DOI: 10.25283/2587-9707-2020-2-85-98 УДК: 621.039

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕШЕНИЙ ПО ЗАХОРОНЕНИЮ РАО И ВЫВОДУ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ: ТЕНДЕНЦИИ, ПОТРЕБНОСТИ, ВОЗМОЖНОСТИ

И. И. Линге[1], С. С. Уткин[1], В. С. Свительман[1], С. А. Дерябин[2]

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

[2]Госкорпорация «Росатом», Москва

Статья поступила в редакцию 9 апреля 2020 г.

В статье обсуждаются вопросы расчетного обоснования безопасности и оптимизации решений при захоронении радиоактивных отходов и выводе из эксплуатации объектов завершающих стадий ядерного топливного цикла. Показаны потребности отрасли в современных отечественных программных средствах и рассмотрены соответствующие возможности разрабатываемой системы расчетных кодов, а также потенциал ее развития в свете современных трендов информационных технологий.

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, обоснование безопасности, расчетные коды, численное моделирование, захоронение РАО, вывод из эксплуатации.*

Предпосылки

Разработка и внедрение отечественных расчетных средств, в том числе кодов или программ для ЭВМ [1], является в настоящее время одной из стратегических задач создания импортонезависимых российских технологий.

Расчетные исследования являются ключевым и зачастую единственным инструментом для получения оценок безопасности в области обращения с РАО [2]. Это связано с тем, что, из-за сложности рассматриваемых систем и количества влияющих на безопасность процессов, в ряде случаев релевантные эксперименты либо в принципе невозможны, либо возможность получения экспериментальных данных существенно ограничена (требует большого количества времени и ресурсов).

Таким образом, объективное увеличение количества объектов завершающих стадий ядерного топливного цикла (ЯТЦ), по которым разрабатываются проекты по выводу из эксплуатации и в связи с этим ставятся новые задачи обоснования безопасности и эффективности выбранных решений по кондиционированию и захоронению РАО, уже само по себе обуславливает необходимость разработки и внедрения новых расчетных кодов.

Дополнительно следует принимать во внимание, что в 2018 г. в федеральный закон «Об использовании атомной энергии» [3] были внесены существенные изменения, устанавливающие необходимость государственной аттестации программ для ЭВМ, если они применяются для

обоснования безопасности объектов использования атомной энергии. В этой связи положения нормативных документов, например [4—6], приобретают расширенную трактовку — в виде рамочных требований к системе расчетно-аналитического и экспериментального обоснования долговременной безопасности.

Еще один фактор — это планомерный процесс гармонизации федеральной нормативной базы с международными требованиями и рекомендациями. Так, весьма значимые для целей настоящей статьи и до сих пор в полной мере не вошедшие в отечественную практику обоснования безопасности принципы формирования доверия к ее результатам и построения развернутой системы аргументации [7] частично находят отражение, например, в пп. 249, 250, 253 «Требований к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности ПГЗРО» [6], где указывается на необходимость использования различных моделей и методов, учета неопределенностей и т. д.

Очевидно, что следует ожидать введения требований соответствующего уровня детальности в практику обоснования долговременной безопасности и для иных ПЗРО, в том числе специфических (например, содержащих реакторный графит), а также объектов ядерного наследия в статусе пунктов консервации и захоронения РАО.

Уже сейчас расширенная линейка международных рекомендаций внедряется, в частности, для ПГЗ ЖРО в рамках реализации «Программы расчетно-экспериментальных исследований...», утвержденной Госкорпорацией «Росатом» и Ростехнадзором в целях установления соответствия российских подходов и процедур по обоснованию долговременной безопасности ПГЗ ЖРО международным стандартам [8], что подразумевает в том числе аргументированный анализ влияния на безопасность порядка 250 категорий особенностей, событий и процессов [9] (и это значение как минимум удваивается при переходе к рассмотрению отдельных факторов, значимых для конкретного проекта захоронения).

Практическая реализация всей совокупности требований предполагает наличие специфических программных средств, которые будут обеспечивать моделирование всех значимых процессов, комплексность анализа, адекватный учет неопределенностей, в том числе связанных с конструкцией объекта, состоянием инженерных барьеров и геологической среды. Также существенна оперативная адаптация к вновь получаемым данным (результатам экспериментов, мониторинга, уточнения геометрии конструкций, например, методами лазерного сканирования и т. д.).

Все перечисленное формирует соответствующий запрос отрасли на программные средства, удовлетворяющие нормативным требованиям по принципу «на шаг впереди» и функциональным потребностям для решения наиболее важных из практических задач, определенных Госкорпорацией «Росатом» и научным сообществом в областях обеспечения долговременной безопасности при обращении с РАО [10, 11].

Специфика задач численного моделирования для оценки безопасности ПГЗРО

Мировой опыт свидетельствует [12—15], что создание ПГЗРО — это чрезвычайно сложная задача, требующая длительной и масштабной работы, в том числе разработки научно-технических основ и инструментария, оптимизации характеристик системы захоронения, оценки и обоснования долговременной безопасности.

Большие временные рамки реализации таких проектов и мультидисциплинарный характер задач делают неизбежным модульный и итеративный подход [16] (рис. 1). Модульность (детализация до более простых подзадач) обеспечивает гибкость и возможность проверки того, что

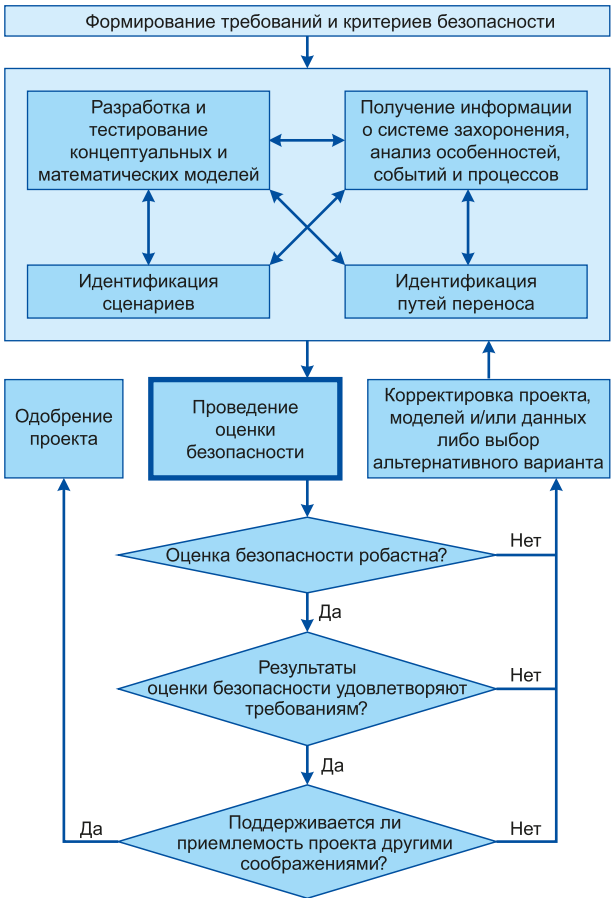

Рис. 1. Схема работы в рамках итеративного подхода к обоснованию безопасности [16]

полученные результаты действительно соответствуют требованиям различных заинтересованных сторон. Итеративность подразумевает, что уровень детализации и доверие к получаемым оценкам безопасности возрастают по мере продвижения от одного этапа к следующему в процессе проведения исследований, накопления необходимой информации, развития моделей и методов и т. д., и в конечном итоге позволяют принять адекватное решение о безопасности и осуществимости проекта.

Обеспечение долговременной безопасности ПГЗРО опирается на принцип многобарьерной защиты, когда удержание радионуклидов в объеме сооружения и замедление их миграции за счет множественных механизмов на различных временных масштабах обеспечивается и вмещающей средой, и элементами системы инженерных барьеров. Общепринятая практика — это определение функций безопасности для каждого элемента системы захоронения и обоснование их выполнения [17].

