

ВАРИАНТЫ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СООРУЖЕНИЙ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ БЕЛОРУССКОЙ АЭС

М. Л. Жемжуров¹, Д. И. Павлов², А. М. Жемжуров¹

¹ГНУ «ОИЭЯИ — Сосны» НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

²АО «Компания инжиниринга и строительства «ИСТОК», Санкт-Петербург, Россия

Статья поступила в редакцию 2 сентября 2024 г.

Рассмотрена проблематика нормативно-правового регулирования в области обращения с радиоактивными отходами. Проведен анализ зарубежного опыта и тенденций создания пунктов приповерхностного захоронения РАО. Представлены результаты выполненных разработок по возможным конструктивным решениям для сооружений приповерхностного захоронения радиоактивных отходов Белорусской АЭС.

Ключевые слова: атомная электростанция, радиоактивные отходы, захоронение радиоактивных отходов, подстилающие экраны, миграция радионуклидов.

В Республике Беларусь введены в промышленную эксплуатацию оба энергоблока БелАЭС с реактором типа ВВЭР-1200, и основным источником образования радиоактивных отходов (РАО) в стране становится атомная электростанция. Образующиеся в результате ее эксплуатации твердые радиоактивные отходы (ТРО) всех категорий размещаются в кондиционированном виде в пристанционных хранилищах. Высокоактивные РАО (ВАО) планируется хранить на АЭС в течение всего срока ее службы, а объемы временного хранения конечных форм твердых очень низкоактивных (ОНРАО), 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 расположения упаковок РАО обеспечивает их извлечение из отсеков

хранилищ для контроля и транспортирования в другое место хранения или захоронения.

Стратегия обращения с РАО Белорусской АЭС [1] предусматривает проработку вопросов создания системы захоронения РАО, образующихся в результате ее эксплуатации и вывода из эксплуатации. Основными задачами указанной Стратегии являются:

- выполнение комплекса подготовительных работ и осуществление сооружения по очередям пункта захоронения ОНРАО, НАО и САО с возможностью его расширения после вывода атомной электростанции из эксплуатации;
- проработка вопроса о строительстве пункта захоронения ВАО в глубокой геологической формации.

В [2] обобщены результаты разработок по технической концепции приповерхностного пункта захоронения РАО (ПЗРО) категорий ОНРАО, НАО и короткоживущих САО (КЖ САО),

направленных на решение первой указанной выше задачи и выполненных в 2016—2018 годах в ГНУ «ОИЭЯИ — Сосны» с привлечением Санкт-Петербургского филиала АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» — ВНИПИЭТ» — ведущей российской организации в области проектирования объектов изоляции РАО Госкорпорации «Росатом».

В [3], [4] изложены результаты направленных на решение второй задачи проработок вариантов создания пункта глубинного захоронения РАО (ПЗРО) для ВАО и долгоживущих САО (ДЖ САО), подлежащих глубинному захоронению при выводе из эксплуатации БелАЭС. Эти научно-исследовательские работы (НИР) выполнялись в 2019—2020 годах в ГНУ «ОИЭЯИ — Сосны» также в кооперации с Санкт-Петербургским филиалом АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» — ВНИПИЭТ». В рамках НИР были проанализированы виды и объемы ВАО и ДЖ САО, образующихся в результате эксплуатации БелАЭС, предложены приемлемые варианты технологий их кондиционирования и промежуточного хранения после вывода АЭС из эксплуатации и концептуальные решения по созданию ПЗРО.

Участие в этих НИР компетентной организации страны — поставщика ядерных технологий, имеющей большой опыт проектирования объектов обращения с РАО, обеспечило высокую степень детализации разработанных технических концепций ПЗРО и ПЗРО.

Стратегией обращения с радиоактивными отходами [5], утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 15.02.2023 № 128, предусмотрено сооружение централизованного пункта захоронения модульного типа для всех видов имеющихся и образуемых в стране РАО. До 2030 года планируется разработка проектной документации на централизованный ПЗРО, а также сооружение и ввод в эксплуатацию его первой очереди.

В рамках реализации мероприятий Стратегии [5] в краткосрочной перспективе необходимо, в частности, решить следующие задачи:

- провести комплекс изыскательских работ по выбору площадки для строительства ПЗРО;
- продолжить работу по совершенствованию нормативных правовых актов, в том числе технических, в области обращения с РАО;
- уточнить техническую концепцию ПЗРО БелАЭС с учетом необходимости обеспечения возможности долговременного хранения и захоронения в нем институциональных РАО.

Следует ожидать, что сооружения захоронения РАО БелАЭС будут одним из модулей, формирующих централизованный пункт захоронения.

Согласно методологическому подходу МАГАТЭ, разработка концептуального проекта ПЗРО является начальным этапом его проектирования [6].

В настоящей статье на основе анализа нормативных требований к способам захоронения РАО и существующей практики в разных странах даны предложения по совершенствованию концептуальных технических решений для сооружений приповерхностного захоронения РАО, образующихся в результате эксплуатации БелАЭС.

Нормативная база

В Стратегии [5] отмечено, что для поддержания в актуальном состоянии национальных требований в области обращения с РАО необходимо на системной основе продолжить мониторинг изменений законодательства развитых стран, имеющих опыт обращения с разными типами и категориями отходов.

Основополагающий элемент в этой сфере деятельности — это классификация РАО, которая является основой для формирования исходных данных при проектировании ПЗРО, включая разработку критериев приемлемости радиоактивных отходов для захоронения.

По мнению авторов, существенным прогрессом в развитии нормативной базы Республики Беларусь в области обращения с РАО стало введение в действие в 2017 году их классификации для обеспечения долгосрочной безопасности при захоронении, которая была установлена в приложении к Нормам и правилам по обеспечению ядерной и радиационной безопасности [7] в ред. постановления МЧС от 24.07.2017 № 33. Она была гармонизирована с действовавшей тогда российской классификацией удаляемых радиоактивных отходов [8], что позволяло 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. ТРО подразделялись на четыре класса, аналогичные классам 1—4 по российской классификации [8]. Действовавшая до 14 октября 2023 года классификация основывалась на делении подлежащих передаче на захоронение ТРО на классы исходя из удельной активности (далее — УА) групп радионуклидов (третий, бета-излучающие, кроме трития, альфа-излучающие, исключая трансурановые, трансурановые) и периода их полураспада — более или менее 31 года (в настоящей статье долгоживущие (ДЖ) и короткоживущие (КЖ) соответственно).

