

ЭВОЛЮЦИЯ ОБОСНОВАНИЯ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПГЗ ЖРО

А. Н. Дорофеев

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», Москва

Е. А. Савельева, С. С. Уткин

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

А. В. Понизов, Р. Б. Шарафутдинов

ФБУ Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности, Москва

Е. Г. Кудрявцев

Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, Москва

И. А. Пронь, В. Ю. Коновалов

ФГУП Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами, Москва

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2017 г.

В работе рассмотрены шаги по совершенствованию обоснования безопасности ПГЗ ЖРО с учетом международных стандартов. Основу мероприятий составляют аналитические и экспериментальные работы, направленные на снижение неопределенностей исходных данных, закладываемых в модели ПГЗ ЖРО, повышение качества сценариев эволюции ПГЗ ЖРО и разработку концепции закрытия ПГЗ ЖРО, соответствующую современным требованиям нормативных документов.

Ключевые слова: ПГЗ ЖРО, долговременная безопасность, обоснование безопасности, закрытие ПГЗ ЖРО, МАГАТЭ, стандарты.

Идея захоронения жидких радиоактивных отходов (ЖРО) путем их закачивания через нагнетательные скважины в глубоко залегающие горизонты сформировалась в конце 1950-х гг. [1]. Основной особенностью данной технологии захоронения ЖРО являются повышенные требования по проницаемости, скорости движения подземных вод, емкостным свойствам и т.п. Эксплуатационный горизонт должен быть надежно изолирован от поверхности мощными слоями непроницаемых для отходов водоупорных глин, а также одним или несколькими буферными водоносными горизонтами. При выборе участков для ПГЗ ЖРО выполнялись комплексы исследовательских работ, направленных на выявление таких свойств, результаты которых подтверждали приемлемость геолого-гидрогеологических характеристик соответствующих горных отводов для размещения ЖРО заданного химического и радионуклидного составов [1].

В настоящее время в Российской Федерации функционирует три площадки для захоронения ЖРО:

- Полигон «Площадки 18 и 18а» расположен в северной части АО «СХК» Госкорпорации «Росатом» на удалении 8,8 км от жилого массива г. Северск Томской области на правом берегу р. Томь. Здесь скальные породы палеозойского фундамента погружаются под толщу песчано-глинистых мезо-кайнозойских пород, содержащих песчаные слои, обладающие коллекторскими свойствами, и слои глинистых водоупоров. Мощность осадочной толщи 350–450 м.
- Полигон «Северный» расположен в пределах санитарно-защитной зоны ФГУП ФЯО «ГХК» Госкорпорации «Росатом» на правом берегу р. Енисей, на водоразделе рек Енисей и Б. Тель, в 18 км к юго-западу от Железногорска и на расстоянии около 55 км на северо-восток от Красноярска. ПГЗ ЖРО находится в пределах

древней эрозионной впадины, заполненной толщей перемежающихся песчаных и глинистых юрских отложений с максимальной глубиной от поверхности 550 м. С запада впадина ограничена тектоническим нарушением субмеридиональной протяженности, плоскость которого заглинизирована и изолирует подземные воды опущенного блока от вод поднятого блока, связанных с р. Енисей.

• «Опытно-промышленный полигон» расположен в бассейне среднего течения р. Волги в 8 км к западу от Дмитровграда на территории центра исследовательских установок НИИАР, вблизи комплекса по обращению с радиоактивными отходами. В геологическом разрезе площадки выделено 7 водоносных комплексов, содержащих как пресные, так и минерализованные воды, в том числе рассолы, и горизонты пород, обладающих водоупорными свойствами. В свойствах подземных вод отмечается вертикальная гидрогеохимическая зональность. Мощность осадочной толщи до 2300 м. В качестве коллекторов для захоронения ЖРО используются проницаемые зоны, залегающие в интервале глубин 1440—1550 и 1130—1410 м.

В период интенсивного использования ПГЗ ЖРО основное внимание уделялось вопросам эксплуатационной безопасности, а именно контролю технологических параметров процессов, показателей облучения персонала, параметров окружающей среды, выявлению отклонений и нарушений, устранению их причин. Тематика долговременной радиационной и экологической безопасности ограничивалась мониторингом распространения фронта загрязнения и выполнением отдельных НИР по изучению воздействия захоронения на недра. Данная информация включалась в ежегодные отчеты по состоянию безопасности, предоставляемые в органы управления и регулирования безопасности при использовании атомной энергии. Систематизированная информация также предоставляется в составе отчета по обоснованию безопасности (ООБ) и геолого-гидрогеологического обоснования продления срока эксплуатации для получения лицензий на осуществление деятельности и пользование недр соответственно.

Обоснование долговременной безопасности на этапе проектирования осуществлялось аналитическими методами путем определения миграции компонентов ЖРО в потоке подземных вод для периодов времени от нескольких сотен и до тысячи лет. Впоследствии, при накоплении информации мониторинговых наблюдений, уточнения характеристик геологической среды и миграционных параметров компонентов ЖРО, проводились повторные прогнозные расчеты уже с использованием сначала аналогового, а затем численного моделирования.

