



Заключение

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук
(ИБРАЭ РАН)

Диссертация «Разработка и параметрическое обеспечение расчетных моделей для обоснования долговременной безопасности пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (участок «Енисейский»)» выполнена в Лаборатории геомиграционного моделирования (лаб. № 12) ИБРАЭ РАН, где в период подготовки диссертации соискатель Неуважаев Георгий Дмитриевич последовательно работал на должностях инженера-исследователя и младшего научного сотрудника.

В 2015 г. Г.Д. Неуважаев окончил Московский государственный университет по направлению «Геология».

В 2022 г. закончил аспирантуру ИБРАЭ РАН, где ему выдано удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов.

Научный руководитель – Уткин Сергей Сергеевич, доктор технических наук, заведующий отделением анализа долгосрочных рисков в сфере обеспечения ядерной и радиационной безопасности ИБРАЭ РАН, ответственный исполнитель и руководитель крупных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в рамках реализации мероприятий по обоснованию долговременной безопасности ПГЗРО.

По итогам обсуждения на объединенном семинаре отделения анализа долгосрочных рисков в сфере обеспечения ядерной и радиационной безопасности, включая лабораторию геомиграционного моделирования, и отделения информационного обеспечения программ в сфере ЯРБ ИБРАЭ РАН, состоявшегося 20.06.2022 г., принято следующее решение:

Диссертация Неуважаева Г.Д. «Разработка и параметрическое обеспечение расчетных моделей для обоснования долговременной безопасности пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (участок «Енисейский»)» выполнена на высоком научном уровне, является научной-квалификационной работой, в результате выполнения которой:

Проведен анализ существующих подходов к моделированию для описания геофильтрационных и геомиграционных процессов в различных типах вмещающих пород;

Выполнена оценка по влиянию элементов геологического строения как части параметрического обеспечения модели на поток подземных вод на основе плановой геофильтрационной модели, реализованной методом аналитических элементов, и на основе профильной модели, выполненной в пределах участка «Енисейский»;

Осуществлена обработка и интерпретация результатов кустовой откачки из несовершенных скважин, разработка трехмерной модели, включающая обоснование таких аспектов параметрического обеспечения, как: пространственная неоднородность фильтрационных свойств; воспроизведение фактического хода откачки и определение фильтрационных параметров по результатам калибровки модели;

Проведены опытно-фильтрационные исследования (ОФР) для определения фильтрационных параметров с использованием современных пневматических пакеров позволяющих надежно изолировать проницаемые интервалы;

Разработаны различные варианты трехмерных геофильтрационно-геомиграционных моделей на основе различных подходов: с использованием блоковой структуры массива в рамках концепции пористой среды EPM (Equivalent Porous Medium) и DFM (Discrete Fracture

Matrix) подхода, а также выполнено сопоставление полученных в различных вариантах геофильтрационных параметров.

Актуальность работы

Окончательная изоляция высокоактивных и среднеактивных долгоживущих РАО (а также ОЯТ, если топливо не перерабатывается) является актуальным вопросом для всех государств, использующих атомную энергию. На сегодняшний день международным научно-техническим сообществом признано, что наиболее эффективным и безопасным решением этой проблемы является захоронение в глубоких геологических формациях с соблюдением принципа многобарьерной защиты. Такой подход позволяет обеспечить пассивную долгосрочную изоляцию радионуклидов от биосферы. На фоне многочисленных проектов создания пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО), разрабатываемых в том или ином виде странами с развитой ядерной энергетикой, в России также ведется проектирование подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ). В 2002-2005 годах под руководством АО «ВНИПИпромтехнологии» были проведены комплексные исследования на участке «Енисейский», расположенном в пределах ЗАТО г. Железногорска в Красноярском крае.

Процессы проектирования, сооружения, эксплуатации и закрытия ПГЗРО сопровождаются обязательными итерационными обоснованиями эксплуатационной и долговременной безопасности – сложными мультидисциплинарными процедурами систематического анализа всех возможных факторов, которые могут повлиять на безопасность системы захоронения. Основа этого анализа - выполнение прогнозных модельных расчетов на период потенциальной опасности радиоактивных отходов (РАО), что определяет высокую важность разработки и верификации соответствующих моделей.