Класс ТРО определялся их категорией (ОНРАО, НАО, САО и ВАО), в соответствии с табл. 1 приложения 2 СПОРО-2015 [9], и периодом полураспада содержащихся радионуклидов — КЖ, ДЖ. Классификация устанавливала прямую связь с вариантами захоронения ТРО: для каждого класса был определен свой способ захоронения (глубинное или приповерхностное) и вид ПЗРО (табл. 1).

Таблица 1. Связь между классом и вариантом захоронения ТРО согласно [7] в ред. постановления МЧС № 33 от 24.07.2017

Класс ТРО	Категория ТРО, передаваемых на захоронение	Вид ПЗРО
Класс 1	Тепловыделяющие ВАО	Пункт глубинного захоронения РАО с предварительной выдержкой в целях снижения их тепловыделения
Класс 2	ВАО и ДЖ САО	Пункт глубинного захоронения РАО без предварительной выдержки в целях снижения их тепловыделения
Класс 3	КЖ САО и ДЖ НАО	Пункт приповерхностного захоронения РАО, размещаемый на глубине до 100 метров
Класс 4	КЖ НАО и ОНРАО	Пункт приповерхностного захоронения РАО, размещаемый на одном уровне с поверхностью земли

Обязательным условием являлось соответствие ТРО критериям приемлемости для захоронения, установленным в нормативном документе [10]. Важно отметить, что в рассматриваемой редакции [7] было указано: УА каждого значимого радионуклида для захоронения в ПЗРО должны определяться в проекте на основе оценки безопасности и могут отличаться от установленных для классов значений, что соответствует рекомендациям МАГАТЭ [11].

Согласно статье 45 Закона Республики Беларусь № 198-З от 18 июня 2019 г. «О радиационной безопасности» порядок и критерии классификации РАО устанавливаются Советом Министров Республики Беларусь. Соответственно, Положением о порядке и критериях отнесения радиоактивных отходов к классам радиационной опасности, утвержденным постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 21 августа 2020 г. № 497 [12], зафиксировано разделение ТРО на четыре класса: I — наивысшей опасности; II — высокой опасности; III — опасные; IV — потенциально опасные. Критерием отнесения к указанным классам является категория ТРО: к I классу — ВАО, ко II — САО, к III — НАО и к IV — ОНРАО. Указанные в [12] уровни

УА отнесения ТРО к категориям соответствуют установленным в [9].

В новой редакции [7] (в ред. постановления МЧС № 36 от 05.06.2023) приложение, определявшее классификацию РАО для целей захоронения в предыдущей версии, исключено. Выбор способа захоронения (приповерхностное или глубинное) устанавливается с учетом классификации РАО по радиационной опасности, приведенной в [12], а также периода полураспада содержащихся в них радионуклидов и тепловыделения. Связь между видом ПЗРО и классом, а также категорией ТРО представлена в табл. 2.

Таблица 2. Связь между видом ПЗРО и классом, а также категорией ТРО согласно [7] в ред. постановления МЧС № 36 от 05.06.2023

Вид ПЗРО	Класс ТРО	Категория ТРО
Пункт глубинного захоронения РАО с предварительной выдержкой в целях снижения их тепловыделения	I	ВАО
Пункт глубинного захоронения РАО без предварительной выдержки в целях снижения их тепловыделения	ДЖ II	ДЖ САО
Пункт приповерхностного захоронения РАО, размещаемый на глубине до 100 метров	КЖ II и ДЖ III	КЖ САО и ДЖ НАО
Пункт приповерхностного захоронения РАО, размещаемый на одном уровне с поверхностью земли	КЖ III и IV	КЖ НАО и ОНРАО

Таким образом, в настоящее время в Беларуси действует классификация РАО по радиационной опасности (I—IV классы), но отсутствует их классификация для обеспечения долгосрочной безопасности при захоронении (классы 1—4 согласно предыдущей редакции [7]).

Следует пояснить, что введенная классификация отходов по радиационной опасности принципиально отличается от рекомендованной в Руководстве по безопасности МАГАТЭ [11] и принятой в Российской Федерации для целей окончательной изоляции в силу их различного целеполагания: обеспечение радиационной защиты персонала при обращении с РАО до захоронения и долгосрочной безопасности населения после этого.

Вместе с тем, как можно видеть из сравнения табл. 1 и 2, установленная в действующей редакции [7] связь между вариантом захоронения и категориями ТРО аналогична таковой согласно предыдущей редакции [7]: вид ПЗРО определяется исходя из категоризации ТРО (ОНРАО, НАО, САО и ВАО), основанной на критериях по УА групп радионуклидов, и их периода полураспада (КЖ, ДЖ).

Использование в качестве критериального параметра УА без учета радиологической опасности отдельных радионуклидов имеет ряд значимых недостатков, которые отмечались специалистами после введения в действие российской классификации [8] и изложены, например, в [13]. Отметим, в частности, возможные завышенные требования к степени изоляции захораниваемых ТРО из-за высокого содержания КЖ радионуклидов и использования единых численных критериев для различных по миграционным характеристикам и дозовым коэффициентам радионуклидов. Не установлены допустимые уровни содержания ДЖ радионуклидов в КЖ САО и КЖ НАО, а так как их наличие, пусть и незначительное, всегда имеет место, то, например, все КЖ САО переходят в ДЖ САО, подлежащие глубинному захоронению.

Существенно, что в связи с исключением классификации РАО для целей окончательной изоляции требуется пересмотр ряда действующих нормативных документов в области обращения с отходами, в частности [10], [14], [15]. Особенно значительной переработке подлежит [10], который при определении критериев приемлемости для захоронения оперирует классами РАО, которые эксплицитно не определены в нормативной документации, а их имплицитное толкование затруднительно.

В основе рекомендуемых МАГАТЭ критериев классификации РАО, изложенных в [11], лежат следующие принципы:

- общая схема классификации РАО основывается главным образом на соображениях долгосрочной безопасности;
- классы РАО «привязаны» к принятым базовым вариантам их захоронения;
- для выбора варианта захоронения отходов значения допустимых уровней УА радионуклидов в РАО, полученных в рамках обоснования безопасности ПЗРО, являются преобладающими по отношению к установленным в классификации;
- регулирующему органу следует установить значения содержания ДЖ радионуклидов в захораниваемых РАО на основе опыта оценки безопасности ПЗРО различного типа.

