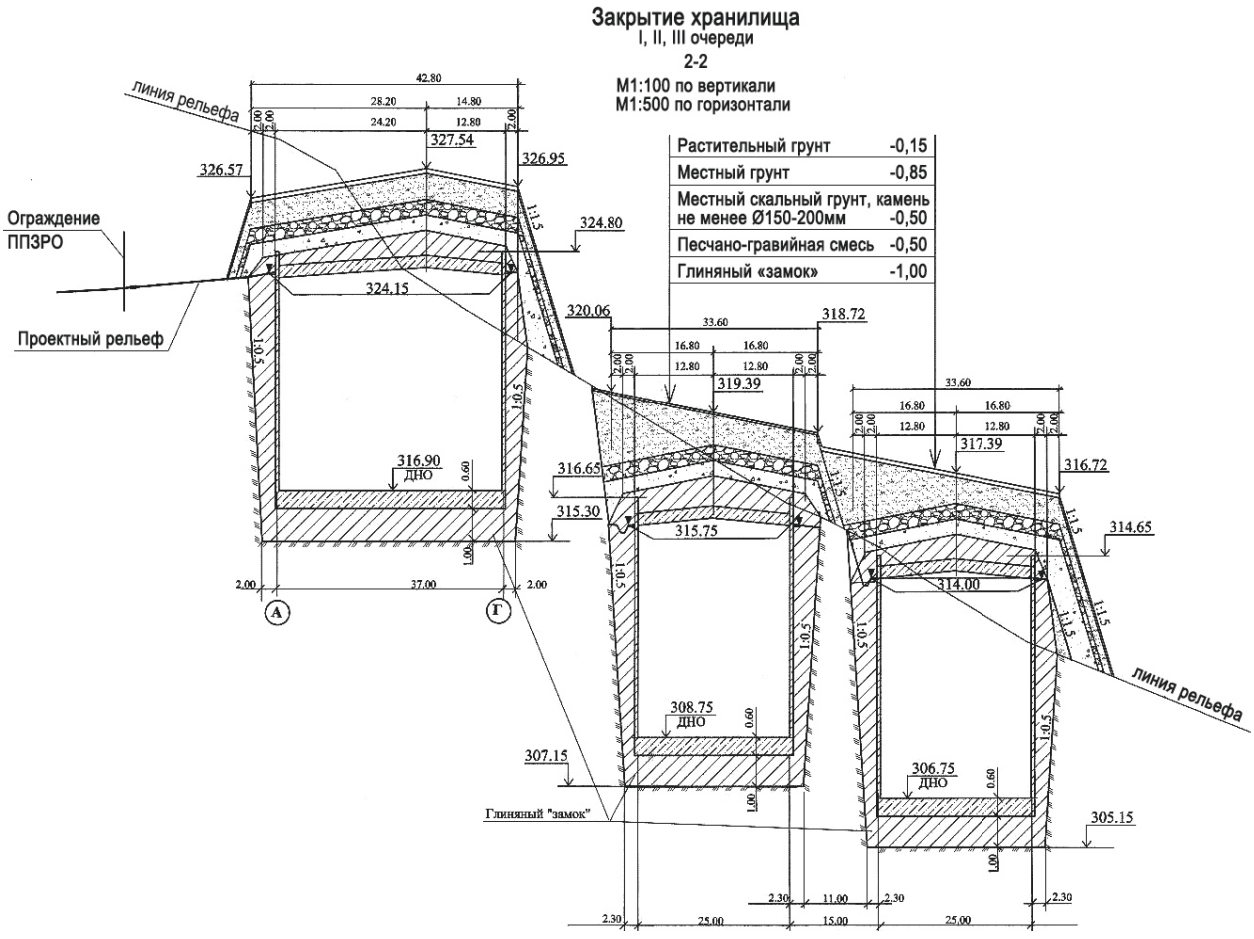

Рис. 1. Конструкция ППЗРО, разработанная для площадки АО «УЭХК» (контейнеры и буферный материал не показаны) [1]

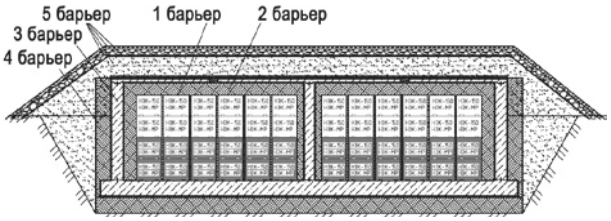

Рис. 2. Конструкция ППЗРО, разработанная для площадок ФГУП «ПО «Маяк» и АО «СХК» [4]
1 барьер — стенки контейнеров;
2 барьер — буферный материал (глинопорошок марки СБМК для площадки АО «СХК», бентонитовые гранулы для площадки ФГУП «ПО «Маяк»);
3 барьер — ограждающие конструкции — отсеки захоронения (бетонные сооружения стен и перекрытий модульных сооружений ППЗРО);
4 барьер — глиняный замок по периметру модульных сооружений;
5 барьер — покрывающий гидроизолирующий экран

их особенностей не имеет на сегодняшний день достаточного научно-технического обоснования, что оставляет возможность еще раз вернуться к рассмотрению данных проектов.

Наземные ППЗРО

Опыт эксплуатации первых полузаглубленных ППЗРО [20] показал, что они могут быть подвержены обводнению вследствие природного или техногенного поднятия уровня грунтовых вод, что противоречит важнейшему требованию безопасности для пункта захоронения РАО — отсутствие воды в зоне захоронения.