Естественно, что комбинация функций безопасности, выполняемых отдельными барьерами, для каждого проекта связана с особенностями площадки, принятой концепцией захоронения, критериями приемлемости, требованиями заинтересованных сторон и т. д. и в результате оказывается в какой-то степени уникальной [18].

В связи с тем, что многие из вычислительных задач уже решались не только в аналогичных проектах, но и в смежных областях, очевидно, что этот опыт (а в определенных случаях и соответствующие программные средства) может быть применен, безусловно, с адаптацией к специфике конкретного проекта.

Выбор конкретных программных средств осуществляется исходя из множества факторов. Один из них — подход Best Available Techniques (лучшие доступные технологии), который рекомендуется OECD NEA [19] и Еврокомиссией [20], а также закреплен в регулирующих документах некоторых стран [21, 22] для всех аспектов сооружения и обоснования безопасности ПГЗРО, в том числе и для расчетных кодов.

В контексте расчетных кодов Best Available Technique относится к используемым моделям и численным методам, и в каких-то ситуациях уже имеющееся «лучшее решение» может быть интегрировано в информационную систему «как есть», в виде готового программного средства. Однако зачастую издержки интеграции в систему и адаптации для поставленных задач готового кода оказываются больше, чем затраты (в широком понимании) на разработку нового программного средства, реализующего то же «лучшее решение», но учитывающего необходимость взаимодействия с уже имеющимися расчетными средствами, базами данных и другими элементами информационного окружения проекта создания ПГЗРО.

Все это приводит к тому, что декомпозиция вычислительной задачи получения оценок безопасности на отдельные элементы, осуществляемые в конкретных программных средствах, может быть осуществлена не единственным способом. В табл. 1 приведены уже реализованные примеры такой декомпозиции в некоторых зарубежных проектах.

Таблица 1. Расчетные коды, использованные в некоторых зарубежных проектах ПГЗРО [23—25]

Posiva [23]	SKB [24]	NAGRA [25]
Оценка характеристик РАО		
ORIGEN-S	Ecolego	STMAN (SPENT, STRENG, STALLION)
Процессы в ИББ		
CODE_BRIGHT, PHREEQC, TOUGHREACT (TOUGH2), REPCOM, GoldSim RT	Comsol Multiphysics, PHREEQC, PHAST, Ecolego	STMAN (SPENT, STRENG, STALLION), VPAC
Гидрогеологические процессы		
ConnectFlow, COMSOL Multiphysics, FASTREACT, PHREEQC, FTRANS, MARFA	DarcyTools, Ecolego	VPAC, PICNIC
Теплоперенос и напряженно-деформированное состояние		
3DEC, Fracod2D, ABAQUS, PASULA, ANSYS	3DEC, ADINA	
Анализ неопределенности и чувствительности		
GoldSim	Ecolego	-
Биосфера и расчет доз		
ArcGIS, Pandora (MATLAB), Ecolego, ERICA	ArcGIS, Ecolego, MIKE SHE	TAME, SwiBAC

В рамках обоснования безопасности российского ПГЗРО в части расчетных оценок безопасности специальной комплексной программой исследований [26] зафиксированы направления исследовательских работ по созданию следующих моделей:

- выхода радионуклидов (изменения свойств материалов РАО);
- фильтрации подземных вод и миграции радионуклидов в системе инженерных барьеров безопасности (ИББ) и геологической среде;
- напряженно-деформированного состояния массива и системы ИББ;
- изменения геологических условий и развития геологических процессов на долгосрочную перспективу;

- эволюции материалов ИББ;
- радиационного воздействия на население и окружающую среду;
- долгосрочных изменений гидрологических, гидродинамических и гидрогеохимических условий, природно-ландшафтных характеристик и климата района размещения объекта, а также жизнедеятельности человека и биоты.

Укрупненно взаимосвязь перечисленных моделей проиллюстрирована на рис. 2. На рис. 3 приведен пример более детального рассмотрения в части моделей процессов, относящихся к ближней зоне ПГЗРО.

Отдельно следует отметить, что интегральное моделирование всех процессов, влияющих на безопасность ПГЗРО, все еще является вызовом для научно-технического сообщества [27].

Частично это связано с потребностью в более глубоком понимании многообразия физических, химических и биологических процессов, влияющих на распространение радионуклидов, а также необходимостью проведения многовариантных расчетов при формировании различных сценариев долговременной эволюции ПГЗРО и варьирования значений входных параметров для получения оценок неопределенности и чувствительности.

Основная сложность проведения взаимосвязанных расчетов обусловлена широким физическим (от микрометров — для описания локальных