В последнее десятилетие, учитывая расширение научных знаний в области безопасности человека

и окружающей среды, требования к обоснованию безопасности пунктов захоронения РАО существенно возросли. Одной из причин можно считать обновление нормативной базы: вышел Федеральный закон «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 11.07.2011 № 190-ФЗ, а также серия федеральных норм и правил.

Главная проблема обоснования соответствия технологии закачки ЖРО в глубоко расположенные геологические пласты современным международным стандартам [2—5] связана с ее базовой концепцией — захоронение отходов в жидкой фазе (без отверждения) и отсутствием системы инженерных барьеров в общем понимании, что воспринимается зарубежными специалистами как нарушение принципа мультибарьерности. Хотя на самом деле в концепции ПГЗ ЖРО присутствуют элементы многобарьерности в виде чередующихся водоупорных и буферных водоносных горизонтов.

В том числе и наличие столь принципиальной разницы в интерпретации основополагающих рекомендаций стало основанием для проведения в 2013 г. миссии МАГАТЭ, цель которой заключалась в оценке соответствия российских подходов и процедур по обоснованию долговременной безопасности ПГЗ ЖРО международным стандартам. Международными экспертами было рассмотрено обоснование долговременной безопасности пункта глубинного захоронения жидких отходов, в основе которого лежали документы, подготовленные российскими специалистами для полигона «Северный» Железногорского филиала ФГУП «НО РАО» в рамках мероприятий по продлению лицензий на пользование недрами и эксплуатацию объекта.

В итоге наиболее существенные замечания экспертов касались (1) отсутствия системности описания ПГЗ ЖРО, что усложняет обоснование полноты учета всех влияющих на безопасность факторов; (2) недостаточного уровня научно-технических аргументов, выдвигаемых для обоснования выполнения основных функций безопасности в долгосрочной перспективе, в связи с чем основной подход был связан с использованием консервативных предположений; (3) отсутствия учета различного рода неопределенностей. Сразу следует отметить, что по ряду позиций близкие по смыслу замечания были сформулированы и российскими органами регулирования безопасности при использовании атомной энергии в условиях действия лицензий, выданных в предшествующие годы. Соответствующие работы по ним были организованы, но не дали исчерпывающих ответов на поставленные вопросы. Анализ рекомендаций экспертов и формулировка направлений исследований, ориентированных на их учет, легли в основу «Программы расчетно-экспериментальных исследований по обоснованию

и оценке долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов», утвержденной Госкорпорацией «Росатом» и Ростехнадзором в 2015 году. Научные основы формирования направлений Программы детально рассмотрены в статье [6].

Принципиальными тенденциями последних лет является минимизация образования ЖРО и разработка технологий их отверждения. До завершения сроков эксплуатации ПГЗ ЖРО будут актуализированы концепции их закрытия, соответствующие современному законодательству и уровню знаний, разработаны программы закрытия и необходимая проектная документация. В общем случае будет проведен демонтаж наземных сооружений и оборудования, ликвидация части скважин, модернизация оставшихся скважин и сооружение новых для ведения мониторинга, организация контроля состояния системы захоронения и окружающей среды. Длительность осуществления ведомственного контроля, включающего мониторинг геосферы и биосферы, а также ограничение доступа на площадку, будет обоснован в проектной документации по Закрытию.

Основы современного подхода к обоснованию долговременной безопасности

Ориентируясь на международный опыт и документы МАГАТЭ, современное обоснование безопасности пункта захоронения РАО интерпретируется в соответствии с понятием «safety case», как собранные воедино аргументы и свидетельства, демонстрирующие тот факт, что конкретная установка, часть установки или деятельность, осуществляемая на площадке, является безопасной [2]. При этом материалы обоснования безопасности последовательно обновляются по мере развития объекта и накопления информации. Таким образом, структура итогового документа по обоснованию безопасности для очередного этапа жизненного цикла, а в случае ПГЗ ЖРО закрытия объекта, представляет собой описание основных аспектов, обеспечивающих безопасность системы захоронения РАО со ссылками на документы, содержащие подробное описание исследований, моделей, расчетов и выводов, относящихся к данным аспектам. Такая структура позволяет обеспечить, с одной стороны, обзорный объем финального документа, а с другой — использовать для аргументации всего объема имеющейся информации.

Так как документация по всем ПГЗ ЖРО являлась разнородной, то работу по обоснованию безопасности объектов и формированию соответствующих документов было решено стандартизировать с тем, чтобы обеспечить системность описания систем и их элементов, полноту учета факторов, влияющих на безопасность, учет различных типов возникающих неопределенностей, контроль качества и т. п. Разработанная для этого

последовательная методика подробно описана в статье [8].