Наземные ПЗРО размещают на уровне земли, что существенно снижает риски поступления грунтовых вод в зону захоронения РАО. Для этого достаточно исключить инфильтрацию осадков через верхний покрывающий экран и капиллярное поднятие грунтовых вод через нижний подстилающий экран известными инженерными решениями.

По этим причинам во Франции перешли от практики применения траншей для захоронения низко- и среднеактивных короткоживущих РАО к использованию наземных пунктов захоронения [20] (см. рис. 3).

Таких же решений придерживаются в ряде других стран: в Бельгии, Испании, Литве [21].

Набор инженерных барьеров для наземных и полузаглубленных ППЗРО приблизительно одинаков, но конструкция подстилающего экрана наземных ППЗРО проще, чем заглубленных.

Отдельного внимания заслуживает вопрос сохранения изолирующей способности покрывающего экрана, актуальный как для наземных, так и для полузаглубленных ПЗРО. Для борьбы с деградацией и проседанием покрывающих экранов требуется их регулярный мониторинг и

Рис. 3. Наземный ПЗРО для короткоживущих НАО и САО во Франции (вверху — фото пустых отсеков для РАО, внизу — схема возведения многослойного покрытия над отсеками, заполненными РАО)

обслуживание, а также разработка технических решений, направленных на минимизацию наличия пустот в массиве контейнеров РАО, сдерживание роста кустарников и деревьев, способных корневой системой разрушить верхние слои экрана, препятствие процессам денудации. Данных проблем лишены подземные ПЗРО.

Подземные ППЗРО

Подземные (заглубленные) ППЗРО размещают на глубине нескольких десятков метров. Они характеризуются устойчивостью к внешним воздействиям и наибольшей надежностью при условии размещения в соответствующих гидрогеологических условиях.

Данный тип ППЗРО, по сравнению с наземным и приповерхностным типами, выгодно отличает характер движения воды после контакта с РАО: вода попадает не в поверхностный сток, а в водоносные слои, что существенно снижает скорость миграции радионуклидов.

По этим причинам в Европе значительная часть стран, эксплуатирующих атомные электростанции, использует или планирует

использовать подземные пункты захоронения для низко- и среднеактивных отходов (Германия, Швеция, Финляндия, Словения, Венгрия, Швейцария [21]).

Использование подземных ППЗРО частично решает также задачу захоронения РАО, содержащих долгоживущие радионуклиды. Практика обоснования долговременной безопасности ППЗРО для площадок АО «УЭХК», ФГУП «ПО «Маяк» и АО «СХК» говорит о том, что содержание в них долгоживущих радионуклидов, которое соответствует критериям отнесения РАО к классу 3, согласно принятой в России классификации [5], приходится дополнительно ограничивать во избежание превышения дозовых пределов для населения, установленных нормами радиационной безопасности [13].

Размещение таких отходов, как, например, реакторный графит от вывода из эксплуатации АЭС с реакторами РБМК, который может быть отнесен к РАО 3 класса, в наземных или полузаглубленных пунктах захоронения в данном случае невозможно из-за значительного содержания долгоживущего изотопа ^{14}C.

Ранее отходы 3 класса с содержанием долгоживущих радионуклидов, которые не соответствуют локальным критериям приемлемости ППЗРО, предлагалось направлять в свободные выработки глубинного пункта захоронения [23]. Однако, с учетом сроков создания глубинного ПЗРО [24], это отодвигает перспективу захоронения таких РАО более чем на 40 лет, следовательно, для системного решения проблемы захоронения РАО 3 класса, содержащих долгоживущие радионуклиды, может быть целесообразно создание отдельных региональных подземных (заглубленных) ППЗРО.

Некоторые примеры таких захоронений низко- и среднеактивных отходов, содержащих долгоживущие радионуклиды, которые были разработаны для Северо-Западного территориального округа РФ, представлены на рис. 4.

Рис. 4. Примеры заглубленных конструкций ППЗРО, разработанные для Северо-Западного территориального округа РФ: сверху тоннельная конструкция с использованием проходческого щита, слева внизу – спиральная конструкция, справа внизу – камерная конструкция [25]

Сравнение различных типов ППЗРО

В табл. 1 представлено сравнение различных типов приповерхностных ПЗРО с учетом присущих данным типам достоинств и недостатков.

Таблица 1. Достоинства и недостатки конструкций ППЗРО

Достоинства	Недостатки
Наземный	
• Невысокие капитальные затраты на строительство • Менее жесткие требования к геологии участка • Простота транспортно-технологической схемы загрузки упаковок	• Влияние сезонных колебаний температур • Большие площади отчуждаемой территории • Сложная многослойная конструкция покрывающего экрана • Необходимость обслуживания покрывающего экрана • Чувствительность к внешним воздействиям (особенно на период загрузки)
Полузаглубленный	
• Невысокие капитальные затраты на строительство • Простота транспортно-технологической схемы загрузки упаковок • Меньшие габариты покрывающего экрана по сравнению с наземным ПЗРО	Те же недостатки, что и у наземного варианта, плюс • дополнительные объемы земляных работ; • возможность обводнения при колебании уровня грунтовых вод
Подземный	
• Устойчивость к внешним воздействиям • Отсутствие сезонных перепадов температур • Наличие геологического барьера безопасности • Небольшие площади отчуждаемой территории (наземной части ПЗРО) • Возможность размещения наиболее опасных РАО 3 класса, содержащих долгоживущие и слабосорбируемые радионуклиды (за счет наличия геологического барьера безопасности)	• Высокие капитальные затраты на строительство • Особые требования к геологии участка • Особые требования к спуско-подъемному оборудованию для РАО

Технико-экономический анализ ППЗРО

По данным [26], удельные капитальные затраты на захоронение 1 м^3 РАО в сооружениях наземных и полузаглубленных пунктов захоронения находятся на одном уровне. Удельные капитальные затраты на захоронение 1 м^3 РАО в подземных пунктах захоронения в среднем на 30% превышают затраты для наземных и полузаглубленных пунктов захоронения, при сопоставимых эксплуатационных затратах. Это связано с дополнительными расходами на проходческие работы и наземную инфраструктуру, обслуживающую подземную часть (надшахтные здания, сооружения для вентиляции подземных выработок и пр.).