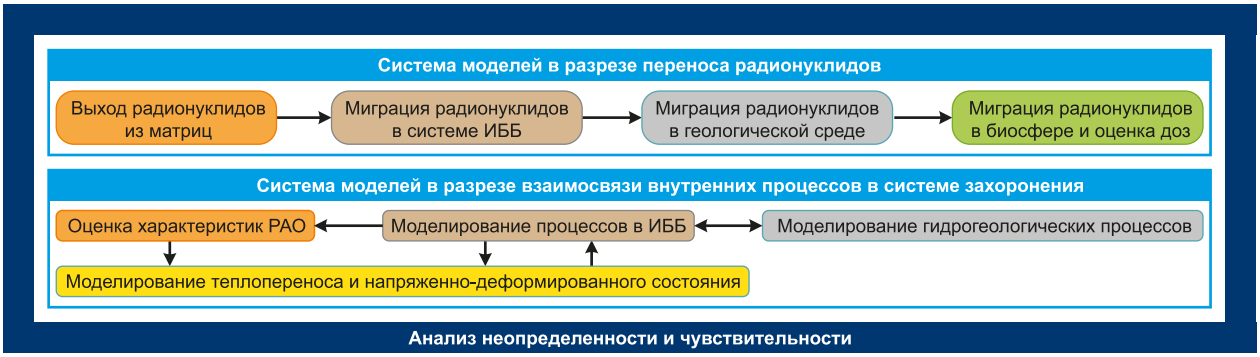

Рис. 2. Взаимосвязь моделей для обоснования долговременной безопасности ПГЗРО

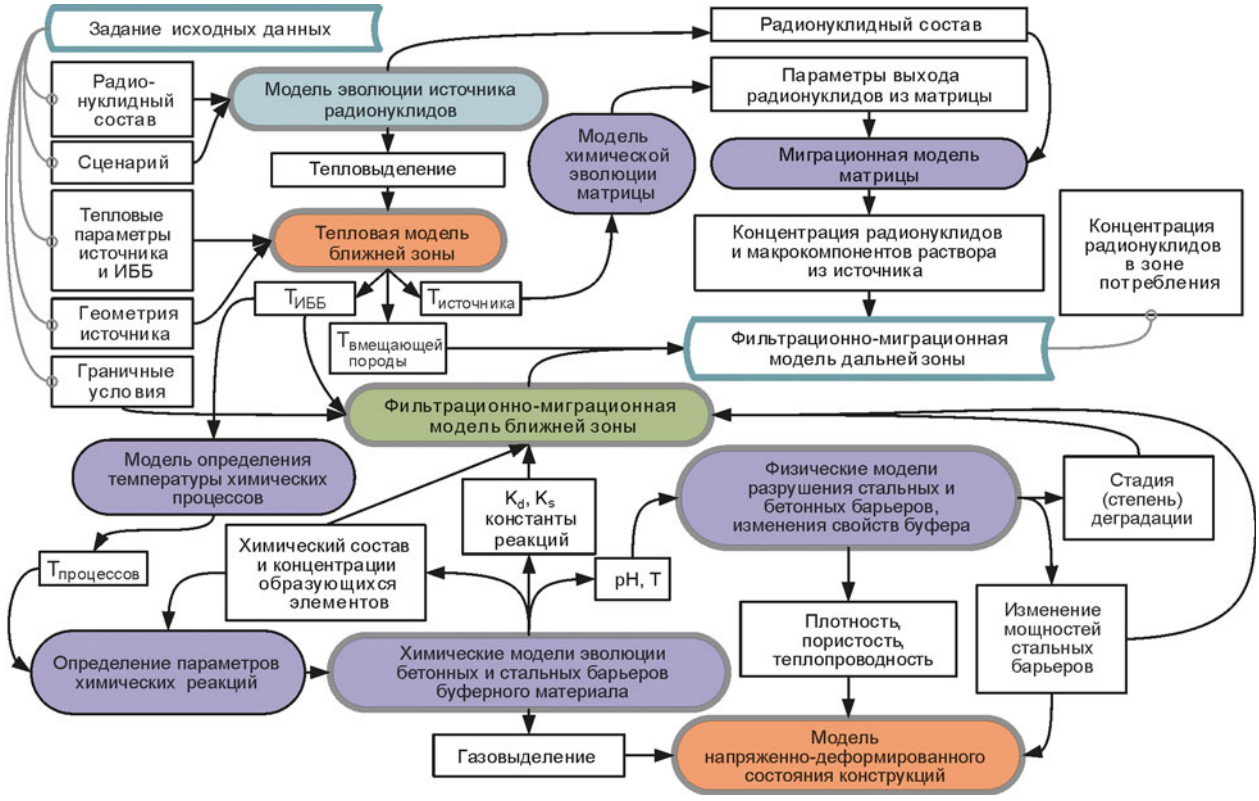

Рис. 3. Пример взаимосвязи моделей процессов в ближней зоне ПГЗРО

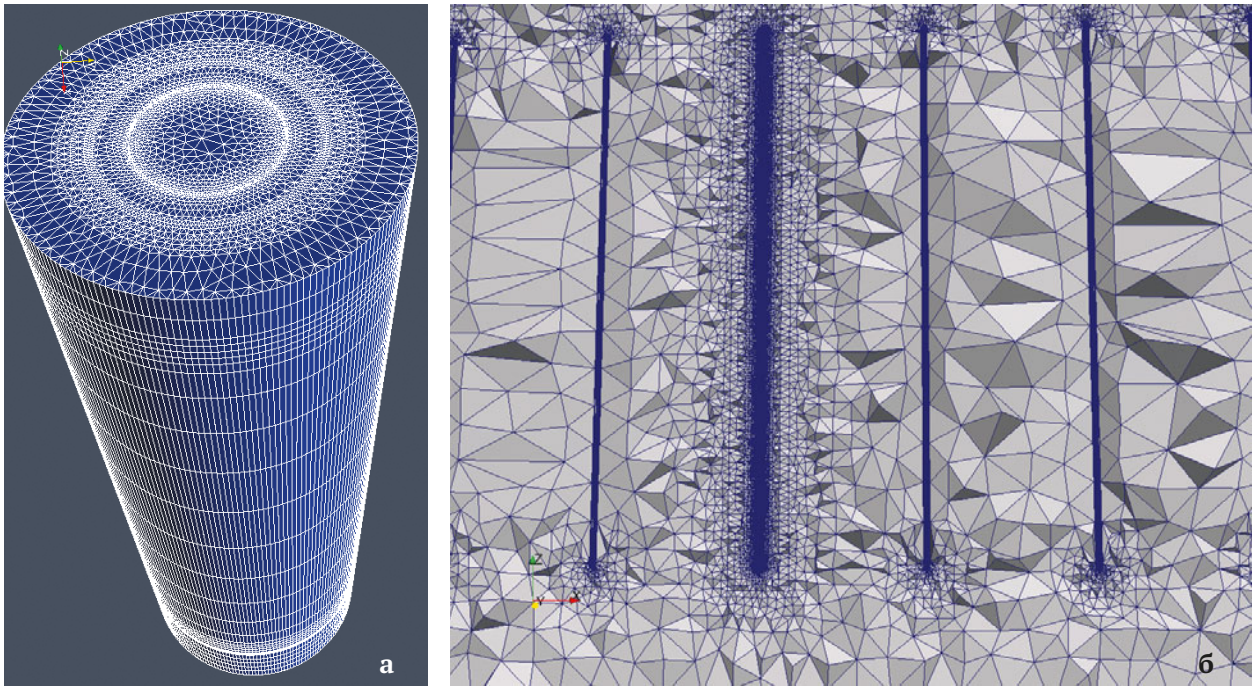

Рис. 4. Сеточное представление изолирующего контейнера (а) и фрагмента участка пункта захоронения, содержащего ряд скважин для размещения упаковок ВАО (б)

процессов коррозии, радиолиза, других химических и биологических реакций, до километров — для описания долговременного распространения радионуклидов в геологической среде) и временным диапазонами (от десятков до миллионов лет).

Так, например, сеточное разбиение для представления одного изолирующего контейнера содержит порядка 600 тысяч конечных элементов (рис. 4а), а для представления ПГЗРО НКМ (рис. 4б), содержащего 462 скважины для размещения РАО, даже в упрощенном виде (с подробно представленной одной скважиной и грубым разбиением остальных) необходима сетка из более 30 миллионов ячеек.

Хотя в рамках итеративного подхода к обоснованию безопасности на ранних этапах допускается, и даже рекомендуется использовать простые модели и доступные расчетные средства, в дальнейшем для учета всех специфичных для проекта факторов, помимо точных исходных данных, становятся необходимы детализированные трехмерные модели, реализованные в современных прецизионных расчетных программах. В этом случае зачастую разработка собственных программных средств на основе хорошо зарекомендовавших себя расчетных методов оказывается более гибким и эффективным подходом, чем доработка кодов, применявшихся в аналогичных проектах или смежных областях.

Потребности в расчетных оценках в задачах вывода из эксплуатации (ВЭ)

Еще один специфический и обширный класс задач, в котором формируется запрос на современные расчетные средства, связан с оптимизацией решений по выводу ядерно и радиационно опасных объектов (ЯРОО) из эксплуатации. В настоящее время на этот вопрос обращается все более пристальное внимание в международном сообществе. Среди причин такого интереса, в частности, большое количество объектов на завершающих стадиях ЯТЦ, требования к планированию решений по ВЭ уже на стадии проектирования новых объектов, прецеденты преждевременной инициации проектов ВЭ [28].

Проработка практических решений включает в себя [29—31] радиологическую характеризацию текущей ситуации, оптимизацию сценария демонтажа объекта, оценку радиационного воздействия на человека и биоту, вопросы повторного использования радиационно загрязненных металлов в атомной промышленности.

Потребности в численном моделировании для задач вывода из эксплуатации схематично отражены на рис. 5.

Разрабатываемая система кодов

До последнего времени для задач обоснования радиационной и экологической безопасности