В соответствии с разработанной методикой для обеспечения аргументации итогового документа по обоснованию безопасности готовится серия основных документов, которые, в свою очередь, ссылаются на отчеты по конкретным НИР и НИОКР.

«Отчет о данных» представляет собой результат сбора, анализа и систематизации всего объема накопленной информации по условиям размещения и эксплуатации ПГЗ ЖРО, включая характеристики (географические, метеорологические и геологические) районов размещения, характеристики площадок размещения (геологические и гидрогеологические условия, физико-химический состав пород и грунтовых вод), техногенные характеристики системы захоронения РАО (схемы расположения элементов системы, материалы и свойства наземных и подземных конструкций, объемы захоронений ЖРО по отдельным скважинам), характеристики ЖРО (радионуклидный и химический состав, физико-химические свойства), результаты моделирования последствий, выполненных от этапов проектирования до последних расчетов. Важным аспектом данной работы было выявление и систематизация неопределенностей различных типов и предложения по их снижению. Выделены 4 группы неопределенностей: геологические, связанные с невозможностью получения полной информации о неоднородностях геологической среды; техногенные, связанные недостаточной изученностью техногенных преобразований геологической среды при взаимодействии с компонентами ЖРО; сценарные, связанные с низкой прогнозируемостью внешних процессов, воздействующих на систему; параметрические, связанные с методикой выбора параметров математического моделирования. Понимание источников некоторых неопределенностей предопределило такие направления исследований, как совершенствование геологических моделей объектов, выполнение дополнительных исследований и совершенствование методик моделирования процессов взаимодействия компонент ЖРО и геологической среды, формирование сценариев для плохо прогнозируемых событий.

«Отчёт о геологии» представляет собой обобщение всей информации, характеризующей геологическую изученность районов и площадок размещения ПГЗ ЖРО, включая историческую справку по работам, выполненным с целью изучения геологической среды; подробное описание стратиграфии и литологии, сейсмических и гидрогеологических условий. Особо выделены характеристики геологической среды, наиболее сильно влияющие на процессы переноса компонентов ЖРО и степень их изученности. Представлено описание геологического развития регионов размещения ПГЗ ЖРО с целью построения сценариев геологической эволюции как для существующих

тектонических нарушений, так и для сейсмической активности и формирования новых нарушений. История формирования геологических условий площадок размещения объектов предполагает внезапные эндогенные и экзогенные геологические процессы как маловероятные на период до 100 000 лет.

В «Отчёте о климате» представлены результаты прогнозной оценки основных параметров климата (температура и осадки) на период до 100 000 лет, основанные на объединении проекций трендов естественного развития климата и антропогенного воздействия на него для районов расположения ПГЗ ЖРО — г. Железногорск (Красноярский край), г. Северск (Томская область), г. Димитровград (Ульяновская область). Результаты проведенных исследований допускают возможность пренебрежения антропогенной составляющей на временном интервале более 1 000 лет. Естественные тренды климатических параметров оценивались на основе анализа имеющихся палеогеографических и палеоклиматических данных. Разработаны наиболее вероятные сценарии развития климата в районах расположения ПГЗ ЖРО, в которых не предусматривается распространение ледников в регионах размещения объектов в будущих ледниковых периодах, но допускается возможность истощения водных запасов вышележающих горизонтов (пример проекции осадков на 10 000 лет для ПГЗ ЖРО «Северский» представлен на рис. 1).

Отчеты об ОСП (особенность, событие, процесс от английского feature, event, process — FEP), эволюции и процессах сильно взаимосвязаны и в

целом имеют общую задачу — обеспечить полноту учета всех факторов, влияющих на безопасность системы захоронения РАО. ОСП это единичный фактор: особенность, событие или процесс. Особенность — объект, структура или условие, которое имеет потенциал оказания влияния на систему захоронения. Особенность описывается качественным или количественным значением, в том числе списком или зависимостью, которое может обладать известным или неизвестным уровнем неопределенности. Событие — естественное или антропогенное явление, кратковременное по сравнению с периодом существования системы, которое способно воздействовать на эволюцию системы захоронения. Конкретное событие является стартом некоторого сценария. Процесс — естественное или антропогенное явление, которое способно воздействовать на эволюцию системы захоронения и проявляющее свое действие в течение существенного периода ее существования.