Однако при подземном захоронении экономия средств может быть достигнута за счет сокращения периода мониторинга, более рационального использования наземных площадей, исключения расходов на создание и обслуживание покрывающего экрана наземных и заглубленных ППЗРО.

Сокращение затрат на захоронение РАО для всех типов ППЗРО может быть достигнуто за счет оптимизации всей системы ИББ, включая контейнеры и форму РАО. В работе [27] была проведена декомпозиция стоимости ППЗРО по каждому барьеру на основании анализа проектно-сметной документации ППЗРО в г. Озёрск, а также ряда других источников. Распределение затрат на каждый ИББ представлено в табл. 2. При этом учитывалась стоимость всего набора ИББ, включая форму отходов и контейнеры, затраты на которые несут поставщики РАО.

Таблица 2. Распределение затрат на приобретение/возведение/создание ИББ

ИББ	Процент от суммы всех затрат на приобретение / возведение / создание ИББ		Примечание
Форма отходов (матрица РАО)	5–15	100 %	Расходы поставщика РАО
Контейнер (НЗК, КМЗ, КРАД)	40–60		
Буфер	3–10		Расходы ФГУП «НО РАО»
Ограждающие конструкции (отсеки захоронения)	15–25		
Подстилающий экран	3–5		
Покрывающий экран	10–15		
Геологический барьер	–		–

Из табл. 2 следует, что наибольший вклад в стоимость всей системы ИББ вносят контейнеры и ограждающие конструкции — отсеки захоронения.

В этой связи для оптимизации расходов на сооружение ППЗРО целесообразно рассмотреть возможность сокращения затрат на контейнеры для захоронения РАО и на возведение отсеков захоронения.

Выбор контейнеров для захоронения РАО

Контейнеры в системе обращения с РАО имеют большое значение. Они могут выполнять роль первичной тары при формировании радиационной упаковки, соответствовать требованиям долговременного хранения, транспортирования РАО и являться защитным барьером в системе безопасности ППЗРО.

В проектах ППЗРО на площадках АО «УЭХК», ФГУП «ПО «Маяк» и АО «СХК» для захоронения РАО используются различные типы контейнеров. Часть из них представлена в табл. 3.

Таблица 3. Некоторые характеристики контейнеров, используемых для захоронения РАО

Наименование контейнера	Материал	Толщина барьера, мм	Герметичность	Срок сохранения изолирующей способности
Контейнер НЗК	Железобетон	100–150	Утечка воздуха – не более [27] 500 Па/л·с$^{-1}$	300 лет [28]
Контейнер КМЗ	Сталь	5	Нет данных	Нет данных
Контейнер КРАД	Сталь	4	Нет данных	Нет данных
Бочка 200 л закатная	Сталь	0,6–1,8	Негерметична	–

Выбор контейнера для захоронения РАО осуществляется с учетом характеристик отходов, особенностей конструкций ППЗРО, требований нормативной документации, в частности НП-093-14 [7].

Для формирования упаковок РАО 3 класса в полной мере отвечает требованиям НП-093-14 только сертифицированный защитный невозвратный железобетонный контейнер типа НЗК, для которого доказан и обоснован срок сохранения изолирующей способности, составляющий 300 лет [28].

Использование металлических контейнеров типа КРАД и КМЗ для захоронения РАО 3 и 4 классов в качестве невозвратных имеет преимущество перед железобетонными по

вместимости, однако в настоящее время оно не доказано по следующим причинам:

- их стоимость сопоставима с контейнерами НЗК и для захоронения РАО 4 класса является завышенной;
- для них отсутствует обоснование срока сохранения изолирующей способности на 100 лет в соответствии с требованиями НП-093-14 для упаковок 3 класса.

Вопрос применения контейнеров типа КРАД и КМЗ в качестве барьера безопасности необходимо рассматривать с учетом совокупности всех защитных барьеров системы захоронения.

Для упаковок РАО класса 4 в НП-093-14 содержится минимальный набор требований:

- ограничение активности радионуклидов в упаковке;
- ограничение мощности поглощенной дозы на поверхности упаковки (не более 2 мГр/ч);
- ограничение допустимой величины нефиксированного поверхностного загрязнения;
- способность упаковки сохранять изолирующую функцию до размещения на захоронение.

Набору этих требований отвечают различные общепромышленные упаковки, включая бочки 200 л, по ГОСТ 13950-91 [29]. Однако для целей внеобъектового транспортирования отходов необходимо соответствие упаковок требованиям НП-053-16 [30]. Это приводит к тому, что для транспортировки и захоронения НАО, наряду с экономичными общепромышленными упаковками, используются дорогостоящие специализированные контейнеры для обращения с РАО, имеющие необходимую сертификацию.

Для решения этих проблем, одновременно с использованием транспортных оборотных контейнеров для доставки РАО, целесообразно рассмотреть вариант применения экономичных полимерных невозвратных контейнеров, обеспечивающих возможность герметичного соединения крышка-корпус и сертифицированных как упаковка IP-2 по НП-053-16.