Подобные подходы, в принципе, применяются большинством стран с учетом национальных особенностей системы обращения с РАО [16].

В качестве основы для рекомендованной МАГАТЭ схемы классификации в [11] выделены такие классы, как ОНАО, НАО, САО, ВАО. Важно отметить их существенное отличие от действующей одноименной категоризации РАО по суммарной УА, установленной в [9], [12].

Рекомендованные МАГАТЭ классы характеризуются более широким диапазоном параметров, в частности содержанием ДЖ радионуклидов. Например, САО определяются как отходы, содержащие ДЖ радионуклиды в количествах, которые требуют большей степени локализации и изоляции от биосферы, чем обеспечивается в случае приповерхностного захоронения [11].

В Российской Федерации с 1 января 2024 года действует классификация РАО для целей захоронения [17], в основе которой лежат указанные выше рекомендации МАГАТЭ. Новая классификация подразумевает ограничение влияния КЖ радионуклидов на установление класса отходов. В отличие от ранее принятой [8], допустимые уровни УА в критериях классификации [17] установлены только для ДЖ радионуклидов. При этом, в соответствии с мировой практикой, альфа-излучающие и трансурановые радионуклиды объединены в одну группу. Для каждого класса и, соответственно, варианта захоронения ТРО зафиксирована адресация к частным критериям приемлемости для конкретного ПЗРО, устанавливаемым на основе оценки его безопасности с учетом фактических характеристик РАО, района, площадки размещения и инженерных барьеров. Таким образом, определен приоритет значений, полученных в рамках обоснования безопасности, над критериями классификации, что соответствует рекомендованному МАГАТЭ подходу.

Рассмотренные выше международно признанные подходы к выбору вариантов захоронения РАО показывают необходимость дальнейшего совершенствования национального нормативно-правового регулирования в данной области и гармонизации установленных требований между различными регламентирующими документами. Анализируя разносторонние аспекты обеспечения долгосрочной безопасности РАО, можно отметить целесообразность рассмотрения более гибкого варианта нормирования с исключением излишней консервативности при выборе типа ПЗРО. При этом ключевыми должны стать:

- внесение изменений в документ [7], допускающих уточнение предельных значений УА радионуклидов по результатам детальной оценки безопасности проектируемого ПЗРО с учетом его фактических характеристик;
- существенная переработка норматива [10] с учетом изменения классификации РАО и возможным установлением в критериях их приемлемости для захоронения допустимых уровней содержания ДЖ радионуклидов в КЖ САО и КЖ НАО.

По мнению авторов, перспективен и подлежит рассмотрению также альтернативный вариант решения указанных выше проблемных вопросов, заключающийся в установлении классификации РАО для обеспечения долгосрочной безопасности при захоронении, аналогичной новой российской классификации [17].

Зарубежный опыт и тенденции приповерхностного захоронения РАО

Согласно международным требованиям [11], для КЖ НАО и КЖ САО применяются различные типы приповерхностных захоронений, при которых сооружения ПЗРО размещаются непосредственно на поверхности или на глубине до нескольких десятков метров. ВАО и ДЖ НАО и ДЖ САО подлежат окончательной изоляции в пунктах глубинного захоронения РАО (в глубоких геологических формациях).

Приповерхностное захоронение НАО и САО с ограниченным содержанием ДЖ радионуклидов реализовано на практике во многих странах, использующих атомную энергию. В связи с этим для выбора способа захоронения таких отходов не требуется разработка новых концептуальных решений, а необходим анализ существующей практики и обоснованный выбор объекта-аналога с учетом характеристик площадки, на которой планируется строительство ПЗРО в Республике Беларусь.

Приповерхностные ПЗРО сооружены в разных странах мира, эксплуатирующих АЭС, в том числе в Российской Федерации. Анализ технических решений, применяемых на существующих и проектируемых объектах окончательной изоляции НАО и САО [16], показывает вариативность в технологиях захоронения. В частности, даже для европейских стран это многообразие проявляется в использовании ПЗРО различной глубины размещения: наземных (Франция, Бельгия), полузаглубленных (Россия, Великобритания), среднелюбных (Швеция, Чехия), глубинных (Германия, Швейцария), в различных вмещающих формациях (глинах, солях, кристаллических породах), отличающихся подходах к выбору материалов инженерных барьеров безопасности. Данное многообразие объясняется исторически сложившимися практиками в разных странах, особенностями национального законодательства, различиями в характеристиках площадок размещения ПЗРО.

В разработанном ранее концептуальном проекте ПЗРО категорий ОНРАО, НАО и КЖ САО Белорусской АЭС [2] принята конструкция сооружений захоронения полузаглубленного типа

(аналоги — российские ПЗРО). Вместе с тем в [18] в связи с установлением новой классификации РАО [17] показана целесообразность перехода от практики их захоронения в полузаглубленных сооружениях к использованию наземных ПЗРО, поэтому далее рассматриваются особенности конструкций такого типа.

Опыт использования указанных способов приповерхностного захоронения анализировался в работах [18]–[20]. Полузаглубленные сооружения для окончательной изоляции РАО характерны для регионов с сухим климатом и благоприятными гидрогеологическими свойствами площадки с низким уровнем грунтовых вод. Их применение 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 изолирующими свойствами (Венгрия — RWTDF), Великобритания — Drigg) или высокопроницаемыми песками в засушливых регионах (США — Hanford, ЮАР — Vaalputs).

Для всех трех первых российских ПЗРО использованы одинаковые проектные решения — захоронение РАО классов 3 и 4 (по классификации РФ) в полузаглубленных железобетонных сооружениях (отсеках захоронения) с размещением РАО класса 3 в железобетонных НЗК в нижнюю часть отсеков, а 4 класса в металлических контейнерах типа КРАД, КМЗ и бочках — в верхнюю.

Однако в [20] отмечено, что применение перечисленных технических решений для всех площадок размещения без учета их особенностей не имеет на сегодняшний день достаточного научно-технического обоснования.

В умеренном и влажном климате практика расположения РАО в полузаглубленных ПЗРО показывает, что упаковки в таких сооружениях подвержены обводнению вследствие инфильтрации атмосферных осадков или колебания уровня грунтовых вод. Это, в свою очередь, требует регулярной откачки воды из отсеков захоронения в процессе их заполнения и приводит к проблемам с ее накоплением после закрытия ПЗРО.

Наземный способ окончательной изоляции 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.