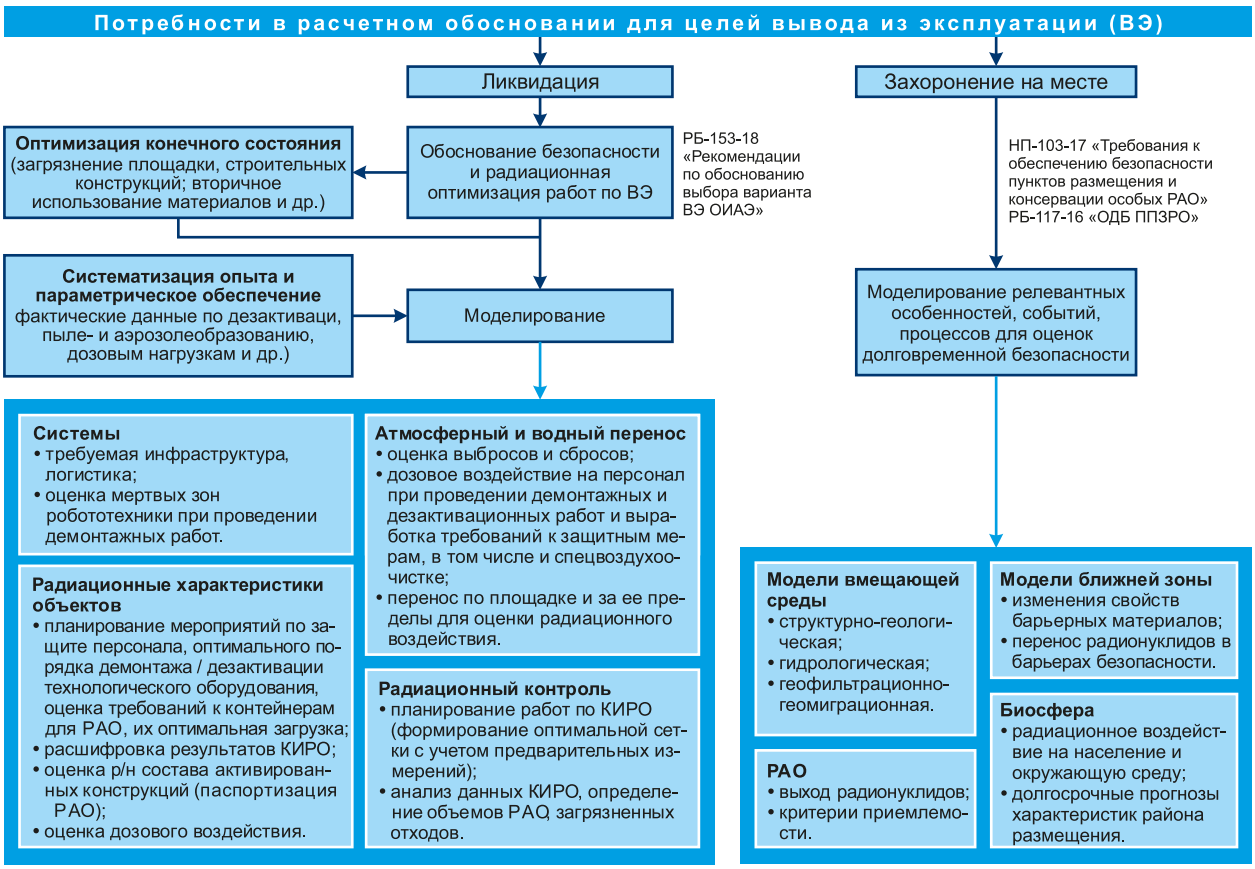

Рис. 5. Потребности в расчетных средствах для задач оптимизации решений по выводу из эксплуатации

в основном использовались зарубежные программные средства, например: камерные модели Amber, Ecolego — для прогнозирования миграции радионуклидов в геосфере и эффективности физических барьеров безопасности; трехмерные коды Modflow, TOUGH2 и др. — для гидрогеологических расчетов; Microshield — для оценки радиационной обстановки; ANSYS — для прочностных расчетов, HEC-RAS — для моделирования гидрологических процессов и т. д.

В перечне аттестованных программных средств Ростехнадзора на сегодняшний день менее 3% от общего количества имеют отношение к обоснованию безопасности объектов ядерного наследия и ПЗРО, а также задачам в области заключительной стадии жизненного цикла (ЗСЖЦ) [32].

В 2014—2015 гг. в рамках выделения приоритетов развития науки и техники научно-техническими советами Госкорпорации «Росатом» (в частности, применительно к рассматриваемым вопросам — заседание НТС № 10 от 12.03.2015) были определены актуальные тренды в создании программных средств и математических моделей, в их числе:

- разработка детализированных трехмерных моделей для объектов использования атомной энергии в целом;
- создание программных средств для проведения расчетов оценки безопасности на основе фактических данных;
- интеграция крупномасштабных расчетных комплексов и моделей с системой автоматического проектирования (САПР);
- разработка расчетных методов для оптимизации вычислительного процесса (параллельные вычислительные алгоритмы, адаптивные неструктурированные сетки).

Необходимость учета этих тенденций в разработке программного обеспечения для задач обоснования долговременной безопасности была заложена в научно-исследовательской работе «Создание практической методологии комплексного обоснования безопасности объектов наследия, пунктов захоронения радиоактивных отходов, включая разработку и внедрение системы кодов и расчетно-прогностических комплексов», которая реализуется начиная с 2016 г.

Разрабатываемая система формирует полный набор современных расчетных кодов (расчетно-прогностических комплексов или РПК) (табл. 2) для обоснования безопасности, которые должны обеспечить совместное моделирование термо-гидро-механических, химических, биологических процессов, влияющих на

Таблица 2. Основные характеристики разрабатываемых расчетных средств

Основные моделируемые особенности, события и процессы
РПК «И» (FENIA): термомеханические процессы в упаковках РАО и ближней зоне ПЗРО [33]
• Объемное и поверхностное тепловыделение; распространение тепла в материалах инженерных барьеров безопасности и геологической среде; упруго-пластическое, термо-упруго-пластическое, вязко-упруго-пластическое деформирование материалов. • Напряженно-деформированное состояние, вызванное тепловым и силовым нагружением, с учетом зависимости свойств материала от температуры. • Влияние распространения тепла на термомеханическое состояние. • Перемещения, скорости, ускорения, деформации, напряжения и внутренние усилия, возникающие в сечениях конструкций и упаковок при силовых и температурных статических и динамических воздействиях. • Собственные и вынужденные колебания конструкций. • Контактное взаимодействие деформируемых поверхностей, изменяемых в процессе нагружения
РПК «Б» (DESTRUCT): инженерно-химические аспекты переноса радионуклидов в ближней зоне, включая инженерные барьеры [34]
• Материалы изолирующего контейнера, их физические, химические и биологические характеристики в момент захоронения. • Механические, тепловые, химико-биологические процессы, оказывающие воздействие на отходы, контейнеры, уплотнители и другие инженерно-технические элементы. • Изменение свойств (плотность, пористость, проницаемость) и целостности матрицы (стекло, цемент и др.). • Миграция радионуклидов через инженерные барьеры безопасности. • Изменение сорбционно-гидроизоляционных, фильтрационных, свойств инженерных барьеров безопасности; влияние термических процессов на скорости химических реакций и физических процессов; влияние порообразования на режимы переноса водной фазы, и вытеснение поровой воды. • Образование и накопление основных дозообразующих радионуклидов. • Поглощение воды буферным материалом (изменение влажности, пористости, расходов транспортной водной среды)
РПК «В» (RELTRAN): распространение радионуклидов в газообразной форме [38]
• Перенос радиоактивных и химических веществ в атмосфере в виде газа, пара, взвеси тонкодисперсных частиц или аэрозолей: конвекция, турбулентность и диффузия; дисперсия; мокрое и сухое осаждение; взвеси в воздухе; ветровой перенос осадочного материала; взаимодействие осадочных отложений, воды и газов в атмосфере. • Утечка газа из контейнера, выброс газов, прохождение газовых потоков через буфер и засыпку. • Многофазовое движение загрязняющих веществ и перенос с газами, газовые потоки в ближней зоне и дальней зоне
РПК «С» (CADAM): перенос загрязнений в поверхностных водоемах [39]
• Поверхностный сток. • Учет рельефа дна и берега, их эрозия. • Стратификация и ветровое перемешивание. • Колебания уровня воды. • Заболоченные территории. • Химический состав поверхностных вод. • Седиментация взвесей, ресуспензия и перенос осадочных отложений
РПК «Д» (КОРИДА): радиационные характеристики ЯРОО, РАО и ОЯТ [35]
• Перенос нейтронного, фотонного и электронного излучений. • Внешнее облучение персонала с учетом эволюции источников и барьеров безопасности, в частности, на этапах работ по демонтажу конструкций ЯРОО и удалению РАО. • Изменение состава материалов при нейтронном облучении за счет активации, деления, трансмутации и радиоактивного распада ядер. • Энерговыделение в процессе выдержки ВАО и ОЯТ. • Характеристики источников излучений в геометрических пределах, ограниченных инженерными барьерами безопасности объекта. • Радиогенная эволюция ближней зоны
РПК «Г» (GeRaV.2): перенос радионуклидов в различных геологических средах [36]
• Фильтрация в напорных и безнапорных, а также ненасыщенных условиях, двухфазная фильтрация (жидкость-газ). • Адвективно-дисперсионно-диффузионный перенос радионуклидов, химически активных и нейтральных примесей в поровых и трещиноватых средах. • Равновесные и кинетические химические взаимодействия в системе раствор-порода. • Радиоактивный распад переносимых нуклидов. • Плотностная конвекция. • Перенос в средах с двойной пористостью. • Течение растворов с переменной вязкостью. • Перенос веществ в коллоидной форме. • Взаимодействие подземных и поверхностных вод. • Сорбция с динамическим коэффициентом распределения
РПК «Н» (MOUSE) [37]: учет неопределенностей в процессе численного моделирования для всех перечисленных расчетных средств