Рис. 5. Полимерная упаковка типа IP-2 для низкоактивных ОИОС (слева) и полимерный вкладыш в контейнер НЗК для среднеактивных ОИОС (справа) [31]

Полимерные контейнеры широко используются в промышленности. Их применение для захоронения РАО (в частности, низкоактивных отработанных ионообменных смол — ОИОС) уже предлагалось в [31] (см. рис. 5).

Роль ограждающих конструкций (отсеков захоронения)

В оценке долговременной безопасности (ОДБ) ППЗРО на площадках АО «УЭХК», ФГУП «ПО «Маяк» и АО «СХК» консервативно принято, что миграция радионуклидов через бетонные стенки отсеков захоронения в период времени до 100 лет возможна за счет процесса диффузии, от 100 до 300 лет — диффузии и фильтрации, а свыше 300 лет определяется преимущественно фильтрацией. Это соответствует сроку службы отсеков, который в проектной документации (ПД) составляет 100 лет в соответствии с [32, 33, 34].

Данная модель миграции применима только при условии герметичности отсеков захоронения в течение этого срока, но такие требования в ПД не предъявляются. Защита контейнеров от воды обеспечивается за счет других ИББ: гидроизолирующих материалов покрывающего и подстилающего экранов, а также буферных материалов.

Таким образом, для ППЗРО на площадках АО «УЭХК», ФГУП «ПО «Маяк» и АО «СХК» отсеки захоронения выполняют скорее конструктивную функцию — позволяют упорядоченно разместить упаковки с РАО, предотвращают обрушение грунта на упаковки, препятствуют внешним воздействиям.

Опыт эксплуатации пунктов долговременного хранения РАО траншейного типа [35] показал, что наиболее вероятный механизм делокализации РАО — нарушение гидроизоляции в результате многолетних циклов промерзания и оттаивания покрывающего экрана, обводнение упаковок с отходами, выщелачивание радионуклидов и выход радиоактивной воды через нарушения в стенках отсеков в приконтурную зону хранилищ.

В связи с этим расходы на возведение отсеков захоронения, которые сами по себе не являются герметичными, не в полной мере соответствуют их функции с точки зрения обеспечения безопасности.

Также открытым является вопрос использования бетонных отсеков для совместного захоронения РАО 3 класса (20 % объема) и 4 класса (80 % объема). Следует учитывать, что среди отходов 4 класса имеется значительная

часть, относящаяся к очень низкоактивным РАО. Дифференцированный подход к захоронению отходов разных классов, существенно различающихся по потенциальной опасности, позволит снизить затраты на их захоронение в ППЗРО.

Выбор глинистых материалов для ИББ ППЗРО

В связи с тем, что на покрывающий и подстилающий экраны, а также на буферный материал возлагаются основные требования по гидроизоляции упаковок РАО, а фильтрация воды через их массив — один из основных механизмов миграции радионуклидов, роль глинистых материалов, используемых для гидроизоляции ППЗРО, является весьма важной в системе ИББ. Это обуславливает активную научную дискуссию по определению требований к глинистым материалам [36—38].

За последние годы разработаны материалы на основе бентонита, специально предназначенные для консервации радиационно опасных объектов и захоронения РАО [39—41], ведутся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по определению оптимальных характеристик буферных материалов.

В проектах ППЗРО на площадках АО «УЭХК», ФГУП «ПО «Маяк» и АО «СХК» используются различные глинистые материалы (так называемая жирная мятая глина, смесь бентонита и каолина, цементно-бентонитовая смесь, бентонитовый глинопорошок). Сравнительный анализ данных материалов выполнялся в [37].

По этим данным, с учетом уникальной способности к самозалечиванию, бентонит или смеси на его основе являются наиболее перспективными материалами для гидроизоляции ППЗРО. Дополнительно отметим, что выбор материала должен быть осуществлен на основании вариантного рассмотрения и критерия сравнения, что является предметом отдельного комплексного исследования.

Обсуждение результатов

В настоящей статье выполнен краткий анализ технических решений по захоронению кондиционированных РАО 3 и 4 классов в наземных, полузаглубленных и подземных ППЗРО, эксплуатируемых и проектируемых в России и зарубежных странах.

Для РАО 3 класса оптимальным решением является создание наземных и подземных ПЗРО, для отходов 4 класса — наземных.

Создание полузаглубленных ПЗРО для отходов 3 и 4 классов возможно при размещении на слабопроницаемых (глины) или хорошо проницаемых (пески) грунтах в засушливых районах с низким уровнем грунтовых вод.

Для любых типов ПЗРО целесообразно раздельное захоронение РАО 3 и 4 классов с различающимся набором защитных барьеров, которые должны выбираться и обосновываться в проектной документации с учетом характеристик упаковок и результатов инженерных изысканий площадки размещения ППЗРО.

Для отходов 3 класса необходимо использовать железобетонные контейнеры с металлическими или полимерными вставками, которые отвечают правилам безопасности транспортирования радиоактивных материалов и выполняют функции элементов системы безопасности ППЗРО.

Для отходов 4 класса целесообразно применять полимерные контейнеры в габаритах КРАД, КМ3 и НЗК или стандартных бочек объемом 0,2 м^3 (взамен дорогостоящих металлических), отвечающих требованиям к упаковкам типа IP-2.

В качестве материалов для гидроизоляции ППЗРО следует использовать материалы на основе бентонита. Требования к их составу и характеристикам необходимо определять в рамках проведения специальных НИОКР.

Для унификации проектных решений по приповерхностным ПЗРО целесообразно разработать типовые конструкции наземных, полузаглубленных и подземных ПЗРО и критерии выбора их типа, которые могут быть положены в основу при подготовке проектной документации.