Сравнение достоинств и недостатков приповерхностных способов окончательной изоляции РАО выполнялось в работах [19], [20]. В табл. 3 представлены характеристики наземного и полузаглубленного типов ПЗРО.

Таблица 3. Сравнение конструкций приповерхностных ПЗРО

Достоинства	Недостатки
Наземный	
Невысокие капитальные затраты на строительство (по сравнению с подземным ПЗРО). Менее жесткие требования к геологическим условиям участка. Простота транспортной технологической схемы загрузки упаковок	Влияние сезонных колебаний температур. Большие площади отчуждаемой территории. Сложная конструкция покрывающего экрана. Необходимость обслуживания покрывающего экрана. Чувствительность к внешним воздействиям (особенно на период загрузки)
Полузаглубленный	
Невысокие капитальные затраты на строительство (по сравнению с подземным ПЗРО). Простота транспортной технологической схемы. Меньшие габариты покрывающего экрана по сравнению с наземным ПЗРО	Те же недостатки, что и у наземного варианта, плюс: дополнительные объемы земляных работ; сложность организации самотечной дренажной системы из ячеек захоронения; возможность обводнения при колебании уровня грунтовых вод (как следствие, дополнительные требования к гидрогеологии площадки)

Как видно, полузаглубленный способ захоронения имеет ряд недостатков по сравнению с наземным. В [19] была отмечена тенденция на отказ от строительства таких конструкций ПЗРО. В частности, более чем из двадцати пунктов захоронения для НАО и САО, построенных или проектируемых в странах Европы, такими являются только три.

Для наземного способа захоронения РАО на сегодняшний день разработаны типовые решения. За их основу взята французская модель ПЗРО CSA в регионе Aube [6], который эксплуатируется с 1992 года и спроектирован на базе опыта эксплуатации с 1969 по 1994 год аналогичного пункта в регионе La Manche. Конструкция сооружения захоронения представляет собой железобетонный модуль шириной 25 м и высотой 8 м, поделенный на отсеки. На этапе эксплуатации для предотвращения попадания в них атмосферных осадков, используется передвижное каркасное сооружение (ПКС). Под ним мостовым или козловым краном устанавливаются в штабель упаковки с

РАО. По мере заполнения отсеков пространство между ними заполняется песчано-бentonитовой смесью. Заполненный отсек сверху бетонируется, образуя железобетонный куб. Модули захоронения после заполнения и бетонирования всех отсеков покрываются многослойным покрывающим экраном, формирующим курган [19].

При этом на первых этапах эксплуатации ПЗРО фактически представляет собой пункт долговременного хранения РАО с возможностью изъятия упаковок.

Французская концепция захоронения НАО и САО в настоящее время в мире является наиболее распространенной, а в Европе тиражируется и стала типовой. Она реализована в проектах ПЗРО Испании, Литвы, Украины, Болгарии. На стадии проектирования находится ПЗРО аналогичной конструкции в Южной Корее. В Европе 30% стран, эксплуатирующих АЭС (5 из 15), используют французскую концепцию окончательной изоляции НАО и САО.

Она предполагает оснащение ячеек захоронения наземного ПЗРО инспекционными галереями, предназначенными для размещения в них систем контроля и отвода протечек, которые могут поступать в сооружения захоронения после деградации гидроизоляционных барьеров покрывающего экрана. Эти системы требуют регулярного контроля и обслуживания и, таким образом, для задач окончательной изоляции РАО могут быть применимы только на стадии активного контроля. В связи с этим в [18] отмечена целесообразность использования в ПЗРО пассивных систем отвода возможных протечек, препятствующих накоплению воды в отсеках захоронения и не требующих обслуживания. В таких случаях может применяться фильтрационно-сорбционный подстилающий экран из природных сорбентов типа цеолита, коэффициент фильтрации которого не позволяет накапливаться воде в отсеках захоронения.

Использование указанного подстилающего экрана в качестве замены им гидроизолирующего глиняного слоя является перспективным направлением, позволяющим одновременно препятствовать миграции радионуклидов за счет механизма сорбции и равномерно отводить фильтрационный поток из зоны захоронения.

Возможные концептуальные решения для приповерхностного захоронения РАО БелАЭС

В 2016—2018 годах в ГНУ «ОИЭЯИ — Сосны» с привлечением Санкт-Петербургского филиала АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» — ВНИПИЭТ» предложена и проработана техническая концепция

приповерхностного ПЗРО БелАЭС. Результаты этой работы подробно рассмотрены в [2].

В рамках данного концептуального проекта были предложены типовые решения «на стекле» без привязки к конкретному месту размещения объекта. При реализации этих задач за основу были взяты российские проекты ПЗРО.

На основе проектных данных по количественным и радиационным характеристикам образующихся на АЭС ТРО были рекомендованы способы их дополнительного кондиционирования для приведения в соответствие с регламентируемыми [10] общими критериями для захоронения. В качестве конечных форм поступающих на захоронение ОНРАО¹, НАО и КЖ САО, образующихся при эксплуатации и выводе из эксплуатации АЭС, определены железобетонные НЗК и 200-литровые бочки. Исходя из этого оценен прогнозируемый проектный объем захоронения: приблизительно 20000 м³ для ТРО, образующихся в процессе эксплуатации АЭС, и 10000 м³ для ТРО при выводе ее из эксплуатации.

Конструкция сооружений ПЗРО представляет собой модульные железобетонные отсеки, заглубленная часть которых (до отметки 6,8 м) предназначена главным образом для упаковок КЖ САО, а возвышающаяся над поверхностью земли (до отметки +1,2 м) — для упаковок НАО и ОНРАО (рис. 1). Это унифицированное решение удовлетворяет нормативным требованиям по размещению РАО различных классов.

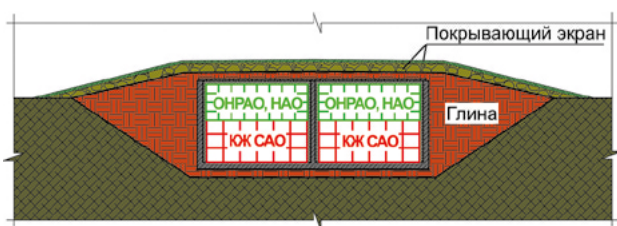


Рис. 1. Принципиальные конструктивные решения для полузаглубленного сооружения захоронения РАО БелАЭС

В конструкции реализуется принцип многобарьерности, сочетающий как природные, так и инженерные барьеры безопасности, такие как физическая форма захораниваемых РАО, стенки контейнеров, буферный сорбирующий материал в отсеках сооружения захоронения, его бетонные конструкции, глиняный экран в составе подстилающего экрана, слой глины, песка и щебня, бентонитовые покрывала,

полиэтилен высокой плотности в покрывающем экране.