Для подтверждения способности системы захоронения РАО ограничивать радиационное воздействие на население и окружающую среду важнейшими являются модели переноса радионуклидов, которые должны формироваться с возможностью учета процессов на разных пространственных и временных масштабах. Обычно выделяются: дальняя зона – участок от сотен метров до десятков километров до потенциальной зоны разгрузки подземных вод, ближняя зона – участок от нескольких метров до сотен метров в пределах ПГЗРО, и биосфера – поверхностные воды, атмосфера, почва, биота, население. Один из основных инструментов прогнозирования экологической приемлемости ПГЗРО – геофильтрационное-геомиграционное моделирование, так как именно оно формирует представление о миграции радионуклидов в ближней и дальней зоне, а также исходные данные для оценки их поступления в биосферу.

Непосредственно для выполнения моделирования на настоящий момент разработаны разные подходы, позволяющие рассматривать различные варианты описания процессов и среды. Практика разработки конкретных моделей для отдельных объектов показывает, что основная проблема заключается в их параметризации - это связано с наличием неопределенности в значениях требуемых параметров, вызванной их пространственно-временной вариабельностью и конечной точностью.

Таким образом, качество прогнозов в значительной степени определяется параметрическим обеспечением расчетных моделей обоснования безопасности объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), которое, в свою очередь, обусловлено не только количеством и качеством исходной релевантной информации, но и собственно методиками параметризации.

Вопрос параметризации возникает и с другой стороны. Важный аспект в обосновании безопасности, который появился на повестке сравнительно недавно (около 15 лет назад) – «проблема доверия» к значениям тех индикаторов безопасности, которые будут получены в результате численного моделирования на долгосрочный период после закрытия пункта захоронения. Поэтому сооружению непосредственно ПГЗРО предшествует строительство подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ), где проводятся натурные исследования, результаты которых позволяют сформировать основу для обеспечения достоверности обоснования безопасности. Наряду с демонстрацией реализуемости технологических процессов в реальных геологических условиях и с соблюдением реальных пространственных масштабов, обширный класс практических исследований в ПИЛ нацелен на изучение

характеристик и свойств геологических пород и гидрогеологических характеристик на глубине и в условиях предполагаемого размещения ПГЗРО, которые являются исходными данными для создания гидрогеологических моделей.

В концептуальную основу гидрогеологических моделей закладывается как разработка методических подходов к выбору математических основ описания среды (параметры, граничные и начальные условия), так и состав учитываемых процессов. Результаты, полученные в период выполнения поисковой и оценочной стадии работ по выбору участка размещения ПЗРО, позволяют выполнить и обосновать параметризацию гидрогеологических моделей.

Корректность концептуальной гидрогеологической модели и ее параметризация во многом определяют обоснованность результатов выполнения прогнозных модельных расчетов в целом и, соответственно, степень доверия к ним.

Научная новизна работы

1. Впервые при разработке расчётной геофильтрационной модели использована детальная геологическая модель с использованием элементов геологического строения, установленных на основании анализа результатов бурения скважин на участке «Енисейский». По результатам калибровки модели определены фильтрационные параметры основных элементов геологического строения.

2. Разработан алгоритм, предусматривающий оценку влияния структуры разрывных нарушений на направление потока подземных вод, решающим образом определяющего безопасность ОИАЭ.

3. Предложена новая методика по определению геофильтрационных параметров с помощью численного моделирования, которая позволяет улучшить их качество и достоверность получаемых результатов.

4. Впервые проведен анализ поинтервальных пакерных исследований, по результатам которых определены фильтрационные характеристики массива, выделенные на основании результатов геофизических исследований, в том числе для каждого интервала горного отвода, сопряженного с проектируемым ОИАЭ.