Литература

1. Материалы обоснования лицензии на эксплуатацию первой очереди стационарного объекта, предназначенного для захоронения радиоактивных отходов — приповерхностного пункта захоронения твердых радиоактивных отходов, отделения «Новоуральское» филиала «Северский» ФГУП «НО РАО» (включая материалы оценки воздействия на окружающую среду). — URL: http://www norao.ru/ecology/mol/ (дата обращения 10.04.2021).

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

3. Материалы обоснования лицензии на размещение и сооружение приповерхностного пункта захоронения твердых радиоактивных отходов 3 и 4 классов, Челябинская область, Озерский

городской округ. — URL: http://www norao.ru/ecology/mol/ (дата обращения 10.04.2021).

4. Материалы обоснования лицензии на размещение и сооружение приповерхностного пункта захоронения твердых радиоактивных отходов 3 и 4 классов, Томская область, городской округ, ЗАТО Северск. — URL: http://www.norao.ru/ecology/mol/ (дата обращения 10.04.2021).

5. 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: Постановление Правительства Рос. Федерации от 19.10.2012 № 1069 // Собр. законодательства Рос. Федерации. 2012. № 44. Ст. 6017.

6. Классификация радиоактивных отходов : Нормы МАГАТЭ по безопасности. Руководство по безопасности № GSG-1.

7. НП-093-14. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения.

8. НП-055-14. Захоронение радиоактивных отходов, принципы, критерии и основные требования безопасности.

9. НП-069-14. Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов, требования безопасности.

10. НП-016-05. Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла (ОПБ ОЯТЦ) с изменениями, внесенными приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 28.07.2014 № 326, зарегистрированным Минюстом Российской Федерации 28.08.2014 № 33890.

11. НП-031-01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций.

12. СП 2.6.1.2612-10 (ОСПОРБ-99/2010). Основные санитарные правила и нормативы обеспечения радиационной безопасности.

13. СанПиН 2.6.1.2523-09 (НРБ-99-2009). Нормы радиационной безопасности.

14. РБ-117-16. Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов.

15. НП-100-17. Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов.

16. https://gnssn.iaea.org/RTWS/general/Shared%20Documents/Waste%20Management/Feb%202015%20WS%20on%20LLW%20disposal/Day%202)%20Hungary.pdf (дата обращения 01.09.2021).

17. *McKenney D. E.* Hanford's Radioactive Mixed Waste Disposal Facility // Fifth international conference on radioactive waste management and environmental remediation. Berlin (Germany), 3—9 Sep. 1995.

18. Planning and operation of low level waste disposal facilities / International Symposium on experience in the planning and operation of low level waste disposal facilities. Vienna, 17—21 June 1996.

19. http://www.nrwdi.org.za (дата обращения 01.07.2021).

20. *Dutler M., Vervialle J. P., Charton P.* Present issues for Centre de la Manche disposal facility // TOPSEAL 2006, Transactions. European Nuclear.

21. *Сорокин В. Т., Павлов Д. И.* Технологии окончательной изоляции радиоактивных отходов: европейский опыт и тенденции // Радиоактивные отходы. 2018. № 4 (5). С. 24—32.

22. *Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Капырин И. В.* Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО. — М. : Комтехпринт, 2015. 208 с.

23. *Бейгул В. П., Павлов Д. И.* Сравнение альтернативных схем захоронения РАО класса 1 в составе ПГЗРО // Атомная энергия 2.0. — URL: https://www.atomic-energy.ru/articles/2019/11/12/98998 (дата обращения 10.04.2021).

24. *Дорофеев А. Н., Большов Л. А., Линге И. И. и др.* Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 32—41.

25. *Сорокин В. Т., Павлов Д. И.* Технические аспекты создания регионального пункта захоронения радиоактивных отходов. Ретроспектива подходов // Радиоактивные отходы. 2018. № 1 (2). С. 15—20.

26. Low-Level Radioactive Waste Repositories: An Analysis of Costs — Nuclear Energy Agency, OECD, 1999.

27. *Павлов Д. И., Ильина О. А.* О системном подходе к выбору барьеров безопасности для захоронения РАО классов 3 и 4 // Радиоактивные отходы. 2020. № 3 (12). С. 54—65. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-54-65.

28. *Гатауллин Р. М., Давиденко Н. Н., Свиридов Н. В., Сорокин В. Т. и др.* Контейнеры для радиоактивных отходов низкого и среднего уровней активности: монография / Под ред. Сорокина В. Т. — М. : Логос, 2012. 255 с.

29. ГОСТ 13950-91. Бочки стальные сварные и закатные с гофрами на корпусе.

30. НП-053-16. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов.

31. *Сорокин В. Т., Прохоров Н. А., Павлов Д. И.* Технология кондиционирования отработавших ионообменных смол методом термовакуумной сушки // Радиоактивные отходы. 2021. № 2 (15). С. 39—48. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-2-39-48.