Для захоронения 30000 м³ упаковок РАО на площадке предусматриваются 3 модуля по 10000 м³, каждый из которых состоит из 30 отсеков и имеет свой многослойный покрывающий экран. Для загрузки образовавшихся за первые 10 лет эксплуатации АЭС ТРО используется секция из 10 отсеков, которую целесообразно выделить в первую очередь строительства [2].

Следует пояснить, что, хотя рассматриваемая концепция была ориентирована на захоронение только РАО БелАЭС, выполненные разработки применимы для соответствующих модулей планируемого, согласно [5], централизованного ПЗРО, предназначенного для окончательной изоляции и других РАО, накопленных и образующихся в Республике Беларусь. С учетом достигнутой степени детализации технических решений с участием компетентной российской организации, они могут быть использованы при проектировании объекта.

Однако полузаглубленная конструкция сооружений захоронения, принятая в рассмотренном концептуальном проекте, имеет отмеченные выше недостатки, связанные с уязвимостью к обводнению упаковок РАО, и неприменима для площадок с высоким уровнем грунтовых вод. Под подошвой фундаментной плиты и по периметру нижней части наружных стен ограждающих конструкций организуется так называемый глиняный замок из мятой жирной глины, обеспечивающий гидроизоляцию сооружений захоронения и препятствующий попаданию радионуклидов в грунтовые воды. На этапе эксплуатации (загрузки упаковок РАО) в отсеках организуются технологические колодцы (приямки) для сбора и откачки воды с визуальным контролем ее наличия. После закрытия (консервации) ПЗРО решения, обеспечивающие отвод воды из зоны захоронения, не предусмотрены, так как организация самотечной дренажной системы невозможна. Результаты численного моделирования влагопереноса показывают, что, в случае возможных протечек через покрывающий экран, глины не позволяют воде дренироваться из сооружений захоронения. В результате ее уровень повышается, и радионуклиды выносятся с потоком, минуя подстилающий экран [18].

В настоящее время площадка для строительства централизованного ПЗРО в республике не определена. Консервативно можно предположить, что она будет характеризоваться высоким уровнем грунтовых вод. В таком случае заглубление основания отсеков захоронения примерно на 7 м относительно отметки планировки

¹ За исключением введенной на БелАЭС эксплуатационной категории ТРО ОНАО [2], [21].

площадки ПЗРО приведет к приближению упаковок РАО к водоносным горизонтам и рискам, связанным с их обводнением при поднятии уровня грунтовых вод и появления верховодки в межсезонный период.

В связи с этим целесообразно рассмотреть вариант создания в ПЗРО сооружений захоронения РАО БелАЭС наземного типа. На возможность реализации данного способа захоронения в отношении образующихся на БелАЭС ОНРАО, НАО и САО указывают результаты выполненной при разработке концепции [2] расчетной оценки по методике с корреляционным фактором УА ДЖ радионуклидов в них. При нормальных условиях эксплуатации АЭС в основной массе образующихся ТРО она не превышает 10 000 Бк/г для бета-излучающих и 400 Бк/г для альфа-излучающих радионуклидов. Это низкие и приемлемые для различных вариантов приповерхностного захоронения значения — по действующей российской классификации [17] такие ТРО относятся к классу 4. Безусловно, достижение достаточного уровня безопасности предлагаемого наземного варианта захоронения должно быть обосновано по результатам детальной оценки его безопасности с учетом условий района, площадки размещения и проектируемых физических барьеров, в том числе с применением численного моделирования миграционных процессов при различных (или наиболее вероятных) сценариях эволюции ПЗРО.

Разработка предложений по технической концепции наземных сооружений захоронения РАО БелАЭС выполнена исходя из рассмотренной выше типовой французской модели ПЗРО (рис. 2).

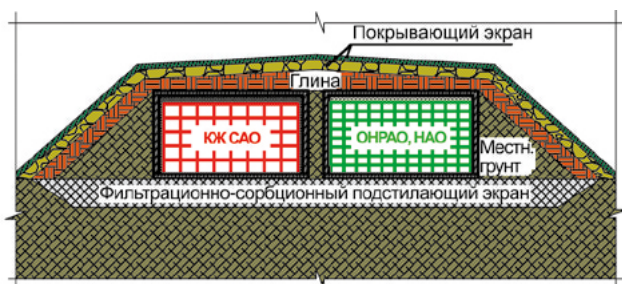


Рис. 2. Принципиальные конструктивные решения для наземного сооружения захоронения РАО БелАЭС

Модуль захоронения наземного исполнения представляет собой железобетонное сооружение с габаритами 18,4 × 60,4 × 7,4 м, разделенное на 10 отсеков с размерами в плане 17,6 × 5,6 м. В их стенках предусмотрены транспортные проемы. Секции на этапе загрузки упаковок РАО не имеют перекрытия. Над зоной проведения

работ размещается сборно-разборное ПКС, предназначенное для ее укрытия от осадков и оснащенное мостовым краном, системой освещения и видеонаблюдения.

Пустоты между упаковками РАО в отсеках захоронения заполняются буферным материалом на основе песка, глины, цемента. После заполнения над отсеком монтируется железобетонное перекрытие с гидроизоляцией. По мере заполнения и изоляции отсеков, ПКС по рельсовому пути перемещается к следующим, а по завершении загрузки модуля — разбирается и переносится на другой.

Размещение упаковок низкой (ОНРАО и НАО в бочках и НЗК) и средней активности (КЖ САО в НЗК) производится в разных модулях, отличающихся толщиной биологической защиты ограждающих стен и использованием различных буферных материалов. Дифференцированный подход к окончательной изоляции существенно отличающихся по потенциальной опасности ТРО позволяет снизить затраты на их захоронение.