Для формирования понимания системы строится полный список ОСП, охватывающий все факторы, потенциально связанные с долговременным существованием и эволюцией системы захоронения данного типа. Из всех потенциальных ОСП выделяется поднабор важнейших ОСП, которые позволяют определить разброс возможных будущих состояний (сценариев развития) системы захоронения. Сценарий — хорошо определенная последовательность из ОСП, приводящая к возможному будущему состоянию системы. Последовательность может быть ненарушенной (нормальная эволюция) или нарушенной за счет

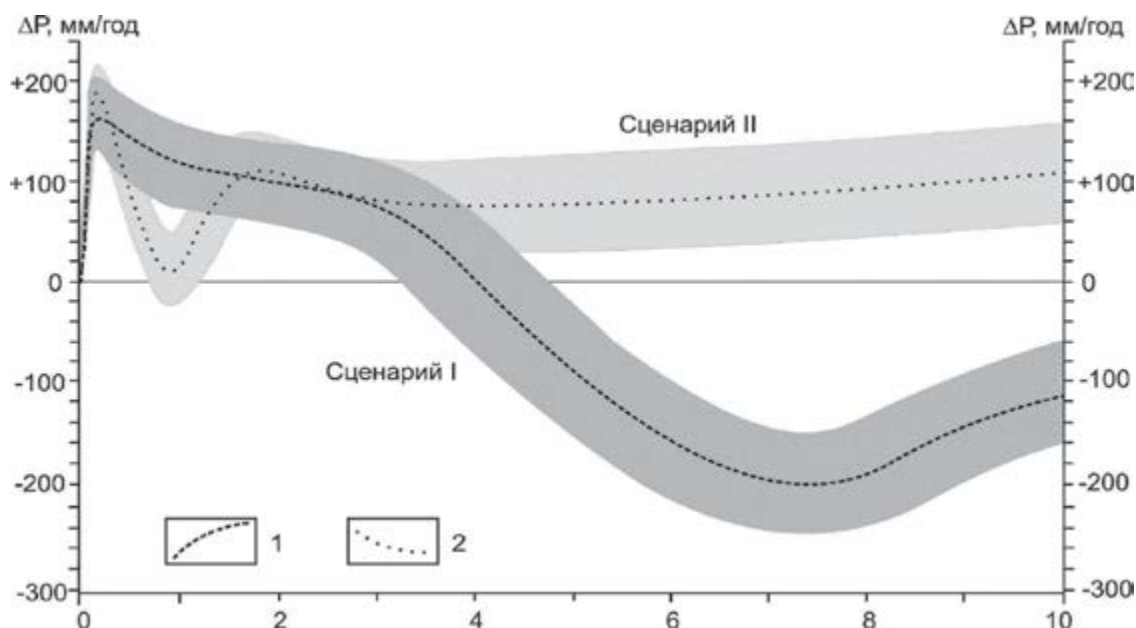


Рис. 1. Вероятные изменения среднегодовой суммы осадков в районе размещения ПГЗ ЖРО «Северский» (в отклонениях от современной величины). Сценарий I — прекращение антропогенного потепления и возврат к естественному тренду похолодания; сценарий II — дальнейшее потепление под воздействием парникового эффекта

воздействия разрушающего события. Полный набор сценариев представляет полный диапазон возможных будущих состояний системы захоронения на основе полного списка ОСП.

Таким образом, «Отчет об ОСП» представляет собой анализ полного международно одобренного списка [7] на предмет уровня их значимости для ПГЗ ЖРО вообще и для каждого конкретного в частности. В «Отчете о процессах» рассматриваются факторы типа «процесс» более детально, с прицелом на разработку или развитие математических моделей. А «Отчет об эволюции» представляет собой набор разработанных сценариев, учитывающих изменение параметров системы захоронения РАО.

Развитие моделей и расчетные исследования

Обоснование долговременной безопасности ПГЗ ЖРО не может обходиться без использования модельных расчетов, это обусловлено длительностью периодов потенциальной опасности захороненных РАО. Моделирование при этом имитирует реальные процессы, протекающие в системе захоронения. Наиболее существенная часть процессов связана с геофильтрацией и миграцией компонентов отходов в геологической среде. Для моделирования таких процессов разработан программный продукт GeRa [10], который позволяет (1) учитывать такие особенности, как влияние поверхностной гидрологии и изменения гидрологических режимов, что обеспечивает возможность проводить расчеты для различных сценариев климатической эволюции региона, а также учитывать некоторые аспекты антропогенной деятельности; (2) учитывать воздействие быстрых каналов и других нарушений геологической среды, что полезно при выполнении расчетов для различных сценариев геологического развития и внешнего воздействия, приводящих к такого рода нарушениям; (3) учитывать химические процессы, что позволяет оценивать параметры задержки радионуклидов в зависимости от характерных для них сорбционных процессов.

При выполнении работ по анализу безопасности системы захоронений ряд из них свелся к моделированию вертикальных перетоков между горизонтами, например по стволу скважины или по нарушению сплошности водоупора. Оценивалось наличие пространственных областей с градиентом напоров, способствующих формированию вертикальных перетоков, а также влияние нарушений уплотнителя в скважинах или водоупорах на формирование вертикальной миграции. Полученные на основе выполненных расчетов результаты позволяют сделать вывод, что для гидрогеологической системы ПГЗ ЖРО полигон «Северный» не характерно формирование вертикальных перетоков выше II водоносного горизонта. На рис. 2 представлен пример восходящего движения жидкости по сквозной