32. СП 63.13.330-2012. Бетонные и железобетонные конструкции.
33. ГОСТ 27751-2014. Надёжность строительных конструкций и оснований.
34. ГОСТ 31384-2008. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии.
35. *Прозоров Л. Б.* Оценка состояния хранилищ РАО приповерхностного типа // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2011. № 2.
36. *Мартынов К. В., Захарова Е. В., Дорофеев А. Н. и др.* Использование глинистых материалов для создания защитных барьеров радиационно опасных объектов // Радиоактивные отходы. 2020. № 3 (12). С. 39—53. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-39-53.
37. *Ильина О. А., Крупская В. В., Винокуров С. Е., Калмыков С. Н.* Современное состояние в разработках и использовании глинистых материалов в качестве инженерных барьеров безопасности на объектах консервации и захоронения РАО в России // Радиоактивные отходы. 2019. № 4 (9). С. 71—84. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-71-84.
38. *Крупская В. В., Бирюков Д. В., Белоусов П. Е. и др.* Применение природных глинистых материалов для повышения уровня ядерной и радиационной безопасности объектов ядерного наследия // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 30—43.
39. ТУ 08.12.22-302-01424676-2020. Порошок бентонитовый для создания инженерных барьеров безопасности при консервации и захоронении радиоактивных отходов, ядерных и радиационно опасных объектов. Технические условия.
40. ТУ 08.12.22-301-01424676-2020. Глина бентонитовая дробленая для создания инженерных барьеров безопасности при консервации и захоронении радиоактивных отходов, ядерных и радиационно опасных объектов. Технические условия.
41. ТУ 08.12.22-004-87299967-2020. Материалы геосинтетические бентонитовые рулонные для создания инженерных барьеров безопасности при консервации и захоронении радиоактивных отходов, ядерных и радиационно опасных объектов. Технические условия.

Информация об авторах

Павлов Дмитрий Игоревич, начальник технологического отдела по обращению с РАО, Санкт-Петербургский филиал АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» — «ВНИПИЭТ» (197183, Санкт-Петербург, ул. Дибуновская, д. 55), e-mail: dipavlov@eleron.ru.

Сорокин Валерий Трофимович, доктор технических наук, главный технолог, АО «Атомэнергопроект» (197183, Санкт-Петербург, ул. Савушкина, д. 82, лит. А), e-mail: vsorokin@atomproekt.com.

Баринов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: barinov@ibrae.ac.ru.

Дёмин Анатолий Викторович, главный эксперт, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: demin.122@yandex.ru.

Сыченко Денис Владимирович, руководитель проекта, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: sychenko.den@ibrae.ac.ru.

Библиографическое описание статьи

Павлов Д. И., Сорокин В. Т., Баринов А. С., Дёмин А. В., Сыченко Д. В. Научно-технические и проектные основы создания конструкций приповерхностных пунктов захоронения низко- и среднеактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2021. № 4 (17). С. 65—77. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-4-65-77.

SCIENTIFIC AND DESIGN ASPECTS IN THE DEVELOPMENT OF NEAR-SURFACE DISPOSAL FACILITIES FOR LOW-AND INTERMEDIATE-LEVEL WASTE

Pavlov D. I.[1], Sorokin V. T.[2], Barinov A. S.[3], Demin A. V.[3], Sychenko D. V.[3]

[1]**Saint-Petersburg branch of JSC FCS&HT "SNPO "Eleron" — "VNIPIET", Saint-Petersburg, Russia**

[2]**JSC Atomenergoproekt, Saint-Petersburg, Russia**

[3]**Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia**

Article received on October 01, 2021

The article presents various design options for the development of near-surface radioactive waste disposal facilities and materials constituting to the engineered safety barriers. It considers the cost ratios associated with the establishment of engineered safety barrier systems. The paper presents some proposals regarding the decision-making on particular types and designs of near-surface radioactive waste disposal facilities aimed at increasing the safety and reducing the RW disposal costs.

Keywords: *radioactive waste, near-surface radioactive waste disposal facilities, engineered safety barriers, radioactive waste disposal containers, the cost of radioactive waste disposal, buffer materials, radioactive waste disposal compartments.*

References

1. *Materialy obosnovaniya litsenzii na ehkspluatatsiyu pervoi ocheredi statsionarnogo ob"ekta, prednaznachennogo dlya zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov — pripoverkhnostnogo punkta zakhoroneniya tverdykh radioaktivnykh otkhodov, otdeleniya "Novoural'skoe" filiala "Severskiy" FGUP "NO RAO"* [Materials of a license application for the construction (reconstruction) of a near-surface radioactive waste disposal facility for solid radioactive waste, Novouralsk department of FSUE NO RAO's Seversk branch] — URL: http://www.norao.ru/ecology/mol/ (accessed on 20.04.2021).

2. *Federal'nyi zakon ot 11 iyulya 2011 goda № 190-FZ "Ob obrashchenii s radioaktivnymi otkhodami i o vnesenii izmenenii v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossiiskoi FederatsiI"* [Federal Law No. 190-FZ of July 11, 2011 On the Radioactive Waste Management and Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation].

3. *Materialy obosnovaniya litsenzii na razmeshchenie i sooruzhenie pripoverkhnostnogo punkta zakhoroneniya tverdykh radioaktivnykh otkhodov 3 i 4 klassov, Chelyabinskaya oblast', Ozerskii gorodskoi okrug* [Materials of a license application for the siting and construction of a surface disposal facility for solid radioactive waste of classes 3 and 4, Chelyabinsk Region, Ozyorsk City District]. — URL: http://www.norao.ru/ecology/mol/ (accessed on 20.04.2021).

4. Materials of a license application for the siting and construction of a surface disposal facility for solid radioactive waste of classes 3 and 4, Tomsk Region, urban district ZATO Seversk. — URL: http://www.norao.ru/ecology/mol/ (accessed on 20.04.2021).

5. *O kriteriyakh otneseniya tverdykh, zhidkikh i gazoobraznykh otkhodov k radioaktivnym otkhodam, kriteriyakh otneseniya radioaktivnykh otkhodov k osobym radioaktivnym otkhodam i k udalyaemym radioaktivnym otkhodam i kriteriyakh klassifikatsii udalyaemykh radioaktivnykh otkhodov* [On criteria used to categorize solid, liquid and gaseous waste as radioactive waste, criteria used to categorize radioactive waste either as special (non-retrievable) radioactive waste or retrievable radioactive waste and classification criteria for retrievable radioactive waste]. Resolution of the Government of the Russian Federation No. 1069 of 19.10.2012. Collection of the legislation of Russian Federation, 2012, no. 44, art. 6017.