Выше отмечалась перспективность использования для обеспечения пассивной безопасности ПЗРО после его закрытия фильтрационно-сорбционного подстилающего экрана на основе природных сорбентов. В связи с этим под основанием (днищем) из водопроницаемого бетона толщиной 700 мм каждого рассматриваемого модуля между слоями песчаной подушки укладывается природный водопроницаемый сорбент (глинопесчаная смесь, цеолитсодержащий трепел, смесь песка и торфа или иной материал). Такая конструкция обеспечивает отвод воды из зоны размещения РАО в случае нарушения гидроизоляции покрывающего экрана и при этом за счет механизма сорбции препятствует миграции радионуклидов в нижележащие грунты и водоносные горизонты. Контроль за эффективностью работы данного барьера должен осуществляться с помощью сети наблюдательных скважин по периметру сооружений захоронения. Для определения толщины слоя, вида и состава сорбирующего материала, а также буферной засыпки необходимо научное обоснование.

Для захоронения всего объема РАО БелАЭС потребуется предположительно четыре очереди строительства по два модуля (для упаковок ТРО низкой и средней активности) в каждой. На рис. 3 представлена схема размещения в ПЗРО наземных сооружений захоронения РАО БелАЭС на этапе их эксплуатации.

Наземные сооружения захоронения характеризуется большими габаритами покрывающего экрана по сравнению с заглубленными, поэтому его возведение осуществляется после загрузки

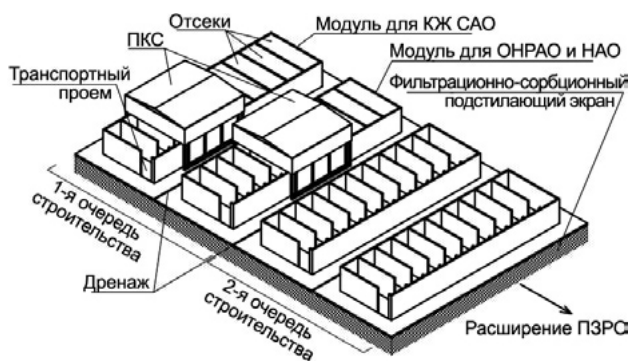


Рис. 3. Схема размещения наземных сооружений захоронения РАО БелАЭС

и консервации всех модулей. Создание единого покрывающего экрана над всеми отсеками захоронения позволяет сократить площадь застройки, объемы материалов и работ. Важно отметить, что при этом длительное время сооружения захоронения доступны для визуального контроля и, в случае необходимости, перед возведением покрывающего экрана могут быть реализованы дополнительные меры по обеспечению безопасности ПЗРО (например, предусмотрена дополнительная гидроизоляция). Также, в данном случае проще реализуется вариант с изъятием упаковок из сооружения захоронения в случае возможных ошибок характеристики РАО или изменения нормативных требований (для этого потребуется разборка железобетонных конструкций модулей захоронения и извлечение буферных материалов).

Для рассмотренных технических концепций сооружений захоронения РАО БелАЭС проработаны унифицированные и стандартизированные строительные решения, а также исходные технические требования на нестандартизированное оборудование. Вопрос о выборе варианта конструкции указанных сооружений для планируемого централизованного ПЗРО необходимо рассматривать с учетом всей совокупности характеристик системы захоронения РАО в месте размещения объекта.

Заключение

Анализ международно признанных подходов к выбору вариантов захоронения РАО показывает необходимость дальнейшего усовершенствования национального нормативно-правового регулирования в данной области и гармонизации установленных требований между различными нормативными документами.

При выборе технической концепции сооружений захоронения НАО и САО БелАЭС с

ограниченным содержанием ДЖ радионуклидов для республиканского централизованного ПЗРО целесообразно на стадии проектирования рассмотреть вариант конструкции наземного типа.

Литература

1. 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) // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. — URL: <https://pravo.by/natsionalnyy-reestr/poisk-v-reestre/?p1=5/40619> (дата обращения: 20.08.2024).
2. Жемжуров М. Л., Кузьмина Н. Д. Техническая концепция захоронения очень низкоактивных, низкоактивных и короткоживущих среднеактивных радиоактивных отходов Белорусской АЭС // Вестник Нац. акад. наук Беларуси. Серия физ.-техн. наук. 2022. № 1. С. 105–118. DOI: 10.29235/1561-8358-2022-67-1-105-118.
3. Жемжуров М. Л. Обоснование стратегии обращения с высокоактивными РАО, образующимися в процессе эксплуатации и вывода из эксплуатации Белорусской АЭС. Часть 1. Актуальность и исходные данные // Энергетическая стратегия. 2023. № 3 (93). С. 39–42.
4. Жемжуров М. Л. Обоснование стратегии обращения с высокоактивными РАО, образующимися в процессе эксплуатации и вывода из эксплуатации Белорусской АЭС. Часть 2. Концептуальные и технологические решения // Энергетическая стратегия. 2023. № 4 (94). С. 39–43.
5. О Стратегии обращения с радиоактивными отходами : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 15 февр. 2023 № 128 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. — URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22300128&p1=1&p5=0> (дата обращения: 20.08.2024).
6. 6. Technical considerations in the design of near surface disposal facilities for radioactive waste. IAEA-TECDOC-1256. Vienna, IAEA, 2001. 60 p.
7. Нормы и правила по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения». Утв. постановлением МЧС Респ. Беларусь от 28.09.2010 № 47. — URL: https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/a98/postanovlenie_mchs_47.pdf (дата обращения: 20.08.2024).
8. Постановление Правительства Российской Федерации от 19.10.2012 № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных

отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов» (в ред. постановления Правительства Российской Федерации от 04.02.2015 № 95).

9. Санитарные нормы и правила «Требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при обращении с радиоактивными отходами». Утв. постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 31.12.2015 № 142.

10. Нормы и правила по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения». Утв. постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 16.07.2019 № 47.

11. Классификация радиоактивных отходов: Нормы МАГАТЭ по безопасности. Руководство по безопасности № GSG-1. — Вена, МАГАТЭ, 2009. 68 с.

12. Положение о порядке и критериях отнесения радиоактивных отходов к классам радиационной опасности. Утв. постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 21 августа 2020 г. № 497.

13. Дорощев А. Н., Линге И. И., Самойлов А. А., Шарафутдинов Р. Б. К вопросу финансово-экономического обоснования повышения эффективности нормативной базы ЕГС РАО // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 22—31.

14. Нормы и правила по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов. Требования безопасности». Утв. Постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь 03.05.2021 № 32.

15. Нормы и правила по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности». Утв. Постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 20 января 2012 г. № 7 (в ред. постановления Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 5 июня 2018 г. № 38).

16. Цебаковская Н. С. и др. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО / Под общ. ред. И. И. Линге, Ю. Д. Полякова. — М. : Комтехпринт, 2015. 208 с.