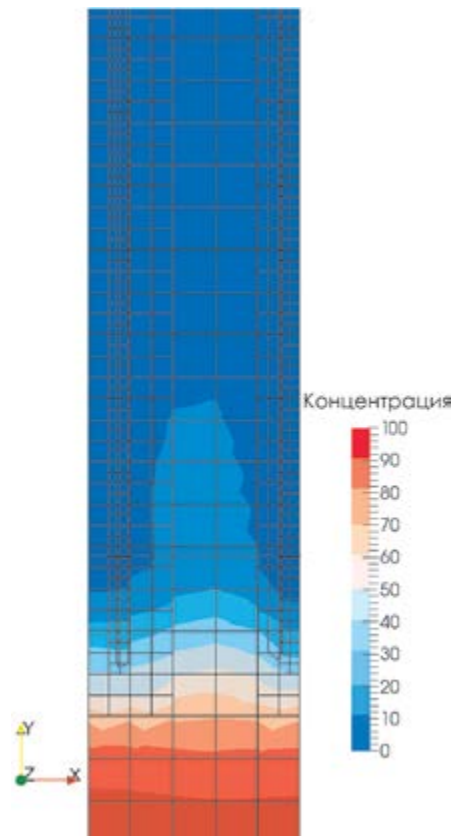


Рис. 2. Фрагмент распределения концентрации при разгерметизации скважины с потенциальной возможностью вертикального перетока на момент времени, равный 2700 лет

разгерметизированной скважине. Примерно через 2700 лет несорбируемые компоненты раствора достигнут 15 м, что незначительно при мощности пластов до буферного горизонта >150 м.

Для выполнения расчетно-прогностического моделирования для конкретного объекта расчетный код должен быть откалиброван под реальные условия ПГЗ ЖРО, то есть должна быть построена параметрическая модель конкретного объекта. Для полигона «Северный» разработана специальная модель ГЕОПОЛИС [11], которая проходит процедуру аттестации в экспертном совете при Ростехнадзоре. При калибровке модели определяются границы модели и задаются граничные условия, геологическая модель (структурная и петрофизические характеристики с неоднородностями) [12], гидрогеологические характеристики, геохимическая модель для обоснования сорбционных характеристик.

Совершенно очевидно, что расчетные оценки подвержены влиянию неопределенности, даже если отбросить ее сценарную составляющую. При выполнении модельного расчета на первый план выходят неопределенности, связанные с ошибками прямых измерений и неточностями методик непрямого оценивания, использованием математических аппроксимаций при моделировании

процессов, неточностью характеристик материалов и их пространственного распределения и т. д. Полностью исключить присутствие неопределенностей невозможно. Поэтому разработан метод сквозного анализа неопределенности выходного результата к уровню неопределенности реально измеряемых данных, в которой учитывается многоэтапность процесса моделирования. Этот подход продемонстрирован на примере выполнения геомиграционного моделирования в условиях неопределенности параметров модели [9].

Крупномасштабные экспериментальные исследования

С целью улучшения качества параметризации моделей ПГЗ ЖРО и аргументированного обоснования концепций закрытия ПГЗ ЖРО необходимо выполнить дополнительные исследования: деградации конструктивных элементов скважин (металлических, бетонных) в условиях ПГЗ ЖРО, изменений характеристик ПГЗ ЖРО за период эксплуатации; влияния микробиологических сообществ (при их наличии) на процессы в ПГЗ ЖРО; образования коллоидов и коллоидному переносу. Детальные программы этих исследований были сформированы при выполнении аналитических исследований и анализе пробелов.

На полигоне «Северный» были выполнены натурные исследования по доизучению площадки, включавшие геодинамические и сейсмические наблюдения, а также гидрогеологические работы в зоне Правобережного тектонического нарушения (ПТН).

Геодинамические и сейсмические наблюдения проводились с использованием наземных геодезических измерений, спутниковых методов и сейсмологических наблюдений по малоапертурной сети. В результате наблюдений и последующих расчетов в пределах площадки размещения ПГЗ ЖРО полигон «Северный» активных тектонических нарушений не выявлено.

Гидрогеологические работы состояли из проведения режимных наблюдений за подземными водами с установлением связи уровней воды в скважинах с атмосферным давлением, лунными приливами, геодинамическими процессами. Выполненные работы показывают, что режим подземных вод приподнятого блока и третьего («буферного») водоносного горизонта на опущенном блоке носит естественный ненарушенный характер. Основным фактором, определяющим локальные изменения уровня (в течение часов и суток) и тренды (в течение недель и месяцев), является атмосферное давление. Влияния длительных нагнетаний ЖРО в первый и второй водоносные горизонты на третий («буферный») водоносный горизонт опущенного блока и на приподнятый блок по результатам наблюдений не выявлено.

Другим направлением гидрогеологических работ было выполнение кустовых откачек (4 куста) с

использованием гидропрослушивания зоны ПТН на участке между разгрузочным контуром второго горизонта и створом наблюдательных скважин приподнятого блока. Результаты кустовых откачек не показали гидравлической связи между водоносными горизонтами, развитыми на восточном и западном крыльях ПТН.