долговременную безопасность [33—36]. Для моделирования процессов в ближней и дальней зоне разрабатываются детальные сеточные модели различных масштабов. Детальный учет барьеров безопасности, матриц захоронения и реальной неоднородной структуры геологической среды означает необходимость вычислений на сеточных моделях, содержащих много миллионов ячеек, поэтому коды активно развиваются в направлениях параллельных вычислительных алгоритмов, адаптивных неструктурированных сеток и использования высокопроизводительных вычислительных систем. В соответствии с международными требованиями и лучшими практиками, разрабатываемые коды позволяют сопровождать моделирование всех процессов анализом чувствительности и неопределенности [37].

Состояние работ по созданию системы расчетных кодов для задач обоснования радиационной и экологической безопасности объектов ядерного наследия и пунктов захоронения радиоактивных отходов обсуждалось, в частности, на заседании НТС № 10 Госкорпорации «Росатом» 24.10 2018 г. Были рассмотрены первоочередные задачи, в том числе доведение программных средств до стадии готовности к представлению на экспертизу, а также необходимость проведения координационного совещания разработчиков и пользователей.

К настоящему времени завершен четырехлетний этап работ, по итогам которого разработаны пилотные версии всех перечисленных выше расчетных кодов, а также необходимая сопроводительная документация (руководства пользователя, руководства по моделям, материалы верификационных отчетов). В течение трех лет все РПК будут поданы на аттестацию. Сейчас пилотные версии в тестовом режиме используются эксплуатирующими, проектными и экспертными организациями, среди которых АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» «ВНИПИЭТ»; АО «АЭХК»; ГНЦ «НИИАР»; АО «Атомэнергопроект»; АО «ГСПИ»; ФБУ «НТЦ ЯРБ».

Только в 2019 году по теме создания расчетных кодов зарегистрировано 17 результатов интеллектуальной деятельности (РИД), опубликовано 25 статей и препринтов; результаты представлены на 40 международных и российских научных конференциях и семинарах.

Представлена для аттестации вторая версия геофильтрационно-геомиграционного кода GeRa/V2. Данная версия по сравнению с первой включает следующие новые модели: переноса в средах с двойной пористостью; теплопереноса и тепловой конвекции; зависимости вязкости раствора от температуры и концентрации примесей; двухфазной фильтрации; сопряженных процессов фильтрации и поверхностного стока.

Начата разработка программно-технического комплекса по оценке доз облучения человека и биоты по всем путям воздействия радионуклидов за счет радиоактивного загрязнения водных объектов. По планам расчетное средство будет соответствовать всем российским требованиям и международным рекомендациям и с таким функционалом впервые будет подано на аттестацию в следующем году.

Тенденции развития

Текущий статус позволяет утверждать, что по полноте учитываемых процессов разрабатываемая система кодов превосходит имеющиеся аттестованные программные средства, что позволяет ставить задачи расширения рамок их применения.

Система расчетных кодов и баз данных, формирующих практическую методологию, должна обеспечивать услугу по расчетному обоснованию долговременной безопасности и оптимизации решений по захоронению РАО и выводу из эксплуатации. Это включает в себя вопросы размещения, проектирования, сооружения, эксплуатации, реконструкции, закрытия, обращения с РАО (перевозка, кондиционирование, хранение, захоронение) в формате обоснования концептуальных решений на этапе предпроектных разработок, постоянно действующих моделей и цифровых двойников, а также инструментария периодической оценки безопасности на последующих этапах. При этом и требования нормативной базы, и современные возможности вычислительной техники позволяют утверждать, что соответствующие расчеты должны осуществляться на основе как детерминистических, так и вероятностных подходов.

Со спецификой задач в сфере расчетно-экспериментального обоснования безопасности (в частности, с большими временными масштабами прогнозирования процессов, разнородностью и значительным объемом информации, которую необходимо учитывать, большим числом вовлеченных специалистов) связано сразу несколько тенденций в развитии систем вычислительных средств.

Одна из них — выделение отдельного блока задач, направленных на управление информацией, данными и знаниями. Отметим, что такие задачи сейчас в фокусе внимания во многих научно-технических областях, хотя в случае объектов наследия и ПЗРО необходимость длительного

сохранения информации, напрямую связанной с обеспечением безопасности, привносит свою специфику. Поэтому в рамках зарубежных и международных проектов разрабатываются как общие методические подходы (что и как сохранять), так и конкретные программные решения: базы знаний, базы лучших практик, архивы исходных данных и результатов выполненных исследований, инструменты их анализа и т. д. [40].

Другой тренд состоит в интеграции трехмерных численных моделей, специализированных баз данных, геоинформационных систем и т. д. Получение в реальном времени консолидированной информации по самым разным аспектам предметной области востребовано, например, в системах поддержки принятия решений. Чтобы принимающие решения специалисты могли оперативно ориентироваться в больших объемах информации, для таких систем разрабатываются современные интерактивные интерфейсы, в том числе с использованием технологий виртуальной и дополненной реальности [28].

Еще одна тенденция, среди предпосылок которой не только специфика решаемых задач, но и цифровая трансформация атомной отрасли и экономики в целом, а также развитие суперкомпьютерных и сетевых технологий, — это постепенная смена парадигмы позиционирования расчетных комплексов. Данное изменение состоит в том, что расчетные коды из отчуждаемого от разработчика продукта, тем не менее требующего настройки оборудования и ПО, обучения и технической поддержки, станут цифровым сервисом, который предоставляется по запросу удаленному пользователю. Возможность проведения объемных многовариантных комплексов расчетов на единой суперкомпьютерной платформе [41], заведомо удовлетворяющей техническим требованиям, обеспеченной всеми необходимыми базами данных и знаний и сопровождаемой профильными специалистами высокого уровня, одновременно обеспечивает принципиальное повышение качества и такое же решительное сокращение расходов.