5. Впервые выполнены расчеты долговременной миграции радионуклидов в пределах участка «Енисейский» с учетом различных вариантов размещения разрывных нарушений, полученных на основе серии разнообразных геофизических исследований, которые позволили оценить влияние их местоположения для результата. При выполнении расчетов использовались 3D модели на основе различных концепции описания геологической среды: дискретной среды (DFM – Discrete Fracture Matrix) и пористой среды (EPM – Equivalent Porous Medium).

Практическая значимость работы

Значимость данной работы заключается в разработке и параметрическом обеспечении для трехмерных геофильтрационных моделей с возможностью их уточнения и детализации по мере получения новой информации. Эти модели и подходы ориентированы на использование для последующих расчетов миграции радионуклидов в рамках оценки долговременной безопасности ПГЗРО на участке «Енисейский».

Разработанная методика по определению геофильтрационных параметров массива горных пород позволяет увеличить их обоснованность и может быть использована для решения задач обоснования безопасности ПГЗРО.

Основные результаты диссертационной работы использованы при планировании натурных исследований на территории участка «Енисейский» и ведения мониторинга подземных вод в горных выработках.

Результаты, полученные на специально разработанных моделях, уже используются для текущих версий оценки долговременной безопасности (ОДБ) ПГЗРО на участке «Енисейский».

Личный вклад автора заключается в:

– разработке профильной геофильтрационной и геомиграционной модели в пределах участка «Енисейский»;

- разработке трехмерной геофильтрационной модели на основе блоковой структуры массива в рамках EPM (Equivalent Porous Medium) подхода;
- разработке трехмерной геофильтрационной модели на основе DFM (Discrete Fracture Matrix) подхода;
- разработке трехмерной модели в пределах двух кустов скважин 2Ц – Р-2 – 2-2 и 7Ц – Р-7 – 7-2 для несовершенных скважин и моделировании кустовой откачки в трещиноватой среде;
- планировании и отладке оборудования, поиску корректных эксплуатационных режимов пакерной установки, поддающихся корректному анализу, выполненным на участке «Енисейский» и анализу, отбраковке и коррекции полученных результатов;

Достоверность полученных результатов и выводов диссертации подтверждается:

- применением стандартных современных методов расчета для геофильтрационных и геомиграционных задач, а также общепризнанных международных программных средств при создании гидрогеологических моделей (Groundwater Modeling System, Modflow 6);
- использованием при проведении миграционного моделирования расчетного средства GeRa/V1, успешно прошедшего процедуру аттестации для использования при обосновании безопасности ОИАЭ;
- публикациями в реферируемых изданиях и рассмотрением на российских и международных научных конференциях;
- результатами проведения анализа чувствительности разрабатываемых моделей к их параметрам.

Диссертация Неуважаева Г.Д. является завершенной научно-квалификационной работой, соответствует специальности 05.14.03 «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации» и отрасли наук «технические науки». Все положения и результаты работы, выносимые на защиту получены автором лично или при непосредственном участии автора, отражены в 5 работах, опубликованных соискателем в рецензируемых изданиях из перечня ВАК Минобрнауки России (всего по теме диссертации опубликовано 24 научных работ). Основные результаты были представлены Неуважаевым Г.Д. на 13 научных конференциях и семинарах.

Диссертация «Разработка и параметрическое обеспечение расчетных моделей для обоснования долговременной безопасности пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (участок «Енисейский») Неуважаева Георгия Дмитриевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 – «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации».

Заключение принято на объединенном семинаре отделения анализа долгосрочных рисков в сфере обеспечения ядерной и радиационной безопасности ИБРАЭ РАН и отделения информационного обеспечения программ в сфере ЯРБ ИБРАЭ РАН (присутствовало 6 докторов и 13 кандидатов наук).

Присутствовало на заседании 40 чел. Результаты голосования: «за» – 40 чел., «против» – 0 чел., «воздержались» – 0 чел.

Заведующий лабораторией
геомиграционного моделирования,
к.ф.-м.н.

Капырин Иван Викторович

Заместитель директора
по научной работе
и координации
перспективных разработок,
д.т.н.

Линге Игорь Иннокентьевич