Проблема закрытия ПГЗ ЖРО

В соответствии с требованиями МАГАТЭ концепция закрытия ПГЗ ЖРО должна формироваться на этапе его проектирования. Но при проектировании, строительстве и даже эксплуатации ПГЗ ЖРО проблема их закрытия детально не рассматривалась, кроме общего понимания, что нагнетательные скважины будут загерметизированы и некоторое время будет проводиться мониторинг распространения компонентов отходов. Отсутствие детальной проработки закрытия ПГЗ ЖРО было одним из существенных замечаний группы экспертов МАГАТЭ. С их точки зрения, это не позволяет полностью выполнить мероприятия по обоснованию долговременной безопасности. Следует отметить, что в существующих проектных материалах на полигоны имеется раздел, посвященный концепции закрытия, выполненный в соответствии с требованиями федеральных норм и правил в области использования атомной энергии НП-055-14, НП-058-14. В разработанной по замечаниям «Программе расчетно-экспериментальных исследований по обоснованию и оценке долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов» предусмотрен раздел, посвященный работам по детальной проработке закрытия объектов. В рамках этого раздела предполагаются базовые исследования, посвященные (1) анализу тампонажных материалов и конструкций; (2) разработке и апробации технических решений по тампонированию скважин; (3) разработке концепции организации долговременного мониторинга.

Результатом исследовательских работ (лабораторных и расчетных) будет выбор материалов для тампонирования скважин, для сооружения конструкций, наиболее устойчивых к деградации, в условиях техногенно измененной вследствие взаимодействия с ЖРО геологической среды.

Долговременный мониторинг будет проводиться на обоснованной системе наблюдательных скважин, разработанной так, чтобы, с одной стороны, минимизировать вмешательство в геологическую среду, а с другой — не пропустить возможные признаки распространения компонент ЖРО. Кроме системы скважин, предполагается развитие и использование не нарушающих геологическую среду технологий мониторинга.

Кроме того, запланировано изучение возможности создания инженерных (химических) противомиграционных барьеров в дополнение к естественным геологическим барьерам,

ограничивающим миграцию радионуклидов в местах захоронения ЖРО. Функционирование химических противомиграционных барьеров основано на формировании устойчивых в условиях среды новообразований, удерживающих радионуклиды. Необходимость реализации такого рода мероприятий будет анализироваться по результатам мониторинга в период ведомственного контроля.

В целях обоснования безопасности ПГЗ ЖРО в течение дополнительного срока эксплуатации на всех объектах было проведено комплексное инженерно-радиационное обследование скважин, в результате которого выявлены элементы, требующие ремонта или замены. Была разработана программа продления эксплуатации ПГЗ ЖРО сверх назначенных сроков, реализация которой направлена на ликвидацию дефектных скважин, ремонту зданий и сооружений, а также ремонту и замене систем и элементов важных для безопасности. Срок эксплуатации ПГЗ ЖРО продлен до 2023 года с учетом результатов реализации мероприятий программы. Эти мероприятия можно рассматривать в том числе и как практические действия по первоочередным работам, направленным на закрытие объектов.

Заключение

В заключение необходимо отметить, что миссия МАГАТЭ по оценке соответствия российской технологии подземного захоронения ЖРО требованиям по безопасности МАГАТЭ стала уникальным для обеих сторон опытом масштабного рассмотрения так называемых «существующих установок захоронения», которые были разработаны, сооружены и введены в эксплуатацию до установления требований [3] и, следовательно, не могли отвечать этим требованиям в полной мере.

По полученным рекомендациям и замечаниям миссии МАГАТЭ выполнено более 25 частных НИР, разработано более 5 программ экспериментальных исследований. Идет работа по подготовке серии документов для обоснования долговременной безопасности в соответствии с международными стандартами. Начата корректировка концепции закрытия ПГЗ ЖРО и проработка отдельных технологий по ликвидации скважин.

Выполняемые мероприятия по обоснованию безопасности ПГЗ ЖРО, которые как объекты захоронения уже существовали на момент принятия требований по обращению с РАО в МАГАТЭ, позволят привести практику реализации и документирования этих работ в соответствие с международными стандартами безопасности.