Литература

1. Порядок проведения экспертизы программ для электронных вычислительных машин, используемых в целях построения расчетных моделей процессов, влияющих на безопасность объектов использования атомной энергии и (или) видов деятельности в области использования атомной энергии : утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 30 июля 2018 г. № 325.
2. Scott E. M. (ed.). Modelling radioactivity in the environment. — Elsevier, 2003. 438 p. ISBN: 9780080536651.
3. Об использовании атомной энергии: федеральный закон от 20.10.1995 № 170-ФЗ.
4. НП-055-14. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности.
5. НП-069-14. Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов. Требования безопасности.
6. НП 100-17. Требования к составу и содержанию отчёта по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов.
7. Захоронение радиоактивных отходов, конкретные требования безопасности № SSR-5. — Вена: МАГАТЭ, 2011. — ISBN 978–92–0–420010–2.
8. *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.
9. NEA/RWM/R(2019)1. Radioactive Waste Management and Decommissioning. International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste. Version 3. — Paris: OECD, 2019.
10. Решение проблем, отмеченных на пятом Совещании. — В кн.: Пятый национальный доклад Российской Федерации «О выполнении обязательств, вытекающих из Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами» к шестому Совещанию Договаривающихся сторон по рассмотрению национальных докладов в рамках Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами. — Австрия, Вена, 21 мая — 1 июня 2018 г. — С. 139—140.
11. *Большов Л. А., Линге И. И., Саркисов А. А., Уткин С. С.* Практика и задачи научного обеспечения работ по ядерному наследию // Атомная энергия. 2016. Т. 120. № 4. С. 201—207.
12. Nuclear Energy Agency, Radioactive Waste Management Committee. The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-lived Radioactive Wastes. — Paris: OECD, 1995.
13. *Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Линге И. И., Пронь И. А.* Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть I. Актуальное состояние проектов создания пунктов глубинного геологического захоронения в европейских странах: Препринт № IBRAE-2017-03. — М. : ИБРАЭ РАН, 2017. 35 с.
14. *Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Коновалов В. Ю.* Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть II. Актуальное состояние проектов создания пунктов глубинного геологического захоронения

в США, Канаде и странах Азиатского региона: Препринт № IBRAE-2017-04. — М. : ИБРАЭ РАН, 2017. 41 с.
15. *Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Линге И. И., Пронь И. А., Коновалов В. Ю.* Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть III. Зарубежный опыт создания и эксплуатации подземных исследовательских лабораторий: Препринт № IBRAE-2017-12. — М. : ИБРАЭ РАН, 2017. 34 с.
16. Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Specific Safety Guide No SSG-14. IAEA Safety Standards, Vienna: IAEA, 2011.
17. International Experience in Safety Cases for Geological Repositories (INTESC): Outcome of the INTESC Project : Publication 6251 — Paris: OECD NEA, 2009.
18. *Chapman N., Hooper A.* The disposal of radioactive wastes underground // Proceedings of the Geologists' Association. 2012. Vol. 123. № 1. P. 46—63. DOI: 10.1016/j.pgeola.2011.10.001
19. *Galson D. A., Bailey L.* Performance assessment and the safety case: Lessons from recent international projects and areas for further development. — 2014. NEA-RWM-R-2013-9.
20. *Falck W. E., Nilsson K. F.* Geological disposal of radioactive waste: moving towards implementation. JRC reference report. — European Communities, 2009. — ISBN 978-92-79-12697-0.
21. The Swedish Radiation Protection Institute´s Regulations Concerning the Final Management of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste with background and comments. SSI rapport : 2000:18. Stockholm: Swedish Radiation Protection Institute, 2000.
22. National Waste ProgrammeBAT / BPM Resource Guide Guidance Document NWP-REP-100 — Issue 2 // Cumbria: LLW Repository Ltd, 2018.
23. Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto. Models and data for the repository system 2012. Parts 1 and 2. — POSIVA-13-1. — Eurajoki: Posiva Oy, 2013.
24. *Vahlund F. et al.* Model summary report for the safety assessment SR-Site. — SKB-TR—14-11. — Stockholm: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 2014.
25. Provisional Safety Analyses for SGT Stage 2. Models, Codes and General Modelling Approach. – Nagra Technical Report 14-09. – Wettingen: National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, 2014.
26. Комплексная программа исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения РАО и оптимизации эксплуатационных параметров : утв. 09.01.2019 Директором по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ ЯРОО ГК «Росатом» О. В. Крюковым.
27. *Birkholzer J. T. et al.* 25 years of DECOVALEX — Scientific advances and lessons learned from an international research collaboration in coupled subsurface processes // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019. Vol. 122. P. 103995. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.03.015.
28. *Szőke I. et al.* Comprehensive support for nuclear decommissioning based on 3D simulation and advanced user interface technologies // Journal of Nuclear Science and Technology. 2015. Vol. 52. № 3. P. 371—387. DOI:10.1080/00223131.2014.951704
29. РБ-153-18. Рекомендации по обоснованию выбора варианта вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии.
30. НП 103-17. Требования к обеспечению безопасности пунктов размещения особых радиоактивных отходов и пунктов консервации особых радиоактивных отходов.
31. РБ-117-16. Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов.
32. Перечень действующих аттестационных паспортов программных средств по состоянию на январь 2020 г. [Электронный ресурс] — Режим доступа: https://www.secnrs.ru/expertise/software-review/passeports_database_january_2020.pdf — свободный.
33. *Дробышевский Н. И., Моисеенко Е. В., Бутов Р. А., Токарев Ю. Н.* Трехмерное численное моделирование теплового состояния пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов в Нижнеканском массиве горных пород // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 64—73.
34. *Крючков Д. В., Болдырев К. А.* Принципы комплексного учета процессов эволюции инженерных барьеров безопасности при оценке распространения радионуклидов за пределы объекта // Радиоактивные отходы. 2019. № 4 (9). С. 106—115. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-106-115.
35. *Блохин А. И. и др.* Программный комплекс «КОРИДА» для прогнозирования радиационных полей с учетом изменений характеристик источников излучения и инженерных барьеров безопасности // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 2019. № 4. С. 78—87.
36. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ 2020611976. Программа для трёхмерного геофильтрационного и геомиграционного моделирования (GERA/V2) / Болдырев К. А., Григорьев Ф. В., Капырин И. В., Копытов Г. В., Нужный А. С., Плёнкин А. В., Расторгуев А. В., Савельева-Трофимова Е. А., Сускин В. В., Трофимов А. А., Уткин С. С., Василевский Ю. В., Коньшин И. Н., Крамаренко В. К., Никитин К. Д., Чернышенко А. Ю., Новиков К. А., Ануприенко Д. В., Неуважаев Г. Д. ; правообладатель Российская

Федерация, от имени которой выступает Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». — № 2020610550 ; заявл. 24.01.2020; зарегистр. 12.02.2020; опубл. 12.02.2020, Бюл. № 2. — 2 с.
37. *Савельева Е. А.* Концепция программного комплекса для оценки неопределенности при обосновании безопасности пунктов захоронения РАО // Ядерная и радиационная безопасность. 2016. № 4. С. 22—35.
38. *Бакин Р. И. и др.* Программное средство для оценки источника выброса в атмосферу радиоактивных газов и аэрозолей при демонтаже или разрушении зданий и сооружений, загрязненных радиоактивными веществами // Радиоактивные отходы. 2019. № 3 (8). С. 91—102. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-3-91-102.
39. *Сороковикова О. С., Дзама Д. В., Асфандияров Д. Г.* Расчётный код для численного моделирования переноса радиоактивной примеси в крупных водных акваториях методом лагранжевых крупных частиц с использованием современных технологий высокопроизводительных вычислений. Часть I. — Препринт № IBRAE-2018-01. — М.: ИБРАЭ РАН, 2018. — 31 с.
40. NEA/RWM/R(2018)2. Managing Information and Requirements in Geological Disposal Programmes. — Paris: OECD NEA, 2018.
41. *Hammond G. E., Lichtner P. C., Mills R. T.* Evaluating the performance of parallel subsurface simulators: An illustrative example with PFLOTRAN // Water resources research. 2014. Vol. 50. № 1. С. 208—228. DOI: 10.1002/2012WR013483.

Информация об авторах

Линге Игорь Иннокентьевич, доктор технических наук, заместитель директора, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, ул. Большая Тульская, д. 52), e-mail: linge@ibrae.ac.ru.

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

Свительман Валентина Семеновна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, ул. Большая Тульская, д. 52), e-mail: svitelman@ibrae.ac.ru.

Дерябин Сергей Александрович, старший менеджер, Управление разработки реализации программ реабилитации объектов наследия, Госкорпорация «Росатом» (119017, Москва, ул. Большая Ордынка, д. 24), e-mail: SeADeriybin@rosatom.ru.

Библиографическое описание статьи

Линге И. И., Уткин С. С., Свительман В. С., Дерябин С. А. Расчетное обоснование долговременной безопасности и оптимизация решений по захоронению РАО и выводу из эксплуатации: тенденции, потребности, возможности // Радиоактивные отходы. 2020. № 2 (11). С. 85—98. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-2-85-98.