17. О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 19.10.2012 № 1069: постановление Правительства Российской Федерации от 29.10.2022 № 1929.

18. Павлов Д. И., Неуважаев Г. Д., Дёмин А. В., Шульман Г. С., Демченко Е. Д. К вопросу выбора способа захоронения низко- и среднеактивных РАО // Радиоактивные отходы. 2024. № 1 (26). С. 69—83. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-1-69-83.

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

20. Павлов Д. И., Сорокин В. Т., Баринев 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.

21. Жемжуров М. Л., Песцова А. В., Жемжуров А. М. Об обращении с радиоактивными отходами очень низкой активности на Белорусской АЭС // Энергетическая стратегия. 2024. № 4(100). С. 44—48.

Информация об авторах

Жемжуров Михаил Леонидович, доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией, ГНУ «ОИЭЯИ – Сосны» НАН Беларуси (220109, Республика Беларусь, Минск, ул. Академика Красина, д. 99), e-mail: stari1111@mail.ru.

Павлов Дмитрий Игоревич, начальник технологического отдела по проектированию систем обращения с РАО, АО «Компания инжиниринга и строительства «ИСТОК» (197183, Санкт-Петербург, ул. Дибуновская, д. 55), e-mail: dmigopavlov@rosatom.ru.

Жемжуров Алексей Михайлович, младший научный сотрудник, ГНУ «ОИЭЯИ – Сосны» НАН Беларуси (220109, Республика Беларусь, Минск, ул. Академика Красина, д. 99); магистрант ГУО «Университет Национальной академии наук Беларуси» (220070, Республика Беларусь, Минск, Радиальная ул., д. 38Б), e-mail: zhemzhurow1888@rambler.ru.

Библиографическое описание статьи

Жемжуров М. Л., Павлов Д. И., Жемжуров А. М. Варианты концептуальных решений для сооружений приповерхностного захоронения радиоактивных отходов Белорусской АЭС // Радиоактивные отходы. 2024. № 4 (29). С. 53—65. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-4-53—65.

CONCEPTUAL DESIGN OPTIONS PROPOSED FOR THE NEAR-SURFACE RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL FACILITY AT THE BELARUSIAN NPP

Zhemzhurov M. L.¹, Pavlov D. I.², Zhemzhurov A. M.¹

¹State Scientific Institution “Joint Institute for Energy and Nuclear Research – Sosny” of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

²JSC «Company of engineering and construction “ISTOK”, St-Petersburg, Russia

Article received on September 2, 2024

The article considers the problems related to legal regulation in the field of radioactive waste management. It analyzes international experience and trends in the development of near-surface disposal facilities and summarizes the key takeaways from the completed efforts on the development of a near-surface radioactive waste disposal facility at the Belarusian NPP presenting possible design options.

Keywords: nuclear power plant, radioactive waste, disposal of radioactive waste, underlying screens, radionuclide transport.

References

1. *Ob utverzhdenii strategii obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami Belorusskoy atomnoy elektrostansii: postanovleniye Soveta Ministrov Resp. Belarus', 2 iyunya 2015 g., №460 (v redaktsii postanovleniya Soveta Ministrov Resp. Belarus' ot 18.03.2021 № 150)* [On the approved management strategy for radioactive waste from the Belarusian Nuclear Power Plant: Decree of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, June 2, 2015, No. 460 (as amended by the Decree of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of March 18, 2021 No. 150)]. National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus. — URL: <https://pravo.by/natsionalnyy-reestr/poisk-v-reestre/?p1=5/40619> (accessed on: 20.08.2024).

2. Zhemzhurov M. L., Kuzmina N. D. *Tekhnicheskaya kontseptsiya zakhroneniya ochen' nizkoaktivnykh, nizkoaktivnykh i korotkozhevushchikh*

sredneaktivnykh radioaktivnykh otkhodov Belorusskoy AES [Technical concept proposed for the disposal of very low-level, low-level and short-lived intermediate-level waste from the Belarusian NPP]. *Izvestiya Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk — Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of Phys.-Tech. science*, 2022, no. 1, pp. 105—118. DOI: 10.29235/1561-8358-2022-67-1-105-118.

3. Zhemzhurov M. L. *Obosnovaniye strategii obrashcheniya s vysokoaktivnymi RAO, obrazuyushchimisya v protsesse ekspluatatsii i vyvoda iz ekspluatatsii Belorusskoy AES. Chast' 1. Aktual'nost' i iskhodnyye dannyye* [Feasibility assessment of the strategy proposed to manage high-level waste generated during operation and decommissioning of the Belarusian NPP. Part 1. Relevance and initial data]. *Energeticheskaya strategiya — Energy strategy*, 2023, no. 3 (93), pp. 39—42.