Литература

1. Рыбальченко А. И., Пименов М. К., Костин П. П. и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. — М.: ИзДАТ, 1994. — 256 с.
2. Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования безопасности № SSR-5. Нормы МАГАТЭ по безопасности. — МАГАТЭ, Вена, 2011. — 104 с.
3. SSG-14. Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste: IAEA Safety Standards Series. — 2011.
4. SSG-23. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste: IAEA Safety Standards Series. — 2012.
5. SSG-31. Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities: IAEA Safety Standards Series. — 2014.
6. Линге И. И., Уткин С. С., Хамаза А. А., Шарфутдинов Р. Б. Опыт применения международных требований по обоснованию долговременной безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов: проблемы и уроки // Атомная энергия. — 2016. — Вып. 120. — С. 201–208.
7. NEA International FEP Database : Version 2.1 User Guide, Nuclear Energy Agency.
8. Савельева Е. А., Свительман В. С. Методология и практические решения обращения с неопределенностями при обосновании безопасности пунктов захоронения РАО // Вопросы радиационной безопасности. — 2016. — № 2. — С. 3–14.
9. Савельева Е. А., Свительман В. С., Уткин С. С. Учет неопределенности в задачах геомиграционного моделирования при анализе и обосновании безопасности пунктов захоронения РАО // Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях: Сб. тезисов X Российской науч. конф. — Москва-Обнинск, 22–25 сентября, 2015. — С. 65–66.
10. I. Konshin, I. Kapyrin. Scalable Computations of GeRa Code on the Base of Software Platform INMOST // Lecture notes in computer science. — Vol. 10421. V. Malyshkin (Ed.): PaCT 2017. — P. 433–445.— URL: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-62932-2_42.pdf
11. Иванов В. А., Капырин И. В., Расторгуев А. В. и др. Расчетный комплекс ГЕОПОЛИС для обоснования безопасности пункта захоронения РАО // Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях: Сб. тезисов X Российской науч. конф. — Москва-Обнинск, 22–25 сентября, 2015. — С. 62–63.
12. Савельева Е. А., Сускин В. В., Расторгуев А. В., Понизов А. В. Моделирование литологической неоднородности осадочного пласта в районе пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов // Горный журнал. — 2015. — № 10. — С. 21–25.

Информация об авторах

Дорофеев Александр Николаевич, кандидат технических наук, руководитель проектного офиса «Формирование единой государственной системы обращения с РАО», Госкорпорация «Росатом» (119017, Москва, ул. Большая Ордынка, 24), e-mail: ANDorofeev@rosatom.ru.

Савельева Елена Александровна, кандидат физико-математических наук, заведующая лабораторией, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: esav@ibrae.ac.ru.

Уткин Сергей Сергеевич, доктор технических наук, заведующий отделением, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: uss@ibrae.ac.ru.

Понизов Антон Владимирович, начальник отдела, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5), e-mail: ronizov@secnrs.ru.

Шарафутдинов Рашет Борисович, кандидат технических наук, заместитель директора, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5), e-mail: charafoutdinov@secnrs.ru.

Кудрявцев Евгений Георгиевич, кандидат химических наук, начальник управления, Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (109147, Москва, ул. Таганская, д. 34, стр. 1), e-mail: egkudryavtsev@gosnadzor.ru.

Пронь Игорь Александрович, заместитель директора, ФГУП «НО РАО», (119017, Москва, ул. Пятницкая, д. 49А, стр. 2), e-mail: iapron@nora.o.ru.

Коновалов Владимир Юрьевич, начальник отдела, ФГУП «НО РАО» (119017, Москва, ул. Пятницкая, д. 49А, стр. 2), e-mail: vykonovalov@nora.o.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Дорофеев А. Н., Савельева Е. А., Уткин С. С., Понизов А. В. и др. Эволюция обоснования долговременной безопасности ПГЗ ЖРО // Радиоактивные отходы. — 2017. — № 1. — С. 54—63.

EVOLUTION IN THE SAFETY CASE FOR LIQUID RADIOACTIVE WASTE GEOLOGICAL REPOSITORIES

Aleksandr N. Dorofeev

State Corporation Rosatom, Moscow, Russian Federation

Elena A. Saveleva, Sergey S. Utkin

Nuclear Safety Institute, Moscow, Russian Federation

Anton V. Ponizov, Rashed B. Sharafutdinov

Federal State-Funded Institution Scientific and Engineering Center of Nuclear and Radiation Safety,
Moscow, Russian Federation

Evgeniy G. Kudryavtsev

Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision, Moscow, Russian Federation

Igor A. Pron, Vladimir Yu. Kononov

The Federal State Unitary Enterprise «National Operator for Radioactive Waste Management»,
Moscow, Russian Federation

Article received 26 September 2017

The paper considers the steps taken to upgrade the Long-Term Safety Case for Liquid Radioactive Waste Geological Repository (LRWGR) with due account of relevant international standards. The discussed activities are based on analytical and experimental studies aiming to decrease the uncertainties associated with the input data and to increase the reliability of scenarios describing LRWGR evolution. This work also involves the development of closure concepts for such facilities in line with current regulatory framework in the field of atomic energy use.

Keywords: LRWGR, long-term safety, safety case, closure of the LRWGR, IAEA, standards.