NUMERICAL SAFETY ASSESSMENT AND OPTIMIZATION OF DECISIONS ON RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL AND NUCLEAR DECOMMISSIONING: TRENDS, NEEDS, OPPORTUNITIES

Linge I. I.[1], Utkin S. S.[1], Svitelman V. S.[1], Deryabin S. A.[2]

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

[2]State Corporation "Rosatom", Moscow, Russia

Article received on April 9, 2020

The paper focuses on numerical safety assessment and decision-making optimization under radioactive waste disposal and nuclear decommissioning projects. The paper demonstrates the industry needs for an up-to-date software

and the corresponding capabilities of the computational framework being developed. The article also explores its development potential in light of modern IT trends.

Keywords: *radioactive waste, safety assessment, computational codes, numerical modelling, RW disposal, nuclear decommissioning.*

References

1. Poryadok provedeniya ekspertizy programm dlya elektronnykh vychislitelnykh mashin, ispolzuemykh v tselyakh postroeniya raschetnykh modeley protsessov, vliyayushchikh na bezopasnost ob"ektov ispolzovaniya atomnoy energii i (ili) vidov deyatelnosti v oblasti ispolzovaniya atomnoy energii : utv. prikazom Federalnoy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 30 iyulya 2018 g. № 325. [The procedure for the examination of programs for electronic computers used to build computational models of processes that affect the safety of nuclear facilities and (or) types of activities in the field of atomic energy use: approved. Order of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision of July 30, 2018 No. 325].

2. Scott E. M. (ed.). Modelling radioactivity in the environment. — Elsevier, 2003. 438 p. ISBN: 9780080536651.

3. *Ob ispolzovanii atomnoy energii* : federalnyy zakon ot 21 noyabrya 1995 g. No. 170-FZ [On the Use of Atomic Energy : Federal Law of 21 November 1995 No. 170 – FZ.

4. *NP-055-14. Zakhoronenie radioaktivnykh otkhodov. Principy, kriterii i osnovnye trebovaniya bezopasnosti* [Radioactive Waste Disposal. Principles, Criteria and Main Safety Requirements].

5. *NP-069-14. Pripoverhnostnoe zahoronenie radioaktivnyh othodov. Trebovaniya bezopasnosti* [Near-Surface Disposal of Radioactive Waste. Safety Requirements].

6. *NP-100-17. Trebovaniya k sostavu i soderzhaniyu otcheta po obosnovaniyu bezopasnosti punktov zahoroneniya radioaktivnyh othodov* [Requirements on the Contents and Structure of Safety Analysis Reports for Radioactive Waste Disposal Facilities].

7. *Zahoronenie radioaktivnyh othodov. Konkretnye trebovaniya bezopasnosti* [Disposal of radioactive waste Specific safety requirements]. № SSR-5. Vienna: IAEA, 2011. – ISBN 978–92–0–420010–2.

8. Dorofeev A. N., Saveleva E. A., Utkin S. S., Ponizov A. V. et al. Evolyutsiya obosnovaniya dolgovremennoy bezopasnosti PGZ ZHRO [Evolution in the Safety Case for Liquid Radioactive Waste Geological Repositories]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste,* 2017, no. 1, pp. 56—65.

9. NEA/RWM/R(2019)1. Radioactive Waste Management and Decommissioning. International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste. Version 3. — Paris: OECD, 2019.

10. Reshenie problem, otmechennykh na pyatom Soveshchanii. — V kn.: Pyatyy natsionalnyy doklad Rossiyskoy Federatsii «O vypolnenii obyazatelstv, vytekayushchikh iz Ob"edinennoy konventsii o bezopasnosti obrashcheniya s otrabotavshim toplivom i o bezopasnosti obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami» k shestomu Soveshchaniyu Dogovarivayushchikhsya storon po rassmotreniyu natsionalnykh dokladov v ramkakh Ob"edinennoy konventsii o bezopasnosti obrashcheniya s otrabotavshim toplivom i o bezopasnosti obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami [Addressing the Challenges Pointed Out at the Fifth Review Meeting. — In: The fifth national report of the Russian Federation on compliance with the obligations of the joint convention on the safety of spent fuel management and the safety of radioactive waste management]. Austria, Vienna, 21 May —1 June 2018. pp. 139—140.

11. Bolshov L. A., Linge I. I., Sarkisov A. A., Utkin S. S. Praktika i zadachi nauchnogo obespecheniya rabot po yadernomu naslediyu [Practice and Problems of Scientific Support for Nuclear Legacy Work]. *Atomnaya energiya — Atomic Energy,* 2016, vol. 120, no. 4, pp. 252—258.

12. Nuclear Energy Agency, Radioactive Waste Management Committee. The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-lived Radioactive Wastes. — Paris: OECD, 1995.

13. Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Linge I. I., Pron I. A. Zarubezhnye proekty zakhoroneniya OYAT i RAO. Chast I. Aktualnoe sostoyanie proektov sozdaniya punktov glubinnogo geologicheskogo zakhoroneniya v evropeyskikh stranakh: Preprint № IBRAE-2017-03 [Foreign SNF and RW disposal projects. Part I. The current condition of the projects of deep geological disposal facilities in European countries]. *Preprint of IBRAE no. IBRAE-2017-03.* Moscow, IBRAE RAN Publ., 2017. 35 p.

14. Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Konovalov V. Yu. Zarubezhnye proekty zakhoroneniya OYAT i RAO. Chast II. Aktualnoe sostoyanie proektov sozdaniya punktov glubinnogo geologicheskogo zakhoroneniya v SSHA, Kanade i stranakh Aziatskogo regiona: Preprint № IBRAE-2017-04 [Foreign SNF and RW disposal projects. Part II. Current condition of the projects of deep geological disposal in the USA, Canada and Asian region]. *Preprint of IBRAE no. IBRAE-2017-04.* Moscow, IBRAE RAN Publ., 2017. 41 p.

15. Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Pron I. A., Konovalov V. Yu. Zarubezhnye proekty zahoroneniya