4. Zhemzhurov M. L. Obosnovaniye strategii obrashcheniya s vysokoaktivnymi RAO, obrazuyushchimi-sya v protsesse ekspluatatsii i vyvoda iz ekspluatatsii Belorusskoy AES. Chast' 2. Kontseptual'nyye i tekhnologicheskiye resheniya [Feasibility assessment of the strategy proposed to manage high-level waste generated during operation and decommissioning of the Belarusian NPP. Part 2. Conceptual and engineering designs]. *Energeticheskaya strategiya — Energy Strategy*, 2023, no. 4 (94), pp. 39—43.
5. *O Strategii obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami* [On the Radioactive Waste Management Strategy]. Decree of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of February 15, 2023 No. 128. National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus. — URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22300128&p1=1&p5=0> (accessed on: 20.08.2024).
6. Technical considerations in the design of near surface disposal facilities for radioactive waste. IAEA-TECDOC-1256. Vienna, 2001. 60 p.
7. *Normy i pravila po obespecheniyu yadernoy i radiatsionnoy bezopasnosti "Bezopasnost' pri obrashchenii s radioaktivnymi otkhodami. Obshchiye polozeniya"* [Norms and Rules for the Nuclear and Radiation Safety. Safe Management of Radioactive Waste. General Provisions]. Approved by the Decree of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus on September 28, 2010, No. 47 — URL: https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/a98/postanovlenie_mchs_47.pdf (accessed on: 20.08.2024).
8. *Postanovleniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 19.10.2012 No. 1069 "O kriteriyakh otneseniya tverdykh, zhidkikh i gazoobraznykh otkhodov k radioaktivnym otkhodam, kriteriyakh otneseniya radioaktivnykh otkhodov k osobym radioaktivnym otkhodam i k udalyayemym radioaktivnym otkhodam i kriteriyakh klassifikatsii udalyayemykh radioaktivnykh otkhodov"* [Decree of the Government of the Russian Federation of October 19, 2012 No. 1069 On criteria used to categorize solid, liquid and gaseous waste as radioactive waste, the criteria for radioactive waste categorization as non-removable radioactive waste or removable radioactive waste, and classification criteria for removable radioactive waste] (as amended by the Decree of the Government of the Russian Federation of February 4, 2015 No. 95).
9. *Sanitarnyye normy i pravila "Trebovaniya k obespecheniyu radiatsionnoy bezopasnosti personala i naseleniya pri obrashchenii s radioaktivnymi otkhodami"* [Sanitary Norms and Rules. Radiation Safety Requirements for the Personnel and the Population During Radioactive Waste Management]. Approved by the Decree of the Ministry of Health of the Republic of Belarus of December 31, 2015 No. 142.
10. *Sanitarnyye normy i pravila "Trebovaniya k obespecheniyu radiatsionnoy bezopasnosti personala i naseleniya pri obrashchenii s radioaktivnymi otkhodami"* [Norms and Rules for Nuclear and Radiation Safety. Radioactive Waste Acceptance Criteria for Disposal]. Approved by the Decree of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus on July 16, 2019 No. 47.
11. International Atomic Energy Agency, Classification of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. GSG-1. Vienna, IAEA Publ., 2009. 68 p.
12. *Polozheniye o poryadke i kriteriyakh otneseniya radioaktivnykh otkhodov k klassam radiatsionnoy opasnosti* [Regulation on the procedure and criteria used to refer radioactive waste to different radiation hazard classes]. Approved by the Decree of the Council of Ministers of the Republic of Belarus on August 21, 2020 No. 497.
13. Dorofeev A. N., Linge I. I., Samoylov A. A., Sharafutdinov R. B. K voprosu finansovo-ehkonomicheskogo obosnovaniya povysheniya ehffektivnosti normativnoj bazy EGS RAO [Feasibility study on enhancing the efficiency of USS RW regulatory framework]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2017, no. 1, pp. 22—31.
14. *Normy i pravila po obespecheniyu yadernoy i radiatsionnoy bezopasnosti "Pripoverkhnostnoye zakhoroneniye radioaktivnykh otkhodov. Trebovaniya bezopasnosti"* [Norms and Rules for Nuclear and Radiation Safety. Near-Surface Disposal of Radioactive Waste. Safety Requirements]. Approved by the Decree of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus on May 3, 2021 No. 32.
15. *Normy i pravila po obespecheniyu yadernoy i radiatsionnoy bezopasnosti "Zakhoroneniye radioaktivnykh otkhodov. Printsipy, kriterii i osnovnyye trebovaniya bezopasnosti"* [Norms and Rules for Nuclear and Radiation Safety. Disposal of Radioactive Waste. Principles, Criteria and Basic Safety Requirements]. Approved by the Decree of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus on January 20, 2012 No. 7 (as amended by the Decree of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus of June 5, 2018 No. 38).
16. Tsebakovskaya N. S. et al. *Obzor zarubezhnykh praktik zakhoroneniya OYAT i RAO* [Overview of international spent nuclear fuel and radioactive waste disposal practices]. Edt. by I. I. Linge, Yu. D. Polyakov. Moscow, Komtekhpriint Publ., 2015. 208 p.
17. On amendments to the Decree of the Government of the Russian Federation of October 19, 2012 No. 1069: Decree of the Government of the Russian Federation of October 29, 2022 No. 1929.
18. Pavlov D. I., Neuvazhaev G. D., Demin A. V., Shulman G. S., Demchenko E. D. K voprosu vybora

sposoba zakhoroneniya nizko- i sredneaktivnykh RAO [On the Selection of a Disposal Option for Low- and Intermediate-Level Waste]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2024, no. 1 (26), pp. 69–83. DOI: 10.25283/258-9707-2024-1-69-83.

19. Sorokin V. T., Pavlov D. I. Tekhnologii okonchatel'noj izolyatsii radioaktivnykh otkhodov: evropejskij opyt i tendencii [Technologies of radioactive waste disposal: European experience and trends]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 4 (5), pp. 24–32.

20. Pavlov D. I., Sorokin V. T., Barinov A. S., Demin A. V., Sychenko D. V. Nauchno-tekhnicheskie i

proektnye osnovy sozdaniya konstrukcij pripoverkhnostnykh punktov zakhoroneniya nizko- i sredneaktivnykh otkhodov [Scientific and Design Aspects in the Development of Near-Surface Disposal Facilities for Low-And Intermediate-Level Waste]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2021, no. 4 (17), pp. 65–77. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-4-65-77.

21. Zhemzhurov M. L., Pestsova A. V., Zhemzhurov A. M. Ob obrashchenii s radioaktivnymi otkhodami ochen' nizkoy aktivnosti na Belorusskoy AES [Management of very low-level waste at the Belarusian NPP]. *Energeticheskaya strategiya — Energy Strategy*, 2024, no. 4 (100), pp. 44–48.

Information about the authors

Zhemzhurov Mikhail Leonidovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Laboratory, State Scientific Institution “Joint Institute for Energy and Nuclear Research – Sosny” of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Akademika Krasina st., Minsk, 220109, Republic of Belarus), e-mail: stari1111@mail.ru.

Pavlov Dmitriy Igorevich, Head of the Technological Department for Design of Radioactive Waste Management Systems, JSC «Company of engineering and construction «ISTOK» (55, Dibunovskaya st., St-Petersburg, 197183, Russia), e-mail: dmigopavlov@rosatom.ru.

Zhemzhurov Alexey Mikhailovich, Junior Researcher, State Scientific Institution “Joint Institute for Energy and Nuclear Research – Sosny” of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Akademika Krasina st., Minsk, 220109, Republic of Belarus); postgraduate student, State educational Institution University of the National Academy of Sciences of Belarus (38B, Radial st., Minsk, 220070, Republic of Belarus), e-mail: zhemzhurov1888@rambler.ru.

Bibliographic description

Zhemzhurov M. L., Pavlov D. I., Zhemzhurov A. M. Conceptual Design Options Proposed for the Near-Surface Radioactive Waste Disposal Facility at the Belarusian NPP. *Radioactive Waste*, 2024, no. 4 (29), pp. 53–65. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-4-53-65. (In Russian).