6. Classification of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards. General Safety Guide GSG-1.

7. NP-093-14. *Kriterii priemlemosti radioaktivnykh otkhodov dlya zakhoroneniya* [Acceptance criteria for radioactive waste disposal].

8. NP-055-14. *Zakhoronenie radioaktivnykh otkhodov, printsipy, kriterii i osnovnye trebovaniya bezopasnosti* [Disposal of radioactive waste. Principles, criteria and basic safety requirements].

9. NP-069-14. *Pripoverkhnostnoe zakhoronenie radioaktivnykh otkhodov, trebovaniya bezopasnosti* [Near-surface disposal of radioactive waste. Safety requirements].

10. NP-016-05. *Obshchie polozheniya obespecheniya bezopasnosti ob"ektov yadernogo toplivnogo tsikla (OPB OYATTS) s izmeneniyami, vnesennymi prikazom Federal'noi sluzhby po ehkologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 28.07.2014 No. 326, zaregistrirovannym Minyustom Rossiiskoi Federatsii 28.08.2014 No. 33890* [General Safety Provisions for Nuclear Fuel Cycle Facilities as amended by Order № 326 of the Federal Service for

Environmental, Technological and Nuclear Supervision of July 28, 2014, registered by the Ministry of Justice of the Russian Federation on August 28, 2014 No. 33890].
11. NP-031-01. *Normy proektirovaniya seismostoikikh atomnykh stantsii* [Standards for the design development of earthquake-resistant nuclear power plants].
12. SP 2.6.1.2612-10 (OSPORB-99/2010). *Osnovnye sanitarnye pravila i normativy obespecheniya radiatsionnoi bezopasnosti* [Basic sanitary rules and regulations on radiation safety].
13. SanPiN 2.6.1.2523-09 (NRB-99-2009). *Normy radiatsionnoi bezopasnosti* [Radiation safety standards].
14. RB-117-16. *Otsenka dolgovremennoi bezopasnosti punktov pripoverkhnostnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov* [Long-term safety assessment of near-surface radioactive waste disposal facilities].
15. NP-100-17. *Trebovaniya k sostavu i soderzhaniyu otcheta po obosnovaniyu bezopasnosti punktov zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov* [Requirements on the structure and the content of a safety analysis reports for radioactive waste disposal facilities].
16. https://gnssn.iaea.org/RTWS/general/Shared%20Documents/Waste%20Management/Feb%202015%20WS%20on%20LLW%20disposal/Day%202)%20Hungary.pdf (accessed on 01.09.2021).
17. McKenney D. E. Hanford's Radioactive Mixed Waste Disposal Facility. Fifth international conference on radioactive waste management and environmental remediation, Berlin (Germany), 3—9 Sep. 1995.
18. Planning and operation of low level waste disposal facilities. International Symposium on experience in the planning and operation of low level waste disposal facilities, Vienna, 17—21 June 1996.
19. http://www.nrwdi.org.za (accessed on 20.04.2021).
20. Dutler M., Vervialle J. P., Charton P. Present issues for Centre de la Manche disposal facility. TOPSEAL 2006, Transactions. European Nuclear.
21. Sorokin V. T., Pavlov D. I. Tekhnologii okonchatel'noi izolyatsii radioaktivnykh otkhodov: evropeiskii opyt i tendentsii [Technologies of radioactive Waste disposal: European experience and trends]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2018, no. 4 (5), pp. 24—32.
22. Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Kapyrin I. V. *Obzor zarubezhnykh praktik zakhoroneniya OYAT i RAO* [The overview of foreign practices of radioactive waste and spent fuel disposal]. Moscow, Komtekhprint Publ., 2015. 208 p.
23. Beigul V. P., Pavlov D. I. Sravnenie al'ternativnykh skhem zakhoroneniya RAO klassa 1 v sostave PGZRO [Comparison of alternative layouts for the disposal of class 1 radioactive waste in a deep disposal facility]. *Atomic Energy 2.0.* — URL: https://www.atomic-energy.ru/articles/2019/11/12/98998 (accessed on April 20, 2021).
24. Dorofeev A. N., Bol'shov L. A., Linge I. I. et al. Strategicheskii master-plan issledovanii v obosnovanie bezopasnosti sooruzheniya, ehkspluatatsii i zakrytiya punkta glubinnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov [Strategic Master Plan for R&D Demonstrating the Safety of Construction, Operation and Closure of a Deep Geological Disposal Facility for Radioactive Waste]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2017, no. 1, pp. 32—41.
25. Sorokin V. T., Pavlov D. I. Tekhnicheskie aspekty sozdaniya regional'nogo punkta zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov. Retrospektiva podkhodov [Technical Aspects of Creating a Regional Disposal Facility for Radioactive Waste. Retrospective of the Approaches]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2018, no. 1 (2), pp. 15—20.
26. Low-Level Radioactive Waste Repositories: An Analysis of Costs — Nuclear Energy Agency, OECD, 1999.
27. Pavlov D. I., Il'ina O. A. O sistemnom podkhode k vyboru bar'erov bezopasnosti dlya zakhoroneniya RAO klassov 3 i 4 [On a System Approach to the Selection of Safety Barriers for the Disposal of Radioactive Waste Class 3 and 4]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2020, no. 3 (12), pp. 54—65. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-54-65.
28. Gataullin R. M., Davidenko N. N., Sviridov N. V., Sorokin V. T. et al. *Konteinery dlya radioaktivnykh otkhodov nizkogo i srednego urovnei aktivnosti* [Containers for low- and intermediate-level waste]. Edited by Sorokin V. T. Moscow, Logos Publ., 2012. 255 p.
29. GOST 13950-91. *Bochki stal'nye svarnye i zakatnye s goframi na korpuse* [Steel barrels welded and rolled with corrugations on the body].
30. NP-053-16. *Pravila bezopasnosti pri transportirovanii radioaktivnykh materialov* [Safety guide for the transportation of radioactive materials].
31. Sorokin V. T., Prokhorov N. A., Pavlov D. I. Tekhnologiya konditsionirovaniya otrabotavshikh ionoobmennykh smol metodom termovakuumnoi sushki [Spent Ion Exchange Resin Conditioning Technology Based on Thermal Vacuum Drying Method]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2021, no. 2 (15), pp. 39—48. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-2-39-48.
32. SP 63.13.330-2012. *Betonnye i zhelezobetonnye konstruktsii* [Concrete and Reinforced Concrete Structures].
33. GOST 27751-2014. *Nadezhnost' stroitel'nykh konstruktsii i osnovanii* [Reliability of Building Structures and Foundations].
34. GOST 31384-2008. *Zashchita betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsii ot korrozii* [Protection of