OYAT i RAO. Chast III. Zarubezhnyj opyt sozdaniya i ekspluatacii podzemnyh issledovatel'skih laboratorij [Internetional Experience in Deep Geological Disposal of SNF and RW. Part 3. International experience in development and operation of underground research laboratories]. *Preprint IBRAE no. IBRAE-2017-12.* Moscow, IBRAE RAN Publ., 2017. 34 p.
16. Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Specific Safety Guide No SSG-14. IAEA Safety Standards, Vienna: IAEA, 2011.
17. International Experience in Safety Cases for Geological Repositories (INTESC): Outcome of the INTESC Project : Publication 6251. Paris: OECD NEA, 2009.
18. Chapman N., Hooper A. The disposal of radioactive wastes underground. *Proceedings of the Geologists' Association,* 2012, vol. 123, no. 1, pp. 46—63. DOI: 10.1016/j.pgeola.2011.10.001.
19. Galson D. A., Bailey L. *Performance assessment and the safety case: Lessons from recent international projects and areas for further development*. 2014. NEA-RWM-R —2013-9.
20. Falck W. E., Nilsson K. F. *Geological disposal of radioactive waste: moving towards implementation. JRC reference report.* European Communities, 2009. ISBN 978-92-79-12697-0.
21. The Swedish Radiation Protection Institute´s Regulations Concerning the Final Management of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste with background andcomments. SSI rapport : 2000:18. Stockholm: Swedish Radiation Protection Institute, 2000.
22. National Waste ProgrammeBAT / BPM Resource GuideGuidanceDocumentNWP-REP-100 — Issue 2. Cumbria: LLW Repository Ltd, 2018.
23. Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto. Models and data for the repository system 2012. Parts 1 and 2. POSIVA-13-1. — Eurajoki: Posiva Oy, 2013.
24. Vahlund F. et al. Model summary report for the safety assessment SR-Site. SKB-TR-14-11. — Stockholm: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 2014.
25. Provisional Safety Analyses for SGT Stage 2. Models, Codes and General Modelling Approach. — NagraTechnical Report 14-09. — Wettingen: National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, 2014.
26. Kompleksnaya programma issledovaniy v obosnovanie dolgovremennoy bezopasnosti zakhoroneniya RAO i optimizatsii ekspluatatsionnykh parametrov : utv. 09.01.2019 Direktorom po gosudarstvennoy politike v oblasti RAO, OYAT i VE YAROO GK «Rosatom» O.V. Kryukovym [A comprehensive research program for the long-term safety assessment of RW disposal and optimization of operational parameters: approved 01/09/2019 by Kryukov O. V., Director for Public Policy on Radioactive Waste, Spent Nuclear Fuel and Nuclear Decommissioning, State Corporation Rosatom].
27. Birkholzer J. T. et al. 25 years of DECOVALEX-Scientific advances and lessons learned from an international research collaboration in coupled subsurface processes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* 2019, vol. 122, p. 103995. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.03.015.
28. Szőke I. et al. Comprehensive support for nuclear decommissioning based on 3D simulation and advanced user interface technologies. *Journal of Nuclear Science and Technology,* 2015, vol. 52, no. 3, pp. 371—387. DOI:10.1080/00223131.2014.951704.
29. RB-153-18. Rekomendatsii po obosnovaniyu vybora varianta vyvoda iz ekspluatatsii ob"ektov ispolzovaniya atomnoy energii [Recommendations on the justification of the option choice for decommissioning of nuclear facilities].
30. НП 103-17. Trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti punktov razmeshcheniya osobykh radioaktivnykh otkhodov i punktov konservatsii osobykh radioaktivnykh otkhodov [Requirements for ensuring the safety of special radioactive waste disposal facilities and special radioactive waste conservation facilities].
31. RB-117-16. Otsenka dolgovremennoy bezopasnosti punktov pripoverkhnostnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov [Long-term safety assessment of near-surface radioactive waste disposal sites].
32. Perechen deystvuyushchikh attestatsionnykh pasportov programmnykh sredstv po sostoyaniyu na yanvar 2020 g. [The list of valid software certificates. of as of January 2020] URL: https://www.secnrs.ru/expertise/software-review/passeports_database_january_2020.pdf.
33. Drobyshevskiy N. I., Moiseenko E. V., Butov R. A., Tokarev Yu. N. Trekhmernoe chislennoe modelirovanie teplovogo sostoyaniya punkta glubinnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov v Nizhnekanskom massive gornykh porod [Three-dimensional numerical modelling of the thermal state of the deep radioactive waste disposal facility in the Nizhnekansk granitoid massif]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste,* 2017, no. 1, pp. 64—73.
34. Kryuchkov D. V., Boldyrev K. A. Printsipy kompleksnogo ucheta protsessov evolyutsii inzhenernykh barerov bezopasnosti pri otsenke rasprostraneniya radionuklidov za predely ob"ekta [Principles Ensuring Comprehensive Accounting of Processes Associated with Engineered Safety Barriers' Evolution: Assessing Radionuclide Spread Beyond Site Boundaries]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste,* 2019, no. 4 (9), pp. 106—115. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-106-115.

35. Blokhin A. I. et al. Programmnyy kompleks «KORIDA» dlya prognozirovaniya radiatsionnykh poley s uchetom izmeneniy kharakteristik istochnikov izlucheniya i inzhenernykh barerov bezopasnosti [Corida: A Program Package for Predicting Radiation Fields Based on the Variations in the Properties of Radiation Sources and Engineering Security Barriers]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov — Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki, series "Mathematical Modeling of Physical Processes",* 2019, no. 4, pp. 78—87.
36. Svidetel`stvo o gosregistracii programmy` dlya E`VM 2020611976. Programma dlya tryoxmernogo geofil`tracionnogo i geomigracionnogo modelirovaniya (GERA/V2) [Certificate of state registration of a computer program 2020611976. Russian Federation. The program for three-dimensional geofiltration and geomigration modeling (GERA/ V2)] / Boldyrev K. A., Grigoryev F. V., Kapyrin I. V., Kopytov G. V., Nuzhny A. S., Plenkin A. V., Rastorguev A. V., Savelyeva-Trofimova E. A., Suskin V. V., Trofimov A. A., Utkin S. S., Vasilevsky Yu. V., Konshin I. N., Kramarenko V. K., Nikitin K. D., Chernyshenko A. Yu., Novikov K. A., Anuprienko D. V., Neuvazhaev G. D.; copyright holder Russian Federation, on behalf of which stands the State Atomic Energy Corporation Rosatom. — № 2020610550; declared 01/24/2020; registered 02/12/2020; published 02/12/2020, Bull. № 2. — 2 p. (in Russian).
37. Saveleva E. A. Kontseptsiya programmnogo kompleksa dlya otsenki neopredelennosti pri obosnovanii bezopasnosti punktov zakhoroneniya RAO [The concept of software complex to evaluate uncertainty in demonstration of RW disposal facility safety]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost — Nuclear and Radiation Safety,* 2016, no. 4, pp. 22—35.
38. Bakin R. I. et al. Programmnoe sredstvo dlya otsenki istochnika vybrosa v atmosferu radioaktivnykh gazov i aerozoley pri demontazhe ili razrushenii zdaniy i sooruzheniy, zagryaznennykh radioaktivnymi veshchestvami [Source Term Assessment Software for Atmospheric Releases of Radioactive Gases and Aerosols during Dismantlement or Demolition of Buildings and Structures with Radioactive Contamination]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste,* 2019, no. 3 (8), pp. 91—102. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-3-91-102.
39. Sorokovikova O. S., Dzama D. V., Asfandiyarov D. G. Raschyotnyy kod dlya chislennogo modelirovaniya perenosa radioaktivnoy primesi v krupnykh vodnykh akvatoriyakh metodom lagranzhevykh krupnykh chastits s ispolzovaniem sovremennykh tekhnologiy vysokoproizvoditelnykh vychisleniy. Chast I [Computer code for numerical simulation of radioactive admixture transport in large water areas by the Lagrangian large particle method using modern high-performance computing technologies. Part 1] *Preprint IBRAE no. IBRAE-2018-01*. Moscow, IBRAE RAN Publ., 2018. 31 p.
40. NEA/RWM/R(2018)2. Managing Information and Requirements in Geological Disposal Programmes. – Paris: OECD NEA, 2018.
41. Hammond G. E., Lichtner P. C., Mills R. T. Evaluating the performance of parallel subsurface simulators: An illustrative example with PFLOTRAN. *Water resources research.* 2014, vol. 50, no. 1, pp. 208—228. DOI: 10.1002/2012WR013483.

Information about the authors

Linge Igor Innokentevich, Doctor of Engineering, Deputy Director, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: linge@ibrae.ac.ru.

Utkin Sergey Sergeevich, Doctor of Engineering, Head of Department, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: uss@ibrae.ac.ru.

Svitelman Valentina Semenovna, PhD, Research associate, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: svitelman@ibrae.ac.ru.

Deryabin Sergey Aleksandrovich, Senior Manager, Department for the Development and Implementation of Nuclear Legacy Remediation Programs, State Corporation «Rosatom» (24, Bolshaya Ordynka st , Moscow, 119017, Russia), e-mail: SeADeriybin@rosatom.ru.

Bibliographic description

Linge I. I., Utkin S. S., Svitelman V. S., Deryabin S. A. Numerical Safety Assessment and Optimization of Decisions on Radioactive Waste Disposal and Nuclear Decommissioning: Trends, Needs, Opportunities. *Radioactive Waste,* 2020, no. 2 (11), pp. 85—98. (In Russian). DOI: 10.25283/2587-9707-2020-2-85-98.