References

1. Rybal'chenko A. I., Pimenov M. K., Kostin P. P. *i dr.* Glubinnoe zahoroneniye zhidkih radioaktivnykh othodov. — M.: Izdat, 1994. — 256 s.
2. Zahoroneniye radioaktivnykh othodov. Konkretnye trebovaniya bezopasnosti № SSR-5. Normy MAGATEH po bezopasnosti. — MAGATEH, Vena, 2011. — 104 s.
3. SSG-14. Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste: IAEA Safety Standards Series. — 2011.
4. SSG-23. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste: IAEA Safety Standards Series. — 2012.
5. SSG-31. Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities: IAEA Safety Standards Series. — 2014.
6. Linge I. I., Utkin S. S., Hamaza A. A., Sharafutdinov R. B. Opyt primeneniya mezhdunarodnykh trebovanij po obosnovaniyu dolgovremennoj bezopasnosti punktov zahoroneniya radioaktivnykh othodov: problemy i uroki // Atomnaya ehnergiya. — 2016. — Vyp. 120. — S. 201–208.
7. NEA International FEP Database : Version 2.1 User Guide, Nuclear Energy Agency.
8. Saveleva E. A., Svitelman V. S. Metodologiya i prakticheskie resheniya obrashcheniya s neopredelennostyami pri obosnovanii bezopasnosti punktov zahoroneniya RAO // Voprosy radiacionnoj bezopasnosti. — 2016. — № 2. — S. 3–14.
9. Saveleva E. A., Svitelman V. S., Utkin S. S. Uchet neopredelennosti v zadachah geomigracionnogo modelirovaniya pri analize i obosnovanii bezopasnosti punktov zahoroneniya RAO // Radiacionnaya zashchita i radiacionnaya bezopasnost' v yadernykh tekhnologiyah: Sb. tezisov H Rossijskoj nauch. konf. — Moskva-Obninsk, 22–25 sentyabrya, 2015. — S. 65–66.
10. I. Konshin, I. Kapyrin. Scalable Computations of GeRa Code on the Base of Software Platform INMOST // Lecture notes in computer science. — Vol. 10421. V. Malyshev (Ed.): PaCT 2017. — P. 433–445.— URL: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-319-62932-2_42.pdf.
11. Ivanov V. A., Kapyrin I. V., Rastorguev A. V. *i dr.* Raschetnyj kompleks GEOPOLIS dlya obosnovaniya bezopasnosti punkta zahoroneniya RAO // Radiacionnaya zashchita i radiacionnaya bezopasnost' v yadernykh tekhnologiyah: Sb. tezisov

И Россиjsкой науч. конф. — Москва-Обнинск, 22–25 сентября, 2015. — С. 62–63.
12. *Saveleva E. A., Suskin V. V., Rastorguev A. V., Ponizov A. V.* Modelirovanie litologicheskoy neodno-

rodnosti osadochnogo plasta v rajone punkta glubinnogo zahoroneniya zhidkih radioaktivnyh othodov // Gornyj zhurnal. — 2015. — № 10. — С. 21–25.

Information about the authors

Dorofeev Aleksandr Nikolaevich, PhD, Head of the Project Office on the Development of a Unified Radioactive Waste Management System, State Corporation Rosatom (24, Bolshaya Ordynka St., Moscow, 119017), e-mail: ANDorofeev@rosatom.ru

Saveleva Elena Aleksandrovna, PhD, Head of Laboratory, Nuclear Safety Institute (52, Bolshaya Tulsкая St., Moscow, 115191), e-mail: esav@ibrae.ac.ru

Utkin Sergey Sergeevich, Doctor of Technical Sciences, Head of Department, Nuclear Safety Institute (52, Bolshaya Tulsкая St., Moscow, 115191), e-mail: uss@ibrae.ac.ru

Ponizov Anton Vladimirovich, Head of Office, Federal State-Funded Institution Scientific and Engineering Center of Nuclear and Radiation Safety (5, 2/8, Malaya Krasnoselskaya St., Moscow, 107140), e-mail: ponizov@secnrs.ru

Sharafutdinov Raset Borisovich, PhD, Deputy Director of Federal State-Funded Institution Scientific and Engineering Center of Nuclear and Radiation Safety (5, 2/8, Malaya Krasnoselskaya St., Moscow, 107140), e-mail: charafoutdinov@secnrs.ru

Kudryavtsev Evgeniy Georgievich, PhD, Head of Department, Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision (1, 34, Taganskaya St., Moscow, 109147), e-mail: egkudryavtsev@gosnadzor.ru

Pron Igor Aleksandrovich, Deputy Director, The Federal State Unitary Enterprise «National Operator for Radioactive Waste Management» (2, 49A, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017), e-mail: iapron@norao.ru

Konovalov Vladimir Yurievich, Head of Department, The Federal State Unitary Enterprise «National Operator for Radioactive Waste Management» (2, 49A, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017), e-mail: vykonovalov@norao.ru

Bibliographic description

Dorofeev A. N., Saveleva E. A., Utkin S. S., Ponizov A. V. et al. Evolution in the Safety Case for Liquid Radioactive Waste Geological Repositories // Radioactive Waste. — 2017. — № 1. — pp. 54–63. (In Russian).