Concrete and Reinforced Concrete Structures from Corrosion].
35. Prozorov L. B. Otsenka sostoyaniya khranilishch RAO pripoverkhnostnogo tipa [Assessing the state of near-surface RW storage facilities]. *Bezopasnost' yadernykh tekhnologii i okruzhayushchei sredy — Safety of nuclear technologies and the environment,* 2011, no. 2.
36. Martynov K. V., Zakharova E. V., Dorofeev A. N. et al. Ispol'zovanie glinistykh materialov dlya sozdaniya zashchitnykh bar'erov radiatsionno opasnykh ob"ektov [Use of Clay Materials in the Construction of Protective Barriers at Radiation Hazardous Facilities]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2020, no. 3 (12), pp. 39—53. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-39-53.
37. Il'ina O. A., Krupskaya V. V., Vinokurov S. E., Kalmykov S. N. Sovremennoe sostoyanie v razrabotkakh i ispol'zovanii glinistykh materialov v kachestve inzhenernykh bar'erov bezopasnosti na ob"ektakh konservatsii i zakhoroneniya RAO v Rossii [State-of-Art in the Development and Use of Clay Materials as Engineered Safety Barriers at Radioactive Waste Conservation and Disposal Facilities in Russia]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2019, no. 4 (9), pp. 71—84. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-71-84.
38. Krupskaya V. V., Biryukov D. V., Belousov P. E. et al. Primenenie prirodnykh glinistykh materialov dlya povysheniya urovnya yadernoi i radiatsionnoi bezopasnosti ob"ektov yadernogo naslediya [The use of natural clay materials to increase the nuclear and radiation safety level of nuclear legacy facilities]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2018, no. 2 (3), pp. 30—43.
39. TU 08.12.22-302-01424676-2020. *Poroshok bentonitovyi dlya sozdaniya inzhenernykh bar'erov bezopasnosti pri konservatsii i zakhoronenii radioaktivnykh otkhodov, yadernykh i radiatsionno opasnykh ob"ektov. Tekhnicheskie usloviya* [The use of bentonite powder in the construction of engineered safety barriers for the conservation and disposal of radioactive waste, nuclear and radiation-hazardous facilities. Engineering specifications].
40. TU 08.12.22-301-01424676-2020. *Glina bentonitovaya droblenaya dlya sozdaniya inzhenernykh bar'erov bezopasnosti pri konservatsii i zakhoronenii Radioaktivnykh otkhodov, yadernykh i radiatsionno opasnykh ob"ektov. Tekhnicheskie usloviya* [The use of bentonite crushed clay in the construction of engineered safety barriers for the conservation and disposal of radioactive waste, nuclear and radiation-hazardous facilities. Engineering specifications].
41. TU 08.12.22-004-87299967-2020. *Materialy geosinteticheskie bentonitovye rulonnye dlya sozdaniya inzhenernykh bar'erov bezopasnosti pri konservatsii i zakhoronenii radioaktivnykh otkhodov, yadernykh i radiatsionno opasnykh ob"ektov. Tekhnicheskie usloviya* [The use of geosynthetic bentonite roll materials in the construction of engineered safety barriers for the conservation and disposal of radioactive waste, nuclear and radiation-hazardous facilities. Engineering specifications].

Information about the authors

Pavlov Dmitriy Igorevich, head of radioactive waste management department, Saint-Petersburg branch of JSC FCS&HT "SNPO "Eleron" — "VNIPIET" (55, Dibunovskaya st., Saint-Petersburg, 197183, Russia), e-mail: dipavlov@eleron.ru.

Sorokin Valery Trofimovich, Ph.D, chief technology, JSC Atomenergoproekt (82-A, Savushkina st., Saint-Petersburg, 197183, Russia), e-mail: vsorokin@atomproekt.com.

Barinov Aleksandr Sergeevich, Ph.D, senior researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: barinov@ibrae.ac.ru.

Demin Anatoly Viktorovich, chief expert, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: demin.122@yandex.ru.

Sychenko Denis Vladimirovich, project manager, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: sychenko.den@ibrae.ac.ru.

Bibliographic description

Pavlov D. I., Sorokin V. T., Barinov A. S., Demin A. V., Sychenko D. V. Scientific and Design Aspects in the Development of Near-Surface Disposal Facilities for Low-And Intermediate-Level Waste. *Radioactive Waste,* 2021, no. 4 (17), pp. 65—77. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-4-65-77. (In Russian).